

Espeleogênese de Cavernas Areníticas: algumas considerações aplicadas à Província Espeleológica da Serra de Itaqueri, Estado de São Paulo, BRASIL

Rubens Caldeira MONTEIRO 1; Luiz Felipe Brandini RIBEIRO 2

1 - Rua 11-B, 1029 – Bairro Bela Vista - 13506-744 – Rio Claro – SP – Brasil

rubenscm@rc.unesp.br - <http://www.rubenscm.cjb.net>

2 - Av. 4-A, 1026 – Cidade Nova - 13506-770 – Rio Claro – SP – Brasil - brandini@rc.unesp.br

Resumo

A origem e evolução das cavernas de arenito (ou areníticas) são condicionadas pelo padrão estrutural, geomorfológico, estratigráfico e climático da área de ocorrência. Nesse trabalho é apresentado um modelo espeleogenético para as feições endocársticas das cavernas da porção centro-ocidental da Depressão Periférica Paulista em transição com as Cuestas Basálticas, na região denominada Serra de Itaqueri, podendo esse modelo ser assumido também para outras cavernas areníticas, tais como as da Serra do Padre e Serra de São Pedro. Este trabalho ressalta a importância do regime tectônico como principal condicionante na evolução dessas cavidades e inova por relacionar os processos de abatimento de blocos e arenização como consequência do tipo de falha associado, segundo o modelo de Riedel.

Palavras-chaves: espeleogênese, cavernas areníticas, geologia estrutural

Abstract

Speleogenesis of Sandstone Caves: some considerations applied to the Serra de Itaqueri Speleological Province, São Paulo State, BRAZIL

The origin and evolution of sandstone caves are a function of structural patterns, geomorphology, stratigraphy and climate of the region. In this paper is presented a new speleogenetic model for the endocarstic features of the center-western portion of the “Depressão Periférica Paulista” transitioning to the “Cuestas Basálticas” domain, in the region named Serra de Itaqueri, a model assumed to others near sandstone caves, like the ones at Serra do Padre and Serra de São Pedro. This paper emphasizes the importance of the tectonic regime as main condition to its evolution model and innovate relating the blocks falling and arenisation process to the fault type associated, according the Riedel’s model.

Keywords: speleogenesis, sandstone caves, structural geology

Resumen

Espeleogenesis de Cuevas de Arenita: algunas consideraciones genéticas aplicadas a la Provincia Espeleológica de la Sierra de Itaqueri, Estado de São Paulo, BRASIL

El origen y evolución de las cuevas de arenita son condicionados por el padrón estructural, geomorfológico, estratigráfico y climático de la área en ocurrencia. En este artículo presentamos un modelo espeleogenético de las fecciones endocarstic de las cuevas de la porción centro-occidental de la “Depressão Periférica Paulista” en transición con las “Cuestas Basálticas”, en la región denominada Sierra de Itaqueri, pudiendo este modelo ser asumido también para otras cuevas areníticas, tales como las de la Serra do Padre y la Serra de São Pedro. Este artículo aún resalta la importancia del régimen tectónico como principal condicionante en la evolución de estas cuevas, e innova por relacionar los procesos de queda de bloques y arenización con el tipo de fallas asociados, siguiendo el modelo de Riedel.

Palabras llaves: espeleogenesis, cuevas areníticas, geología estructural

Introdução

Em geral as cavernas mais conhecidas do mundo encontram-se em formações calcárias. As cavernas, abismos e fendas em rochas siliciclásticas, no entanto são mais raras. Neste trabalho será enfocada a origem das cavernas de arenito da região das Cuestas Basálticas, mais precisamente na Serra Cuscuzeiro, Santana, Itaqueri e São Pedro, entre os municípios de Analândia e São Pedro no Estado de São Paulo, Brasil.

A origem das cavernas de arenito é bastante complexa. Neste trabalho, com base em dados estruturais, geomorfológicos e estratigráficos propomos um modelo de espeleogênese para as “feições endocársticas” da região.

A área estudada localiza-se na porção centro-ocidental da **Depressão Periférica Paulista** em transição com as **Cuestas Basálticas**, drenada pela bacia do Rio Corumbataí, afluente de primeira ordem do Rio Piracicaba.

Aspectos Fisiográficos

O clima da região é caracterizado por invernos secos e verões quentes, com cerca de 80% da precipitação pluviométrica anual concentrada nos meses de outubro a março e temperatura média anual de 19°C. Os ventos dominantes apresentam componente direcional proveniente dos quadrantes sul e sudeste.

A região estudada encontra-se em sua maior parte na Bacia do Rio Corumbataí e limita-se ao sul com a Bacia do Rio Piracicaba. Os elementos da rede de drenagem da cuesta, são em sua maioria dendríticos a subdendríticos e em alguns casos retangulares, com rios predominantemente obseqüentes e subseqüentes, i.e., rios que correm no frente da cuesta e na frente do frente da cuestas, respectivamente.

