

MONITORAMENTO ESPELEOCLIMÁTICO DO TRECHO TURÍSTICO DA CAVERNA SANTANA (PETAR, SP)

speleoclimatic monitoring of the tourist zone of Santana Cave (Petar, São Paulo, Brazil)

Heros Augusto Santos Lobo *
José Alexandre de Jesus Perinotto **
Paulo César Boggiani ***

Resumo

Os estudos do espeleoclima ainda são incipientes em cavernas brasileiras, restrito a estudos voltados ao manejo de cavernas turísticas e como base para investigações paleoclimáticas. O presente estudo reflete o desenvolvimento deste tipo de pesquisa no Brasil, apresentando os resultados de um dos mais completos e detalhados levantamentos climáticos de uma caverna até a sua finalização (2011), com o intuito de definir a dinâmica atmosférica subterrânea em diferentes estações climáticas. A pesquisa foi conduzida na caverna de Santana, uma das mais importantes cavernas turísticas do país. Foram realizados monitoramentos de parâmetros atmosféricos, com ênfase na temperatura e umidade relativa do ar. O tratamento estatístico dos resultados permitiu demonstrar que a atmosfera da caverna Santana se caracteriza como uma armadilha para a captura do ar quente (warm trap), o qual se concentra nas galerias superiores. Com isso, poderão ser estabelecidos parâmetros para o seu manejo e conservação, bem como a utilização destas informações para estudos futuros de cunho climático, paleoclimático e de manejo do turismo.

Palavras-Chave: Microclima, Atmosfera Cavernícola, Monitoramento Climático, Espeleoclima.

Abstract

Speleoclimate studies about Brazilian caves are still incipient and restricted to monitoring and getting some localized measurements focused on the management of tourist caves, as well as to be used as a basis for paleoclimate studies. The present study reflects the development of these studies in Brazil, presenting one of the most complete and detailed climatic monitoring of a cave until it is finished (2011), aiming to define the dynamics of the atmosphere of the cave in different climatic seasons. The research was conducted in the Santana cave, one of the most important tourist caves in Brazil. The field research about the monitoring of atmospheric parameters focused the air temperature and the relative humidity. The data were submitted to a statistical treatment and an analysis which showed that the atmosphere of the Santana cave is characterized as a warm trap, which maintained the air in the upper galleries. Therefore, scientific parameters may be established to its management and conservation, as well as the use of the obtained information in future studies in the field of climate, paleoclimate and tourist management.

Keywords: Microclimate, Cave Atmosphere, Climate Monitoring, Speleoclimate.

Resumen

Los estudios del espeleoclima son incipientes en cavernas brasileñas, restringido a los estudios centrados en la gestión de las cuevas turísticas y la formación de una base para investigaciones paleoclimáticas. Este estudio refleja el desarrollo de este tipo de investigación, presentando los resultados de la investigación del clima más completa y detallada de una cueva en Brasil hasta su finalización (2011), a fin de definir la dinámica atmosférica de una cueva y las estaciones meteorológicas. La encuesta se llevó a cabo en la cueva Santana, una de las cuevas turísticas más importantes del país. Se han llevado a cabo el seguimiento de los parámetros atmosféricos, con énfasis en la temperatura y la humedad relativa, cuyos datos fueron tratados estadísticamente. Los resultados mostraron que la atmósfera de la cueva Santana se caracteriza por ser una trampa para atrapar el aire caliente (warm trap), que se ha mantenido en las galerías superiores. Por lo tanto, los parámetros pueden ser establecidos para su manejo y conservación, así como el uso de esta información para futuros estudios de huella climática, paleoclimática y gestión del turismo.

Palabras-Clave: Microclima, Atmósfera cavernícola, Vigilancia del Clima, Espeleoclima.

