



## MAGNETISMO DE ESPELEOTEMAS DE CAVERNAS EM FORMAÇÕES FERRÍFERAS, SERRA DOS CARAJÁS (PARÁ, BRASIL)

Joyce Calandro<sup>1</sup>, Plínio Jaqueto<sup>1</sup>, Ricardo I. F. Trindade<sup>1</sup>, Ivo Karmann<sup>2</sup>,  
Francisco William da Cruz Jr.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas,  
São Paulo, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, Brasil.

### RESUMO

Neste trabalho foi realizada a caracterização mineralógica de uma amostra retirada da caverna GEM-1846, localizada na Serra dos Carajás (PA), a qual possui as seguintes coordenadas UTM 0589452/9328690. Para a identificação do tipo de mineral magnético presente na amostra, foram utilizados parâmetros de magnetismo ambiental, como suscetibilidade magnética ( $\chi$ ), ARM (Magnetização Remanente Anisterérica) e IRM (Magnetização Remanente Isotermal). Além destes, foi realizada a análise de DRX (Difração de Raio-X), pelo qual verificou-se que a amostra é composta predominantemente por fosfato de ferro. Os resultados para todas as partes da amostra (sub-amostras) analisada são similares. Curvas termomagnéticas de baixa e alta temperatura, assim como os ciclos de histerese, mostram comportamento dominante de material paramagnético, provavelmente a matriz de fosfato de ferro, e uma componente ferromagnética menos importante, que provavelmente corresponde a magnetita.

**Palavras chave:** Magnetismo, Espeleotemas, Carajás, Cavernas, Ferríferas

### ABSTRACT

In this work we characterized the magnetic properties of a sample collected at the cave GEM-1846, located in the Serra dos Carajás (PA) at the following coordinates in UTM: 0589452/9328690. The identification of the magnetic carriers was performed through an environmental magnetism study involving the analysis of magnetic susceptibility ( $\chi$ ), ARM (Anhysteretic Remanent Magnetization) and IRM (Isothermal Remanent Magnetization). In addition to these analyses, we performed XRD (Diffraction X-Ray) measurements, whereby it was found that the sample is composed essentially by iron phosphate. The results for all parts of the sample (sub-sample) are similar. Thermomagnetic curves in low and high temperature, as well as hysteresis loops showed a dominant paramagnetic behavior, which is due to the iron phosphate matrix, and a smaller contribution of a ferromagnetic phase, probably magnetite.

**Keywords:** Magnetism, Speleothem, Carajás

### Introdução

Espeleotemas são depósitos secundários formados pela precipitação química de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) em cavernas. A água, ao infiltrar o solo e as rochas sobre as cavernas torna-se enriquecida em dióxido de carbono oriundo da decomposição da matéria orgânica e da dissolução das rochas carbonáticas. Quando essa solução rica em bicarbonato de cálcio atinge a caverna, ocorre liberação de dióxido de carbono e precipitação de carbonato de cálcio, formando os espeleotemas.



Em função de sua composição, os espeleotemas são amplamente utilizados como marcadores paleoambientais através do estudo dos sistemas isotópicos de oxigênio e de carbono (*e.g.*, Cruz *et al.*, 2005, 2009). Essas mesmas estruturas geológicas também possuem um fraco magnetismo, que pode ser utilizado como marcador (proxy) de variações no aporte detrítico, com significativas implicações nos estudos paleohidrológicos (Lascu e Feinberg, 2011). Estudos de magnetismo ambiental são desenvolvidos de forma rotineira em sedimentos (ver Thompson e Oldfield, 1986; Evans e Heller, 2003). A partir das características magnéticas dos sedimentos é possível inferir a concentração, composição e o tamanho dos grãos magnéticos. Esses parâmetros são fortemente condicionados pelas fontes dos sedimentos e pelas condições de sedimentação. No caso dos espeleotemas, os minerais magnéticos estão associados a material detrítico carregado junto com a solução carbonática ou resultantes de eventos de inundação da caverna (Bosh e White, 2004).