A área de vegetação natural em todo o Estado de São Paulo é muito reduzida, comumente com ausência de mata ciliar no médio e baixo cursos dos rios da Bacia do Rio Corumbataí, ocupado geralmente pelo cultivo de cana ou pastagens, sendo alguns remanescentes de mata ciliar encontrados ao longo do Rio Cabeça, Rio Passa Cinco e no alto curso do Ribeirão Claro (ZAINÉ, M.F., 1996), além de drenagens de menor porte. A região estudada encontra-se na zona de transição entre uma *mata mesófila* – formação florestal estacional latifoliada subcaducifólia tropical pluvial – e o *cerrado* – formação não-florestal herbáceo-lenhosa, herbáceo-arbustiva, com árvores pereneófilas (BRASIL, 1977), somente preservados parcialmente em alguns bolsões e nas encostas, apesar do íngreme frente das cuestas quase sempre apresentarem-se desprovidos de vegetação e expondo as rochas subjacentes.

Em ordem de grandeza decrescente por área, quanto ao uso e ocupação desse solo, temos, segundo KÖFFLER (1993 *apud* ZAINÉ, M.F., 1996): pastagem, cultura de cana-de-açúcar, silvicultura, mata, fruticultura, cerrado, cultura anual, ocupação urbana e outros. No alto das cuestas, próximo à cornija observa-se o reflorestamento de espécies vegetais exóticas como o eucalipto e no reverso amplo cultivo de cana-de-açúcar. Nos frente da cuesta, área de mais difícil acesso, preserva-se ainda a mata original, mas modificada por ação antrópica, dado o potencial turístico da região.

O relevo é de cuestas, constituído de planaltos sustentados por maciços básicos, representados por morros testemunhos isolados, topos aplainados a arredondados, vertentes com perfis retilíneos e escarpas festonadas, tal como é descrito o relevo da região. A cuesta possui uma assimetria com camadas com mergulho inferior a 30°, dividido em reverso (porção menos íngreme, concordante às camadas) e frente (porção mais íngreme), formada pela cornija e tálus, apresentando interrupção pela erosão ortoclinal.

A região de ocorrência das cavernas possui grande importância nesse contexto todo pois encontra-se nos arenitos que compõem zona de recarga do “Megaquífero Guarani” (ROCHA, 1996) e deve ser preservada para manutenção da qualidade da água, utilizada para o abastecimento de milhões de pessoas, além de possuir uma vasta rede de drenagem superficial com cachoeiras na faixa de cabeceiras, junto ao frente das cuestas, de especial interesse para o turismo ambiental.

Arcabouço Geológico

A geologia da área, compondo o Mesozóico da Bacia Sedimentar do Paraná, é representada basicamente, da base para o topo, pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, que compõem o Grupo São Bento, evidenciando uma sedimentação exclusivamente continental, em clima árido a semi árido, encerrada por amplo vulcanismo basáltico, durante o Mesozóico.

- **Formação Pirambóia:** compõe um pacote de espessos corpos de arenito esbranquiçado, amarelado e avermelhado, de granulometria fina a média, com finas intercalações de siltito e argilito, e, localmente, com níveis conglomeráticos. Apresenta estratificações cruzadas de grande e médio porte. Regionalmente aflora nas regiões de Rio Claro, Ipeúna, Corumbataí, Charqueada e São Pedro, compondo uma larga faixa que acompanha o sopé das serras. Atinge na região cerca de 150 metros. Foi depositada em ambiente fluvial, apresentando por vezes influência eólica (SOARES, 1973 *apud* ZAINE, M.F., 1996), inclusive com o desenvolvimento de interdunas (BRIGHETTI & CAETANO-CHANG, 1992).

- **Formação Botucatu:** é constituída por um pacote de arenitos avermelhados a rosados, bimodais, de granulometria fina a média, com alto arredondamento e esfericidade, foscos e friáveis ou localmente muito silicificados, geralmente com uma película ferruginosa (óxido e/ou hidróxidos de ferro) envolvendo os grãos. Mais raramente ocorrem arenitos argilosos e níveis conglomeráticos (RICCOMINI, 1995). Estrutura marcante nesta unidade são estratificações plano-paralelas e cruzadas (tangencial e subordinadamente acanaladas), de médio e grande porte, atingindo mais de 15 m de altura na área, representando paleodunas de um ambiente desértico e, subordinadamente, uma sedimentação flúvio-torrencial e lacustrina. A Formação Botucatu possui uma espessura máxima de 320 m e uma espessura média aproximada de 250 m, resultante de uma deposição em ambiente desértico (SGARBI, 1996). Na região suas exposições situam-se nas serras de Santana, Itaqueri, Cuscuzeiro, São Pedro e morros testemunhos, acima da cota de 800 metros, com espessuras médias de 50 a 70 metros.