(*) Prof. Dr. do Departamento de Geografia, Turismo e Humanidades da Universidade Federal de São Carlos - Rodovia João Leme dos Santos (SP 264), Km 110, CEP: 18052780, Sorocaba (SP), Brasil. Tel: (+ 55 15) 33296131 - heroslobo@ufscar.br

(**) Prof. Dr. do Departamento de Geologia Aplicada da Universidade Estadual Paulista/Rio Claro - Avenida 24-A, 1515, CEP: 13506-900, Rio Claro (SP), Brasil. Tel: (+55 19) 35269299 - perinoto@rc.unesp.br

(***) Prof. Dr. do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - Rua do Lago, 562, CEP: 05508-900, São Paulo (SP), Brasil. Tel: (+55 11) 30914202 - boggiani@usp.br

INTRODUÇÃO

Os estudos de climas subterrâneos no Brasil são ainda incipientes, apesar do amplo número de cavernas existentes, muitas destas com pleno desenvolvimento de atividades turísticas. Aos levantamentos iniciais, feitos em algumas cavernas com instrumentação simples, como termômetros de bulbo e leitura direta e registro manual, nos anos oitenta do século passado, a atual fase desta linha de pesquisa caracteriza-se pelo uso de equipamentos eletrônicos com armazenadores de dados, com uso dos dados para manejo turístico de cavernas (e.g. BOGGIANI et al. 2007; LOBO; ZAGO, 2010; LOBO et al., 2009a) e como base para estudos paleoclimáticos com uso de espeleotemas (CRUZ JR., et al. 2005).

Partindo da importância de se conhecer a dinâmica climática subterrânea de uma caverna para fins de melhor aproveitamento turístico, o presente estudo foi desenvolvido no trecho turístico da caverna Santana e suas adjacências imediatas – tanto dentro quanto fora da cavidade. No presente artigo são apresentados os dados do monitoramento de temperatura (ar, água e superfície rochosa) e umidade relativa do ar, embora também tenham sido realizados registros mais pontuais da concentração de CO₂ e da pressão atmosférica, que não foram considerados neste trabalho. A análise do monitoramento possibilitou definir sua dinâmica interna de circulação atmosférica e variações sazonais. Para tanto, foram estabelecidos protocolos de monitoramento atmosférico e de análises estatísticas e gráficas, com base nos trabalhos de Pulido-Bosch et al. (1997), Hoyos et al. (1998), Cigna (2002) e Fernández-Cortés et al. (2006).

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

A caverna Santana localiza-se em trecho de privilegiada cobertura vegetal da Floresta Atlântica (fig. 1a), no vale do rio Betari (fig. 1b), no interior do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), município de Iporanga, SP. A caverna é formada por uma extensa rede de condutos subterrâneos, correspondendo à ressurgência do rio Roncador (fig. 1c), principal curso d'água do sistema cárstico Pérolas-Santana. Os sumidouros deste sistema se localizam em cotas que variam entre 550-750 m de altitude, enquanto a sua ressurgência está a aproximadamente 250 m de altitude, junto ao nível de base local, o rio Betari. Com 8.540 m já mapeados (SBE, 2014), em sua maior parte, é composta por canyons subterrâneos de entalhamento vadoso, embora salões formados por abatimento e dutos de sua fase de iniciação freática também possam ser observados. As galerias superiores possuem grande quantidade e variedade de espeleotemas (Fig. 1d, e, f).

As variações térmicas predominantes na região ocorrem em função da altitude e, secundariamente, da latitude. A circulação atmosférica regional possui um ritmo tipicamente irregular, conforme os regimes pluviais, em uma área de influência oceânica secundária. O intervalo de tempo compreendido entre dezembro e fevereiro é, historicamente, mais chuvoso (33% do total das chuvas anuais), enquanto que o período entre junho e agosto é o mais seco (18% do total). A precipitação média anual é de 1.500 mm, enquanto a temperatura média anual varia entre 19 °C e 21 °C (GUTJAHR; TARIFA, 1993). A precipitação elevada se justifica pela alternância de atuação de diversos sistemas atmosféricos, com destaque para o Anticiclone Polar Atlântico, o Sistema Tropical Continental, as Frentes Polares e o Anticiclone Tropical Atlântico (GUTJAHR; TARIFA, 1995).