Trabalhos preliminares sugerem que o principal mineral magnético em espeleotemas é a magnetita fina (monodomínio), podendo ocorrer também hematita e goetita (Perkins *et al.*, 1996). Esse material depositado sobre a superfície do espeleotema é imediatamente encapsulado pelas camadas posteriores de carbonato de cálcio. O tempo entre a deposição da partícula e o seu aprisionamento pelas camadas calcíticas ou aragoníticas é suficientemente longo para que elas se alinhem ao campo magnético terrestre, mas suficientemente curto para que o registro do campo magnético nesses níveis seja acurado (Lathan *et al.*, 1986, 1987, 1989; Morinaga *et al.*, 1986). Ao mesmo tempo, as variações na composição, concentração e tamanho dos grãos magnéticos aprisionados dentro dos espeleotemas, podem oferecer informações importantes para estudos paleoclimáticos.

Neste estudo foi utilizada uma amostra retirada da região da Serra dos Carajás (PA), no município de Parauapebas, a qual está à sudeste do estado do Pará, na caverna GEM-1846. A Serra dos Carajás é conhecida como a maior província mineral do planeta, destacando-se como um dos maiores o minério de ferro.

### **Metodologia**

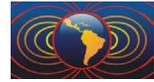
Neste trabalho foram analisados os parâmetros de ARM (magnetização remanente anisterética), IRM (magnetização remanente isothermal), susceptibilidade magnética ( $\chi$ ), além da obtenção das curvas termomagnéticas e ciclos histerese.

As curvas de aquisição de ARM foram obtidas através da aplicação de campos alternados cada vez mais elevados concomitantemente a um campo direto. Tais curvas permitem investigar a coercividade dos minerais magnéticos. Outra ferramenta são as curvas de aquisição de IRM, que através da aplicação de campos diretos cada vez mais altos na amostra, permite identificar o ponto em que ocorre a saturação dos minerais magnéticos e, conseqüentemente, os portadores magnéticos das amostras.

Foram realizadas também curvas termomagnéticas na presença de argônio, as quais podem mostrar transições importantes de suscetibilidade em baixa temperatura e em alta temperatura.

Numa primeira etapa, cortou-se a amostra ao meio e posteriormente fez-se outros cortes de modo que sobrassem as bordas e um “miolo”. Deste, tomou-se uma das bordas, a qual foi amostrada a cada 1 cm separando-a em sub-amostras. Logo após, cada sub-amostra foi quarteada, uma parte foi utilizada na obtenção das curvas termomagnéticas e a outra parte foi adicionada a resina plástica para que fossem realizados os processos de obtenção das curvas de ARM e IRM.

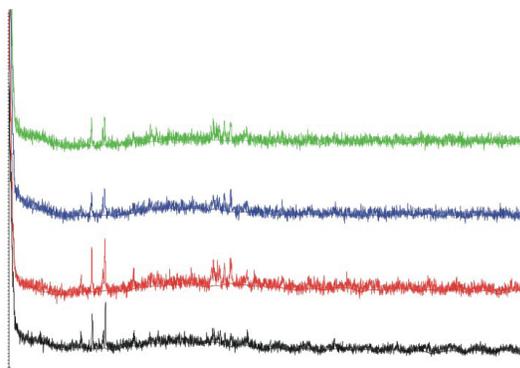
Para as curvas termomagnéticas utilizou-se o susceptômetro Kappabridge KLY-4. Já para a obtenção