- **Formação Serra Geral:** compreende a maior província vulcânica continental conhecida, formada principalmente por basaltos toleíticos e andesitos basálticos. Esses derrames freqüentemente possuem intercalações de camadas de arenitos denominados "intertrapianos", de espessura centi- a decamétrica. Na região, os basaltos da Formação Serra Geral afloram na faixa das cuestas das serras da região, entre os municípios de Analândia e São Pedro, onde se encontra a maior concentração das cavernas areníticas estudadas, por vezes, intercalados com arenitos interderrames. Na Serra de Itaqueri, especificamente, é difícil a caracterização do basalto, já muito alterado e em grande parte erodido, muitas vezes considerado como inexistente, mas que efetivamente provocou uma silicificação diferencial no "Arenito Botucatu" durante o magmatismo. É típico na área de estudo a ocorrência de pequenos seixos, blocos e matacões com vestígios de "acebolamento" (esfoliação esferoidal), indicando alto grau de alteração por intemperismo físico (dilatação térmica). No topo dos derrames é comumente encontrado basaltos com textura amigdaloidal e vesicular. Nesses basaltos encontram-se ainda cristais de quartzo subhédricos em geodos e calcedônia.

Segundo FÚLFARO *et al.* (1982) a evolução geológica da Bacia do Paraná a partir do Permiano pode ser assim sintetizada:

a) Partindo-se do Permiano médio/superior a bacia adquire um caráter intracratônico de sinéclise, claramente definido durante o Permiano médio/superior, mantendo-o até o Triássico inferior;

b) No período juro-cretáceo, no Brasil Meridional, tem-se um amplo soerguimento, gerador de intenso vulcanismo de caráter básico na área da bacia, tendo como trilha (veículo) de extravasamento das lavas as zonas falhadas e mais fracas dos antigos aulacógenos de seu embasamento. A retração da área deste soerguimento crustal controla assim processos de instalação de bacias marginais costeiras (e.g., bacias de Campos e Santos) por subsidência e a reativação e sedimentação (Grupo Bauru) no interior continental. Os limites sucessivos deste movimento de retração da área dômica são controlados pelos alinhamentos NE-SW. A fase rifte das bacias costeiras desta idade provoca levantamentos na margem continental, desenvolvendo sistemas de falhamento escalonado, tanto na direção das bacias marginais como para o interior continental, gerando, segundo os autores, estruturas como as de Piratininga, Agudos, Artêmis, Anhembi, etc.;

c) Contemporaneamente à tectônica descrita tem-se o início da sedimentação do Cretáceo superior na área setentrional da bacia. As zonas dos alinhamentos NW-SE compartimentam a Bacia do Paraná, controlando as áreas máximas de sedimentação até o Terciário, quando tem-se uma nova reativação e compartimentação da bacia; e por fim

d) O rifte do embasamento, principalmente no início da sedimentação, reativação paleozóica e a intensa influência rifte na sua evolução mesozóica permitem classificar a Bacia do Paraná como intracontinental cratônica, tipo 2-A (complexa), segundo a classificação de KLEMME (1980 *apud* FÚLFARO *et al.*, 1982), à semelhança das bacias do oeste siberiano.

Geologia Estrutural

A Bacia do Paraná possui um arcabouço estrutural e evolução que refletem as grandes estruturas do seu embasamento, sendo que a partir destes grandes traços, que compõem linhas de fraqueza, são condicionadas as respostas às atividades tectônicas impostas, tanto na geração e favorecimento de falhamentos, como também na sedimentação.

Regionalmente, segundo SOARES (1974), a Bacia do Paraná possui três compartimentos definidos como homoclinais sub-horizontais com mergulhos tendendo para direções convergentes.

SOARES (1974) classifica em cinco os tipos de estruturas básicas que ocorrem na região: falhas isoladas, sistemas isolados de falhas, *horst* e *graben*, domos e flexuras (periclinais), formas estas freqüentemente associadas. As **falhas isoladas** aparecem com bastante freqüência, mas são de pequena expressão na estruturação regional. Apresentam rejeitos inferiores a 20 metros e encontram-se comumente associadas a diques de diabásio, intrudidos após o falhamento. As **falhas inversas**, depois identificadas dentro da Gruta do Fazendão (RICCOMINI *et al.*, 1996), são geradas por esforços compressivos, com dobras de arrasto, microdobras e plano com inclinação aproximada de 60 graus. As **falhas normais** estão ligadas a esforços tracionais associados ao rifteamento da bacia e delineiam na região o sistema de falhas Rio das Pedras-Piracicaba-Ipeúna. As **estruturas dômicas** encontram-se limitadas por falhamentos, apresentando amplitudes de levantamento superior a 200 metros, com mergulhos podendo atingir cerca de 6 graus. Também são reconhecidos na área grandes **alinhamentos tectônicos**, conhecidos por alinhamento Tietê, Guapiara e Paranapanema. Os **arcos**, assim como os alinhamentos, são reflexos das instabilidades tectônicas do embasamento cristalino, sobre o qual assenta-se a bacia, representando reativação de antigas zonas de fraqueza do Pré-Cambriano ao longo do tempo geológico.