A umidade relativa do ar (UR) é influenciada pela floresta atlântica, ficando próxima dos índices de saturação (100%) durante o ano todo, com flutuações diárias geradas pela insolação. Nestes casos, a UR chega a valores próximos a 60%, retornando para a condição de saturação no fim do dia (CRUZ JÚNIOR et al., 2005). Além da floresta, a compartimentação geomorfológica local também influencia na temperatura e umidade relativa do ar. A região da caverna de Santana é composta por uma sequência de fundos de vales, formados por poligonais fechadas, que conservam bolsões de ar em seu interior, caracterizando típicos microclimas.



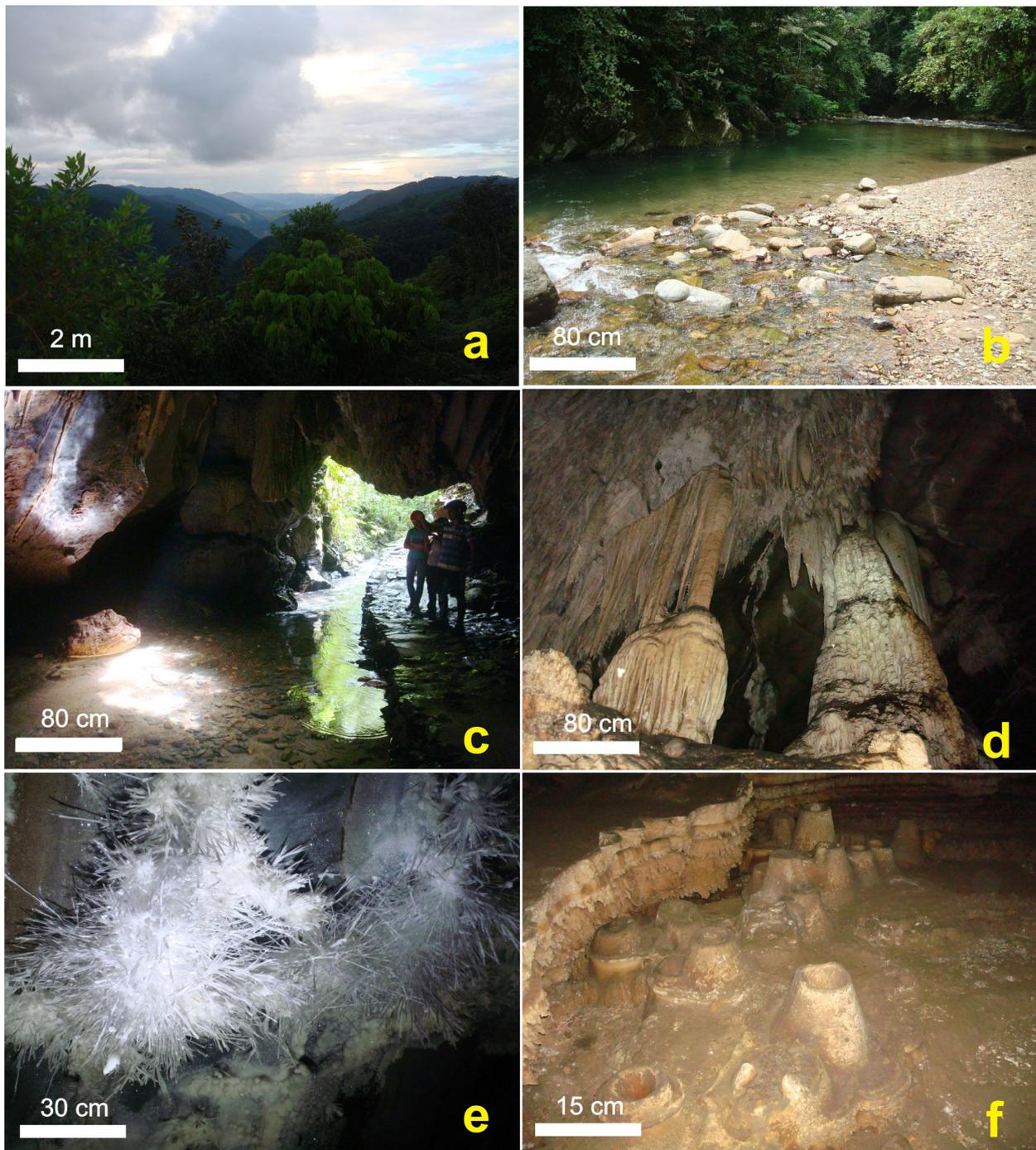


Figura 1 - a) vista geral de um trecho do PETAR, Sudoeste do estado de SP, coberto pela exuberante Floresta Atlântica; b) rio Betari, nível de base na região da caverna Santana; (c) ressurgência do rio Roncador, que dá acesso para a caverna Santana, com grupo de turistas iniciando a visita; (d) conjuntos de espeleotemas no trecho turístico da caverna Santana; (e) espeleotemas aciculares denominados de flores de aragonita, no salão das Flores; e f) travertinos sem água no interior, com estalagmites com o topo côncavo, denominadas de vulcões, em salão de mesmo nome.

Para a região da caverna Santana, Viana Júnior (2002) conduziu um primeiro estudo de monitoramento espeleoclimático. A média anual da temperatura externa nas proximidades da caverna foi de 18 °C, com mínima de -0,2 °C e máxima de 28,3 °C. A UR variou entre 62,4% e 100%. O monitoramento das chuvas apontou índices elevados de pluviosidade nos meses de fevereiro (226,48 mm), novembro (184,1 mm) e dezembro (217,9 mm) de 2000, bem como janeiro de 2001 (208,8 mm). O período mais seco foi registrado nos meses de abril e maio de 2000, respectivamente, com



3,2 mm e 5,7 mm no mês. Neste mesmo trabalho, uma caracterização do espeleoclima por meio de monitoramento anual pode ser encontrada, embora feita em apenas alguns pontos da caverna. A temperatura máxima identificada no interior da caverna foi de 28,3 °C, enquanto a mínima foi de -0,2 °C. Para a umidade relativa do ar, o autor obteve mínima de 62,4% e máxima de 100%.