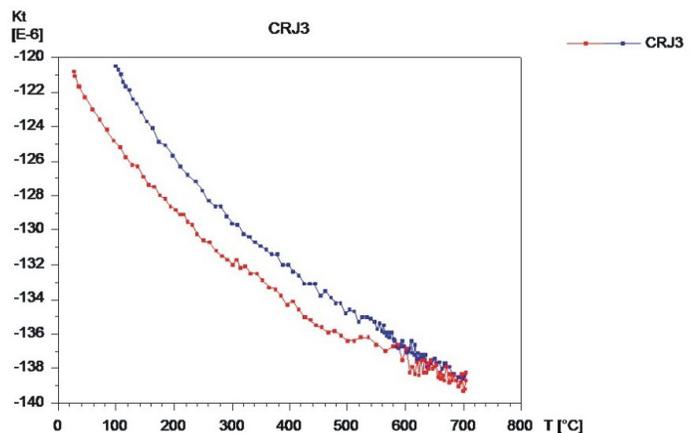
das curvas de aquisição de ARM e IRM, utilizou-se o magnetômetro criogênico SQUID, sendo que para a determinação das curvas de IRM foi utilizado também o pulse magnetizer para a indução de campo na amostra. Após essa etapa, foram obtidas as curvas de aquisição ARM do “miolo” da amostra original da mesma forma como foi feita com a borda, porém com a amostra sólida, sem resina plástica. Além disso, foram obtidos ciclos de histerese e de remanência pelo MicroMag AGM, assim como as curvas de aquisição de IRM desse “miolo”.

## Resultados preliminares e perspectivas

A Figura 1 mostra os resultados de DRX para quatro amostras distribuídas ao longo do comprimento da estalagmite. Os quatro difratogramas são semelhantes e indicam uma composição dominante de fosfato de ferro para a amostra. Em nenhuma das amostras picos referentes a óxidos de ferro foram identificados, sugerindo que, caso estejam presentes, eles representam uma fração muito pequena da composição total das estalagmites.