A Bacia do Paraná é marcada por um padrão de feições lineares em forma de "X", dividido em 3 direções principais: NW-SE, NE-SW e E-W, predominando a primeira orientação (ZALÁN *et al.*, 1987), compondo zonas estruturais com maior mobilidade tectônica em comparação à áreas adjacentes, controlando a sedimentação durante a evolução da bacia (HASUI *et al.*, 1989 *apud* ZAINÉ, J.E., 1994). Bastante evidente é a estruturação do Rio Corumbataí NNE-SSW, retomada várias vezes em segmentos curtos de seu curso nas zonas de mudanças do traçado (PENTEADO, 1968). Segundo BJÖRNBERG (1965) a direção do Rio Tietê e do sistema de diques da Bacia do Paraná é N70E-N10E-N50W. FREITAS (1955) afirma que as direções preferenciais na Bacia do Paraná são WSW-ENE (pré-basáltica); NNW-SSE (falhas normais) e NNW-SSE e ENE-WSW (pós-cretácica). Para PENTEADO (1968) os sistemas de falhas NE-SW e NNW-SSE podem ser reativações de antigas falhas.

A geomorfologia da região é controlada fortemente por estas zonas de fraqueza, definidas pelos alinhamentos estruturais, controlando a sua drenagem e as áreas de rebordo das cuestas arenito-basálticas.

Manifestações neotectônicas, com falhamentos eminentemente transcorrentes, foram atribuídas ao Neogeno-Quaternário por HASUI (1990 *apud* ZAINÉ, J.E., 1994) e FACINCANI *et al.* (1994 *apud* ZAINÉ, J.E., 1994).

A área de ocorrência da maioria das cavernas tratadas neste trabalho coincide com o Alinhamento Estrutural Rio Moji-Guaçu (BRANDT NETO *et al.*, 1981). Este alinhamento engloba as intrusões de Jaboticabal, Ipanema, Varnhagem e Salto de Pirapora e demarca a borda nordeste da "Bacia Bauru" e, nas proximidades de seu cruzamento com o Alinhamento Estrutural do Rio Tietê (COIMBRA *et al.*, 1977), este alinhamento é sítio dos altos estruturais de Pitanga, Artêmis, Pau D'Alho e Gibóia.

O Alinhamento do Rio Tietê coincide, na área de ocorrência do embasamento cristalino, com a Zona de Cisalhamento de Itu, corroborando com a idéia de que estes alinhamentos são reativações de caráter rúptil na Bacia do Paraná. A região onde se situam as cavernas de arenito nas cuestas basálticas é afetada por falhas transcorrentes e normais. As falhas de caráter normal foram interpretadas como resposta ao regime distensivo da época da abertura continental (c. 126 Ma) (FACINCANI, 1996; RICCOMINI *et al.*, 1996; HASUI *et al.*, 1995).

São descritas, na Gruta do Fazendão (SP-170) falhas transcorrentes dextrais ao longo de seu desenvolvimento principal (VERÍSSIMO & SPOLADORE, 1994). Nesta caverna ainda se observam estruturas sin-sedimentares de liquefação induzidas por abalos sísmicos, associadas à falhas de empurrão, dobramentos convolutos e falhas transcorrentes conjugadas dextrais e sinistrais, respectivamente de direção NE e NW, relacionadas à um eixo de tensão máxima (σ_1) de orientação E-W horizontal (RICCOMINI *et al.*, 1996).

Espeleogênese

Na região entre Analândia e São Pedro são encontradas cavernas em profundão, sendo poucas mapeadas e cadastradas e menos ainda estudadas sob o ponto de vista espeleológico geral e genético. As cavernas de arenito vêm de longa data sendo estudadas por espeleólogos de todo o mundo, mas ainda é discreta a participação das cavernas brasileiras neste cenário. Na região há alguns trabalhos, fazendo-se menção à Ebehard WERNICK (1976), Guy COLLET (1980, 1982a e b), César U. V. VERÍSSIMO e Ângelo SPOLADORE (1994) e SPOLADORE e outros (1994) e RIBEIRO e outros (1994 e 1997).

As grutas de arenito têm seu início na ação erosiva do escoamento das águas superficiais meteóricas (*run-off*) ao longo das paredes, provocando remoção de grãos das paredes do arenito que originam buracos ou tafonis, evoluindo então para depressões, tocas e até abrigos.

Para haver a evolução desses abrigos para formar grutas há que se observar alguns fatores considerados essenciais por GALAN & LAGARDE (1988 *apud* CORRÊA NETO *et al.*, 1997) e atendidos pelas características regionais: 1. um grande desnível entre o lençol freático e o nível de base local, proporcionado pela cuesta; 2. presença de fraturas profundas, dado pelo intenso sistema de fraturamento; e 3. clima chuvoso, fator este atendido pela distribuição anual de chuva.

Além do escoamento superficial e os fatores já expostos a rocha contém ainda planos de fraqueza (junta ou falha) e descontinuidades sedimentares que geram uma anisotropia no qual, pela infiltração de água, tem-se contínua remoção física e química do quartzo já observados por outros autores (MARTINI, 1987 *apud* CORRÊA NETO *et al.*, 1997; CORRÊA NETO & CORRÊA, 1994; CRUIKSHANK & AYDIN, 1995; WRAY, 1997), formando pequenos condutos ou cavernícolas por erosão interna (*pipping*), um fenômeno observado principalmente na Toca do Pipping no Município de São Pedro (RIBEIRO *et al.*, 1999). O início do *pipping* se dá por um processo de dissolução inicial ao longo do limite entre grãos, denominado de arenização (*arenisation*) (SZCERBAN & URBANI, 1974 e MARTINI, 1979, *apud* VERÍSSIMO & SPOLADORE, 1994), processo esse favorecido pelas descontinuidades. O alto grau de arredondamento e esfericidade dos grãos de quartzo das areias do Grupo São Bento, principalmente a Formação Botucatu, aumenta a superfície de contato do quartzo com a água, acelerando esse processo de dissolução e remoção de grãos.