Além disso, cabe mencionar que outros trabalhos foram feitos sobre o espeleoclima da caverna Santana. Na pesquisa de Barbieri (1993), a precisão do sensor utilizado prejudicou os resultados. Em outro estudo, Scaleante (2003) fez monitoramentos pontuais, de forma a verificar os impactos do uso de carbureteiras da visita turística no espeleoclima. Em sua maioria, os monitoramentos foram executados em intervalos de aferição e registro de dez minutos, durante o período de uma hora. Esta amostragem pontual impediu que conclusões sobre os padrões do espeleoclima fossem subtraídas dos dados, embora os valores obtidos por estes autores sejam condizentes com as médias do clima regional descrito em Gutjahr; Tarifa (1993) e com o monitoramento de Viana Júnior (2002).

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta e registro de dados

Para a coleta e registro de dados, foram utilizados instrumentos da marca Testo, séries 175-H1 e 177-H1. A acurácia dos instrumentos para os dados coletados variou entre 0,1 °C (no caso de sensores externos) e 0,2 °C (sensores internos) para a temperatura e 0,5% (sensores externos) e 3% (sensores internos) para a umidade relativa do ar. Nove instrumentos de monitoramento foram distribuídos na caverna Santana, com maior ênfase para as áreas de visitação (Figura 2).

O monitoramento foi iniciado às 0h 00min do dia 1º de abril de 2009 e encerrado em setembro de 2010, com um intervalo na coleta, para manutenção dos instrumentos, entre abril e junho deste mesmo ano. Foi estipulado um intervalo de aferição e coleta de 30min, totalizando 48 aferições diárias para cada variável por ponto de coleta.

Análise dos dados

Após a organização dos dados coletados em planilhas, foram obtidas medidas de tendência central e de variabilidade para cada série de dados por meio da estatística descritiva. Este procedimento permitiu uma primeira compreensão do sistema atmosférico estudado, bem como a obtenção das simplificações necessárias para as análises estatísticas subsequentes.