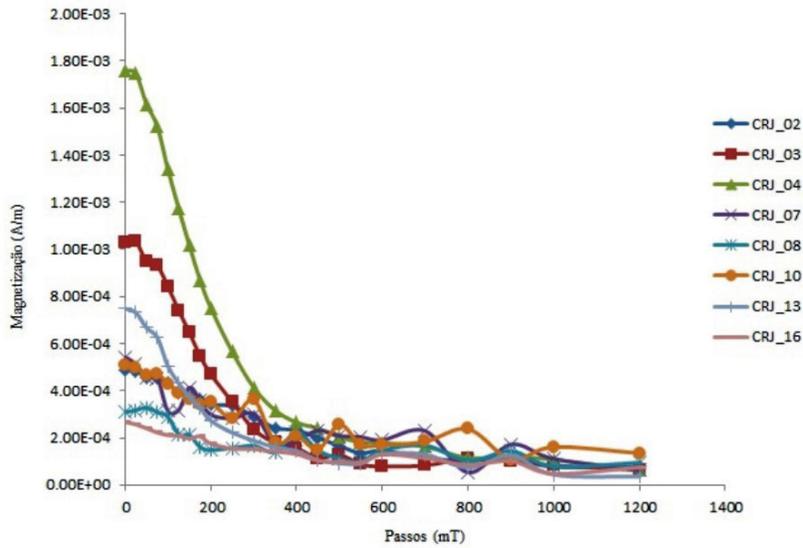


**Figura 1.** Difratogramas das 4 amostras ao longo da estalagmite.



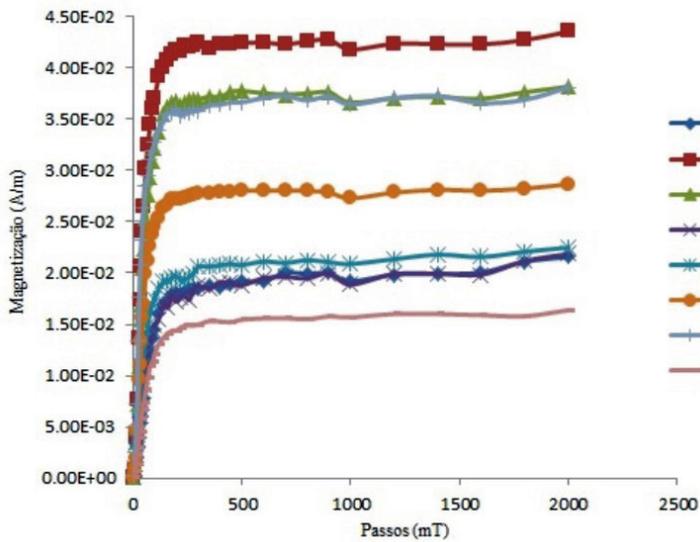
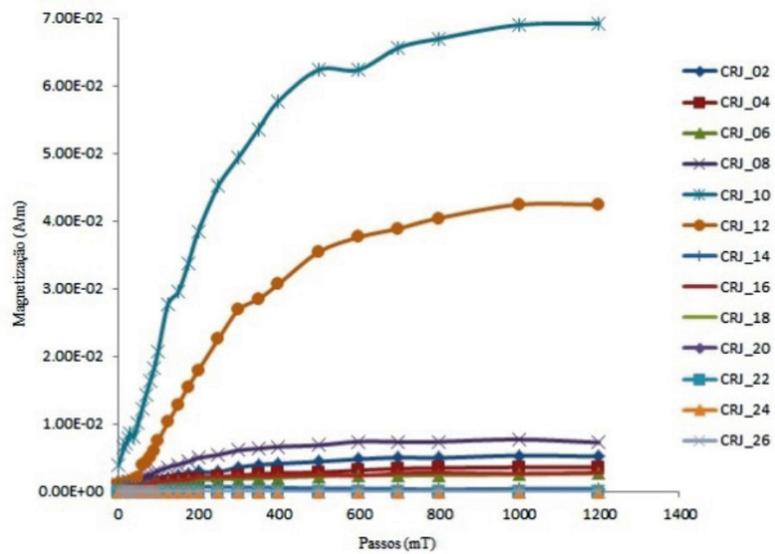
**Figura 2.** Curvas termomagnéticas da sub-amostra3 da borda da amostra original. Esta é representativa das outras amostras.

Análises magnéticas mostram uma predominância da matriz paramagnética, mas permitem também identificar uma fração ferromagnética de baixa coercividade. As curvas termomagnéticas refletem quase que exclusivamente a fração paramagnética. A Figura 2 mostra uma curva termomagnética representativa do conjunto de amostras. Ela apresenta um decaimento parabólico, típico do paramagnetismo, e comportamento reversível, sem indicação de uma componente ferromagnética. Por outro lado, as curvas de remanência (ARM e IRM) mostram um sinal claro e coerente, compatível com uma fase ferromagnética de baixa coercividade. Os espectros de coercividade remanente, obtidos a partir das curvas de desmagnetização de ARM (fig. 3), mostram um pico entre 0-10 mT. O parâmetro ARM é particularmente sensível a grãos de magnetita de fração fina para grãos monodomínio (SD) e pouco sensível para grãos pseudo-monodomínio (PSD) (King *et al.*, 1982). Nota-se, com exceção da sub-amostra CRJ\_04, a perda de mais da metade da magnetização entre 200 e 400 mT (fig. 3), que é compatível com a presença de magnetita com tamanho de grão dominante PSD a MD. Uma análise das curvas de aquisição de ARM nas amostras do “miolo” forneceram resultados equivalentes, com saturação na aquisição de ARM sempre em campos inferiores a 100 mT (fig. 4), também compatível com a presença de magnetita. As curvas de aquisição de IRM (fig. 5) mostram uma rápida saturação, em campos inferiores a 100 mT, em consonância com os resultados de ARM.



**Figura 3.** Curvas de desmagnetização de todas as sub-amostras da borda da amostra original

**Figura 4.** Curvas de aquisição de ARM de todas as amostras do “miolo” da amostra original.



**Figura 5.** Curvas de aquisição de IRM de todas as sub-amostras da borda da amostra original.



A ocorrência de espeleotemas associados a formações ferríferas é rara; no caso de espeleotemas formados a partir de fosfatos de ferro, este é o primeiro relato na literatura. O estudo da mineralogia magnética desses espeleotemas é fundamental para estabelecer sua viabilidade como arquivos das variações do campo magnético. Por outro lado, as informações magnéticas podem auxiliar na compreensão dos processos de formação dessas estruturas. A ocorrência de fosfato de ferro em solos está associada à percolação de fluidos com pH bastante ácido, permitindo a dissolução e reprecipitação do fosfato. No nosso caso, a reprecipitação de fosfato é acompanhada pela formação de pequenas quantidades de óxidos, provavelmente magnetita. Pretende-se complementar esse estudo, com a análise de curvas de histerese e diagramas FORC ao longo da estalagmite, além de análises químicas de elementos maiores e traços ao longo da estalagmite.