Com a evolução dos condutos (*pipes*) dá-se intenso processo de coalescência desses canalículos e os dutos próximos unem-se por alargamento de seu diâmetro, tornando-se um canal preferencial para escoamento da água subterrânea, dado que forma uma zona de mais baixa pressão que passa a desenvolver corredores quando acessíveis.

O desenvolvimento da cavidade dá-se também por um alargamento ao longo de descontinuidades da rocha (RICCOMINI *et al.*, 1996). Estas descontinuidades são constituídas principalmente por falhas, juntas e planos de *set* das estratificações plano-paralelas e cruzadas de grande e médio porte e outras estruturas sedimentares, além de heterogeneidades de silicificação da rocha. O encontro de duas descontinuidades pode deixar o arenito mais poroso, facilitando a sua solubilização e corrosão e a remoção de seus grãos.

Com isso pode-se afirmar que as cavernas são controladas, principalmente, pela estruturação tectônica local e regional e subordinadamente pelas estruturas sedimentares. Neste caso tomou-se como exemplo de controle regional a disposição da maioria das cavernas segundo alinhamento da estruturação regional e o padrão de fraturamento da área. Como controle local temos a disposição das falhas rúpteis pós-sedimentares ao longo da Gruta do Fazendão, obedecendo ao padrão de fraturamento de Riedel.

A densidade, orientação e penetratividade do sistema de fraturamento é que determina as dimensões da caverna e o padrão de distribuição de seus condutos, assim como o tipo, orientação e dimensão das estruturas sedimentares presentes. As galerias possuem maior desenvolvimento quando as descontinuidades estruturais (fraturas) são aproximadamente paralelas à direção de mergulho das estruturas sedimentares, como é o caso do principal corredor de entrada e do Salão da Baleia da Gruta do Fazendão, já que atinge um desenvolvimento horizontal aproximado de 200 metros. Também parece haver um mergulho ótimo das estruturas sedimentares para promover a formação de grandes cavidades (CORRÊA NETO & CORRÊA, 1994), com ângulo entre 20° e 40°, como é evidente no Salão do Saco da Gruta do Fazendão.

O abatimento de blocos, comum em cavernas em arenito, originados da queda de material do teto dos salões e galerias é ocasionado pelo intenso fraturamento da rocha, formando depósitos de gravidade, com blocos variando de dimensões centi- a decamétricas. O processo de remoção mecânica de grãos (*pipping*) forma depósitos caracterizados como de aluvião no chão das cavernas, resultado direto da desagregação de grãos das paredes e condutos.

PAKISER (1960 *apud* BJÖRNBERG, 1965) anota que iniciado o deslocamento de blocos em falhas de rejeito direcional, em arranjo paralelo, estes produzirão compressões e distensões locais nas extremidades, e que no caso das cavernas da área de estudo tem fundamental papel como processo responsável pelo abatimento de blocos na região de distensão e pelo *pipping* nas regiões de cisalhamento.

O corredor principal da Gruta do Fazendão está controlado por uma falha transcorrente de caráter dextral, tal como já observado por VERÍSSIMO e SPOLADORE, 1994, sendo parte do Salão da Baleia, também controlada por esta falha e por uma outra mais adiante, definindo um binário completo. Tal como observados nesse trabalho em trabalho de campo, os corredores internos e o “gostoso”, obedecem a fraturas T (tração), sintéticas X e R e antitéticas R' de Riedel. As fraturas T condicionam também a queda dos blocos da caverna, que pode ser observado próximo ao Salão da Baleia e o corredor principal da entrada.

A Gruta do Paredão, situada na frente da Gruta do Fazendão, foi originada pela mesma falha principal da Gruta do Fazendão. Seguindo-se para o outro lado da colina, encontra-se a Toca do Ninho, também controlada pela mesma falha, o que parece ser uma constante na gênese das cavernas da área.

As principais cavernas da área se desenvolvem em 3 sentidos preferenciais, sendo NNE, NW e WNW. Abaixo se segue a lista de algumas cavernas e orientações de seu desenvolvimento longitudinal:

NNE → Gruta do Fazendão, Gruta do Paredão, Abrigo do Roncador, Abrigo da Glória, Abrigo Santo Urbano e Toca do Ninho;

NW → Gruta da Boca do Sapo e Abrigo do Rochedo;

WNW → Toca da Chuva e Abrigo do Bauru.

As cavernas que possuem controle NNE (Fazendão, Paredão Toca do Ninho e Abrigo da Glória) cortam o relevo da cuesta e não obedecem a um sistema de drenagem como as outras, nos levando a acreditar que possuem idade mais recente, corroborando com a idade do tectonismo Cretáceo-Terciário estipulada por PENTEADO (1968), posterior a formação da cuesta. PENTEADO (1976) descreve falhas normais nos ribeirões da Lapa e Cantagalo, no fronte norte da Serra de Itaqueri, seccionando pedimentos rochosos esculpidos na última fase de pedimentação e pediplanação relacionadas a evento tectônico do Pleistoceno médio.