A análise do espeleoclima foi realizada também por meio de procedimentos estatísticos para séries temporais. Este tipo de análise é bastante usual em trabalhos de espeleoclimatologia (e.g. CALAFORRA et al., 2003; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006). Nesse sentido, para verificar as interferências das séries de dados entre si, foi utilizada a correlação, por meio do coeficiente r de Pearson (Equação 1), que indica o grau de associação linear entre variáveis distintas (GERARDI; SILVA, 1981).

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (1)$$

Onde xi e yi representam os respectivos desvios de x e y (xi - x) e (yi - y). O resultado para r pode variar entre +1 e -1, dado que r = +1 indica uma perfeita associação positiva; r = -1, uma perfeita associação negativa; r = 0, ausência de correlação (GERARDI; SILVA, 1981).

A análise de agrupamentos foi utilizada na discussão sobre zoneamento espeleoclimático, para distinguir zonas no interior da caverna e sua relação com o ambiente externo. A análise partiu de trabalhos já publicados por Stoeva e Stoev (2005) e Lobo et al. (2009b), sobre zonas térmicas em cavernas. Conforme Gerardi e Silva (1981) e Landim (2003), a análise de agrupamentos tem

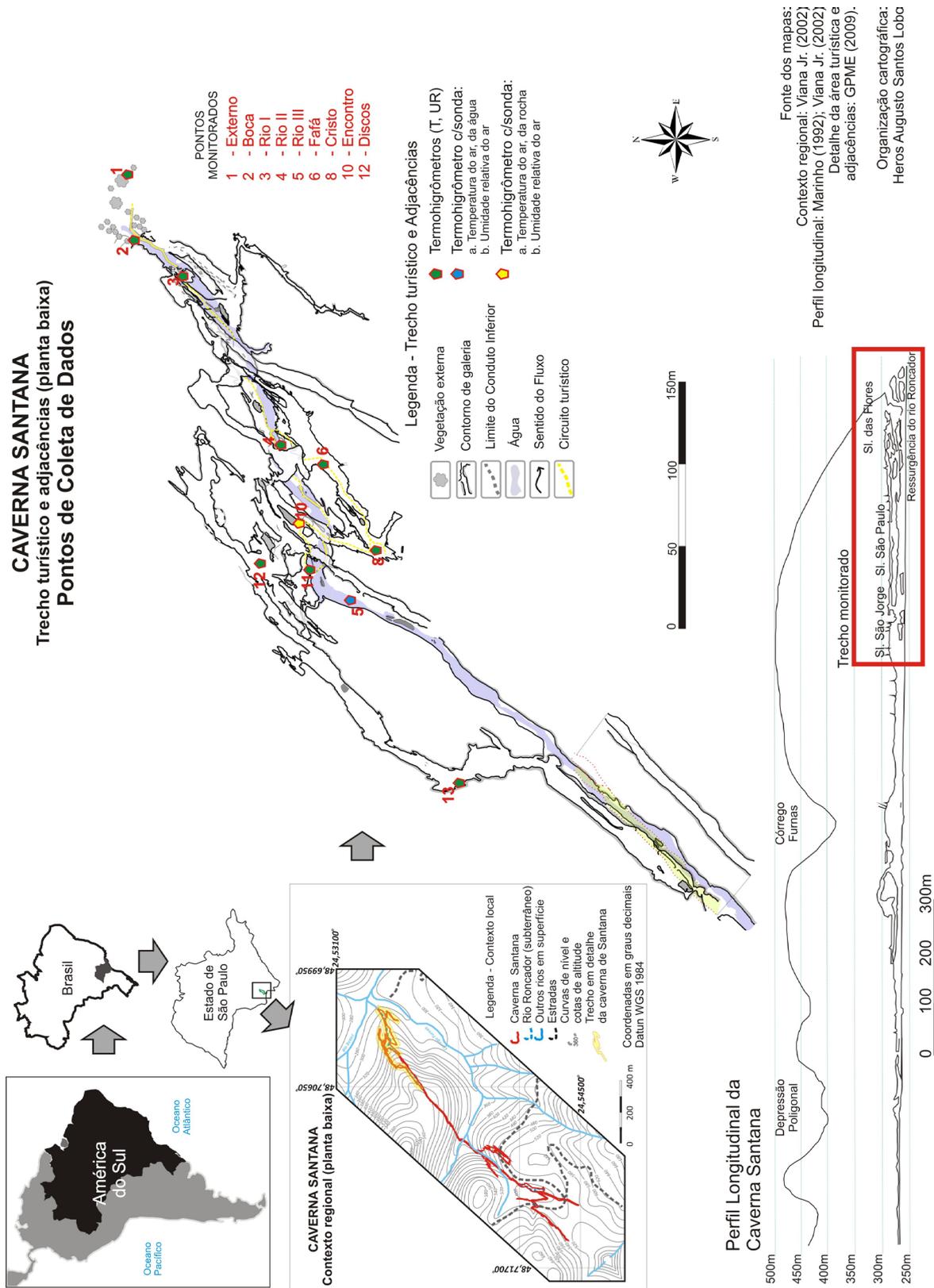


Figura 2 - Localização da caverna Santana e detalhe das galerias com visitação turística e adjacências imediatas



como objetivo maximizar as semelhanças entre os dados, criando classes distintas, bem como diferenciar estas classes entre si. Foi utilizada a técnica de agrupamentos hierárquicos, que se baseia na menor distância euclidiana entre dois pontos de uma matriz de similaridades, e no agrupamento por variância mínima, ou método Ward. Esta foi preferida pelo fato de que seu enfoque é sobre a variabilidade dos dados, de modo que os agrupamentos sejam efetuados quando se determina que em pares de casos analisados em conjunto há um menor acréscimo da variabilidade (LANDIM, 2003).

Por fim, foram feitas análises considerando a função temporal de autocorrelação. O seu produto, o correlograma, é a representação gráfica do efeito de memória do sistema analisado. Se um determinado evento possui uma influência temporal de longo prazo, a inclinação da função de autocorrelação decresce lentamente (LAROCQUE et al., 1998). O modelo da autocorrelação é dado pelas equações 2 e 3.