### Referências

- Bosch, Rachel F., William B. White., 2004. Lithofacies and transport of clasticsediments in karstic aquifers. *Studies of cave sediments: Physical and Chemical Record of Paleoclimate. Springer, Dordrecht, Netherlands*, 1-12.
- Cruz Jr, F. W., Burns, S. J., Karmann, I., Sharp, W. D., Vuille, M., Cardoso, A. O., Ferrari, J. A., Dias, P. S., Viana Jr., O., 2005. Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116 ky in subtropical Brazil. *Nature*, 434, 63-66.
- Cruz Jr, F. W., Vuille, Burns, S., Wang, X., Chang, H., Werner, M., Karmann, I., Auler, A., Nguyen, H., 2009. Orbitally driven east-west anti phasing of South American precipitation. *Nature Geoscience*, 2, 210-214.
- Evans, M. E., Heller, F., 2003. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics. Academic Press, San Diego, USA.
- Lascu, I., Feinberg, J.M., 2011. Speleothem magnetism. *Quartenay Sci. Rev.* 30, 3306-3320.
- Perkins, A. M., 1996. Observations under electron microscopy of magnetic minerals extracted from espeleothems. *Earth and Planetary Science Letters* 139, 281-289.
- Lathan, A. G., Schwarcz, H. P., Ford, D. C., 1986. The paleomagnetism and UeTh dating of Mexican stalagmite, Das2. *Earth and Planetary Science Letters* 79, 195-207.
- Lathan, A. G., Schwarcz, H. P., Ford, D. C., 1987. Secular variation of the Earth magnetic-field from 18.5 to 15.0 ka BP, as recorded in a Vancouver-Island stalagmite. *Canadian Journal of Earth Science* 24, 1235-1241.
- Lathan, A. G., Ford, D. C., Schwarcz, H. P., Birchall ,T., 1989. Secular variation from Mexican stalagmites, their potencialand problems. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 56, 34-48.
- Morinaga, H., Inokuchi,H., YASKAWA, K.,1989. Paleomagnetism of stalagmites (speleothems) in SW Japan. *Geophysical Journal* 96, 519-528.
- Thopson, R., Oldfield, F., 1986. Environmental Magnetism. Allen and Unwin, London, UK.
- da Silva, M. D. G., Teixeira, J. B. G., Pimentel, M. M., Vasconcelos, P. M., Arielco, A., & Rocha, W. D. J. S. A., 2006. Geologia e Mineralizações de Fe-Cu-Au do Alvo GT 46 (Igarapé Cinzento) Carajás. In: Marini O. J., Queiroz E. T. de, Ramos B. W. (eds.), Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. DNPM/CT-Mineral/FINEP/ADIMP, Brasília, 93-151.



- Leandro Prado Costa, 2007. Caracterização das Sequências Metavulcanossedimentares da Porção Leste da Província Mineral Carajás (PA). Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 6-60.
- Veneziani, P., Santos, A. R. D., & Paradella, W. R., 2008. A evolução tectono-estratigráfica da Província Mineral de Carajás: um modelo com base em dados de sensores remotos orbitais (SAR-C RADARSAT-1, TM LANDSAT-5), aerogeofísica e dados de campo. *Revista Brasileira de Geociências*, 34 (1), 67-78
- Lindenmayer, Z. G., Ronchi, L. H., & Laux, J. H. (1998). Geologia e geoquímica da mineralização de Cu-Au primária da mina de Au do Igarapé Bahia, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 28, 257-268
- Lindenmayer, Z. G., Pimentel, M. M., Althoff, F. J., Teixeira, J. B. G., 2001. Hidrotermalitos: nova denominação para as formações ferríferas do Grupo Salobo-Pojuca, Serra dos Carajás, Pará. Simpósio de Geologia da Amazônia, v. 7, Belém, 2001. Resumos Expandidos. Belém, SBG-Núcleo Norte. (CD-ROM)