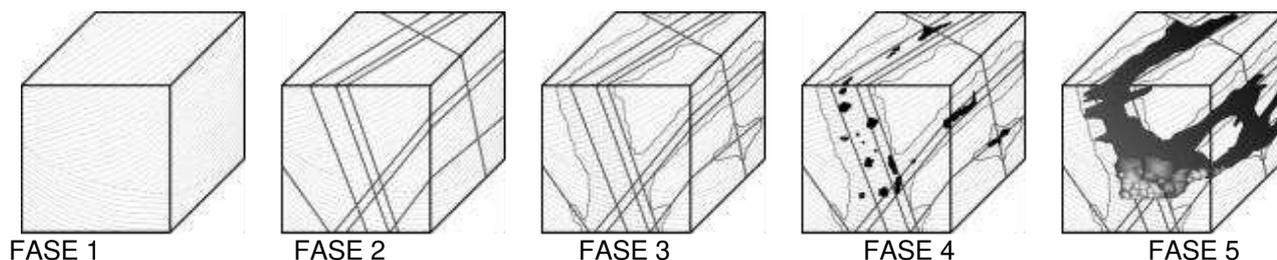
Nas paredes das galerias das cavernas é comum encontrar espeleotemas de calcedônia que se precipitaram a partir da exsudação de soluções capilares saturadas em sílica, tal como descrito por ROMERO & LIMA (1989 *apud* CORRÊA NETO *et al.*, 1997) em cavernas de quartzito.

Diversos autores (MARTINI, 1987 *apud* CORRÊA NETO *et al.*, 1997; CORRÊA NETO & CORRÊA, 1994; WRAY, 1997) relatam processos de dissolução e precipitação de sílica, que pode ser o processo de formação dos espeleotemas de estalactites e “couve-flor” de dimensões centimétricas existentes mais evidentemente na Gruta do Paredão.

Outras formações podem ser observadas nas cavernas da região, tais como *spots* de redução, manchas de descoloração ao longo de fraturas e estratificações, crostas ferruginosas e crostas silicosas na forma de couve-flor, já descritas por WERNICK (1976), além de cúpulas de corrosão (MARTINS, 1985 *apud* VERÍSSIMO & SPOLADORE, 1994) e estruturas de dissolução diferencial tipo “caixa de ovos” (PINHEIROS, 1987 *apud* VERÍSSIMO & SPOLADORE, 1994).

Observa-se na área diversos impactos antrópicos sobre o meio natural próximo às cavernas, entre eles: *alteração da rede hídrica e de sedimentos*, efeitos diretos do desmatamento nas áreas circunvizinhas à caverna e mata ciliar das drenagens, reflorestamento com espécies exóticas (como o eucalipto) no cimo das encostas e uso impróprio do terreno; *problemas de estabilidade/subsidência*, causado pelo uso agropastoril e movimentação rodoviária sobre as cavernas; *empobrecimento e erosão dos solos*, pelo emprego de técnicas agrícolas inadequadas e de monocultura; *poluição e destruição paisagística*, de origem diversa, efeito do visitação/turismo predatório na região; e *alteração do nível freático* (piezométrico), causado por alterações ambientais superficiais.

De forma sucinta podemos ilustrar, de forma esquemática, a gênese dessas cavernas da seguinte forma, em 5 fases:



Fase 1: Deposição do “Arenito (bimodal) Botucatu” e derrame de lavas basálticas (não representadas), procedidos por processos de litificação e silicificação. A figura ilustra as estratificações cruzadas de grande porte e estruturas sedimentares que refletem características de deposição em ambiente desértico.

Fase 2: Estruturação por discontinuidades de caráter tectônico, gerando fraturas (falhas, juntas e fraturas isoladas). Muitas dessas estruturas podem ter origem na reativação de estruturas do embasamento durante processos neotectônicos caracterizados na área. Essas falhas definem três sistemas de fraturas, orientados basicamente a NNE, NW and WNW.

Fase 3: Percolação de fluidos através de fissuras, durante o estágio freático, e dissolução parcial de grãos ao redor dos planos de fratura e estratificação e entre os grãos. O envelope dessas estruturas torna-se friável e incoeso, desenvolvendo uma grande porosidade secundária nas rochas e aumentando ainda mais sua permeabilidade, tornando o material mais suscetível à erosão física.

Fase 4: A evolução então apresenta dois tipos de erosão, já entre as fases vadosa e freática. Desenvolve-se uma erosão laminar a partir de processos de escoamento superficial (não representado) e remoção mecânica de grãos, formando pequenos canais. Com o tempo há um aumento desses canais e desenvolvimento de galerias, salões e corredores.

Fase 5: A fase final ocorre com o abatimento de blocos, segundo a estruturação tectônica da caverna. A exudação de soluções silicosas por fissuras e poros promove a geração de alguns espeleotemas como estalactites centimétricas, além de acumulação de calcedônia, predominantemente no teto e feições de corrosão. Com o descenso do nível piezométrico a caverna torna-se finalmente inativa.

Conclusões

As cavernas de arenito da Província Espeleológica da Serra do Itaqueri apresentam gênese resultante de processos sedimentares (estratificações e bimodalidade do arenito), geomórficos (escoamento superficial), erosivos (*pipping*) e, ressaltado nesse trabalho, condicionantes estruturais (arenização e abatimento de blocos). Esse controle estrutural dá-se por falhas direcionais dextrais e subordinadamente por fraturas de Riedel, do tipo R, R', X e T. As extremidades das falhas direcionais possuem região de distensão gerando abatimento de blocos e região de cisalhamento, responsável pela remoção mecânica de grãos (arenização).

O sistema de falhamento regional e direção dos *sets* das estratificações cruzadas, de direção preferencial a NNE, coincide com a orientação da grande maioria das cavernas encontradas na área. O fraturamento regional obedece as atitudes NNW e NW, coincidente com as orientações da Gruta do Sapo e Abrigo do Rochedo. Este sistema de fraturamento regional e da Gruta do Fazendão não concorda com o sistema de falhas, sendo estas fraturas, provavelmente, de origem mais recente e responsável pela origem das cavernas e seu desenvolvimento por abatimento de blocos.

Os abrigos da região encontram-se ainda ativos, dado o processo de *pipping* observado, assim como as grutas e tocas, dada a presença de infiltrações de água por discontinuidades observadas em seu interior e processos de exsudação.

O eixo de tensão regional (σ_1) é de direção WNW (RIBEIRO, 2001), corroborando com as direções das falhas que condicionam a gênese e evolução das cavernas, segundo o sistema de Riedel, gerando abatimento de blocos nas regiões de tração (T de Riedel) e arenização nas regiões de cisalhamento (R e R' de Riedel).

Referências Bibliográficas

- BJÖRNBERG, A. J. S. 1965. *Sedimentos pós-cretácicos do leste do Estado de São Paulo*. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BRANDT NETO, M.; COIMBRA, A. M.; BARELLI, N.; SPILLER, L. R. 1981. Sedimentos da Serra de Itaqueri: Formação Bauru e cobertura cenozóica. Publicação Especial "A Formação Bauru no Estado de São Paulo e regiões adjacentes" 1. ed. – Coletânea e Trabalhos e Debates. SBG/NSP, n. 7. p. 63-80 (trabalho) e 81-86 (debate). (São Paulo, 10 a 12 de novembro de 1980).
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral (Convênio DNPM-CPRM). 1977. *Projeto Sapucaí*. São Paulo: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Diretoria da Área de Pesquisas, Superintendência Regional de São Paulo. 615 p. (Relatório Final - Geologia, v. 1).
- BRIGHETTI, J. M.; CAETANO-CHANG, M. R. 1992. Feições características de depósitos de interdunas eólicas em sedimentitos da Formação Pirambóia na região de Rio Claro (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOL., 37., 1992, São Paulo. *Bol. Res. Exp....* São Paulo: SBG. v.2 (Sessões Temáticas), p. 510-511.
- COIMBRA, A. M.; BRANDT NETO, M.; PETRI, S. 1977. O Alinhamento Estrutural do Tietê. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA REGIONAL, 1, 1997, São Paulo. *Atas...* São Paulo: SBG. p.145-152.
- COLLET, G. C. 1980. *Sondagens no Abrigo da Glória*. Sociedade Brasileira de Espeleologia-SBE, Depto. de Arqueologia. 26 p. (Relatório).
- COLLET, G. C. 1982a. *Abrigo do Roncador, Analândia-SP*. Sociedade Brasileira de Espeleologia-SBE, Depto. de Arqueologia, Grupo Bagrus de Espeleologia. 23 p. (Relatório).
- COLLET, G. C. 1982b. *Abrigo do Santo Urbano, Corumbataí-SP*. Sociedade Brasileira de Espeleologia-SBE, Depto. de Arqueologia. 9 p. (Relatório).
- CORRÊA NETO, A. V.; ANISIO, L. C. C.; BRANDÃO, C. P.; CINTRA, H. B. 1997. Gruta das Bromélias (MG042), Serra do Ibitipoca, município de Lima Duarte, MG: uma das maiores cavernas em quartzito do mundo. *Espeleo-Tema*, SBE, v. 18, p. 1-12.
- CORRÊA NETO, A. V. C.; BAPTISTA FILHO, J.; ANISIO, L. C. C.; BRANDÃO, C. P. 1994. Um endocarste quartzítico na Serra do Ibitipoca, Sudeste de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 7, 1994. p. 83-86. (Boletim SBG/NMG nº 12) (Sessão Técnica: Geomorfologia).
- CORRÊA NETO, A. V.; CORRÊA, A. A. S. 1994. Uma introdução às cavernas em quartzito. *O Carste*, Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, Belo Horizonte, v. 6, n. 7, p. 43-45. (Atualidade).
- CRUIKSHANK, K. M.; AYDIN, A. 1995. Unweaving the joints in Entrada Sandstone, Arches National Park, Utah, USA. *Journal of Structural Geology*, v. 17, n. 3, p. 409-421.
- FACINCANI, E. M. 1996. *Influência da estrutura e tectônica no desenvolvimento de boçorocas na região de São Pedro (SP): proposta de reabilitação e aspectos jurídico institucionais correlatas*. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- FREITAS, R. O. 1955. Sedimentação, Estratigrafia e Tectônica da Série Bauru (Estado de São Paulo). *Geologia*, FFCL/USP, Boletim194, n. 14, p. 185.
- FÚLFARO, V. J.; SAAD, A. R.; SANTOS, M.V.; VIANA, R.B. 1982. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: GEOLOGIA DA BACIA DO PARANÁ: reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos. São Paulo: Consórcio CESP/IPT, PAULIPETRO. p. 75-115.
- HASUI, Y.; FACINCANI, E. M.; SANTOS, M.; JIMÉNEZ-RUEDA, J.R. 1995. Aspectos estruturais e neotectônicos na formação de boçorocas na região de São Pedro, SP. *Geociências*, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 59-76.
- PENTEADO, M. M. 1968. Implicações tectônicas na gênese das cuevas da bacia de Rio Claro (SP). *Notícia Geomorfológica*, Campinas, v. 8, n. 15, p. 19-41.
- PENTEADO, M. M. 1976. *Geomorfologia do setor centro-ocidental da Depressão Periférica Paulista*. São Paulo: IGEOG/USP. 86 p. (Série Teses e Monografias, 22).

- RIBEIRO, L. F. B. 2001. *Morfotectônica da região centro-leste do Estado de São Paulo e adjacências de Minas Gerais – Paleotensões e Termocronologia por traços de fissão*. Tese (Doutorado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- RIBEIRO, L. F. B.; MONTEIRO, R. C.; ROLDAN, A. A.; REATO, M. P. 1997. Caracterização estrutural e espeleogênese das Caverna de Ipeúna e Itaqueri da Serra - Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 5, 1997, Penedo/Itatiaia. *Atas...* Rio de Janeiro: SBG. p. 35-37.
- RIBEIRO, L. F. B.; MONTEIRO, R. C.; SIQUEIRA, M. C. FERNANDEZ, R. E. 1999. Caverna em Laterita. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 6, 1999, São Pedro. *Boletim de Resumos...* Rio Claro: SBG/NSP e NRJ e IGCE, UNESP/Rio Claro. p. 105.
- RIBEIRO, L. F. B.; VANDEROOST, F. J.; MONTEIRO, R. C. 1994. O controle neotectônico das cavernas da Serra do Itaqueri. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, 1994, Camboriú. *Bol. Resumos Expandidos...* Florianópolis: SBG. v. 1, p. 397-400. (Simpósios).
- RICCOMINI, C. 1995. *Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gonduânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas*. 100 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- RICCOMINI, C.; SALLUN FILHO, W.; FERREIRA, N. B.; COIMBRA, A. M. 1996. Estruturas de liquefação em arenitos eólicos da Formação Botucatu (Ki) na Serra de Itaqueri, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, 1996, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG. v.1 (Sessões Temáticas), p. 151-153.
- ROCHA, G. A. 1996. Mega Reservatório de Água Subterrânea do Cone Sul: bases para uma Política de Desenvolvimento e Gestão. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL "AQÜÍFERO GIGANTE DO MERCOSUL", 1, 1996, Curitiba. UFPR (23 a 24 de Maio). 25 p.
- SGARBI, G. N. C. 1996. General aspects of the São Bento Group, Paraná Basin. A bibliographic research. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 4, 1996, Rio Claro. *Boletim...* Rio Claro: UNESP/SBG. p. 239-245.
- SIMÕES, M. G.; FITTIPALDI, F. C. 1992. *Fósseis da região de Rio Claro*. Rio Claro: Arquivo do Município de Rio Claro. 77 p.
- SOARES, P. C. 1974. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação e gênese. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: SBG. v.4, p. 107-121.
- VERISSIMO, C. U. V.; SPOLADORE, A. 1994. Gruta do Fazendão (SP-170): considerações geológicas e genéticas. *Espeleo-Tema*, SBE, v. 17, p. 7-17.
- WERNICK, E.; PASTORE, E. R. B.; PIRES NETO, A. 1976. Cavernas em arenitos. *Notícia Geomorfológica*, Campinas, v. 13, n. 26, p. 55-67.
- WRAY, R. A. L. 1997. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstone. *Earth Science Reviews*, v. 42, n. 3, p. 137-160.
- ZAINE, J. E. 1994. *Geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP)*. 90 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- ZAINE, M. F. 1996. *Patrimônios Naturais da região de Rio Claro, Ipeúna e Serra dos Padres – análise da compatibilidade com a ocupação atual e considerações sobre sua exploração e conservação*. 83 f. Relatório Final (Pós-Doutorado) - Centro de Análise e Planejamento Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- ZALÁN, P. V.; WOLFFS, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANNOTI, O. A. 1987. Tectonic and sedimentation in the Paraná Basin. In: SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO, 3, 1997, Curitiba. *Anais...* Curitiba: SBG. p. 30-33.