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (2)$$

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (3)$$

Onde k é o intervalo de tempo ($k = 0$ para m), n é o comprimento da série temporal, x é um único registro, \bar{x} é a média dos registros e m é o ponto de corte. O ponto de corte determina o intervalo em que a análise pode ser realizada e é usualmente selecionado para circunscrever um comportamento dado, como os efeitos anuais ou de longo termo (LAROCQUE et al., 1998). No caso estudado, as séries obtidas são de curto termo (cf. MANGIN, 1984), inferiores a um ano. Nestes casos, o efeito memória é identificado quando o resultado da autocorrelação atinge o índice de 0,2 (MANGIN, 1984), valor este também utilizado por Calaforra et al. (2003).

RESULTADOS

A exposição dos resultados obtidos se inicia com as séries originais de temperatura (T) da caverna Santana (fig. 3). No primeiro período monitorado (2009-2010), a média anual da temperatura do ar no ambiente externo foi de 19,99 °C. Os extremos registrados foram entre 32,9 °C (máxima em fev./2010, na estação Externa) e 6,1 °C (mínima em jun./2009, na estação Boca). Se considerado o regime pluviométrico, a máxima no período mais chuvoso foi de 32,9 °C e a mínima de 13,8 °C (set./2009). No período menos chuvoso durante o monitoramento, a máxima registrada foi de 29,4 °C (mar./2010) e a mínima foi 6,1 °C. A maior disparidade entre estações foi notada na média, sendo de 21,35 °C no período mais chuvoso e de 18,06 °C no período menos chuvoso. A média da UR no período 2009-2010 foi de 98,9%, com máxima de 99,9% e mínima de 60,2%.

No ambiente cavernícola, tomando por base a estação Rio III – que não se localizava na área de visitação –, a temperatura mínima registrada foi de 17,3 °C, e a máxima foi de 19,3 °C (com exceção de um valor an malo de origem desconhecida, descartado para fins de caracterização geral). A média anual foi de 18,28 °C. As diferenç as nas m dias entre períodos mais e menos chuvoso foram inferiores a 0,5 °C. A umidade relativa do ar no interior da caverna (da estação Rio II em diante) foi constante em 99,9% em todo o período monitorado.

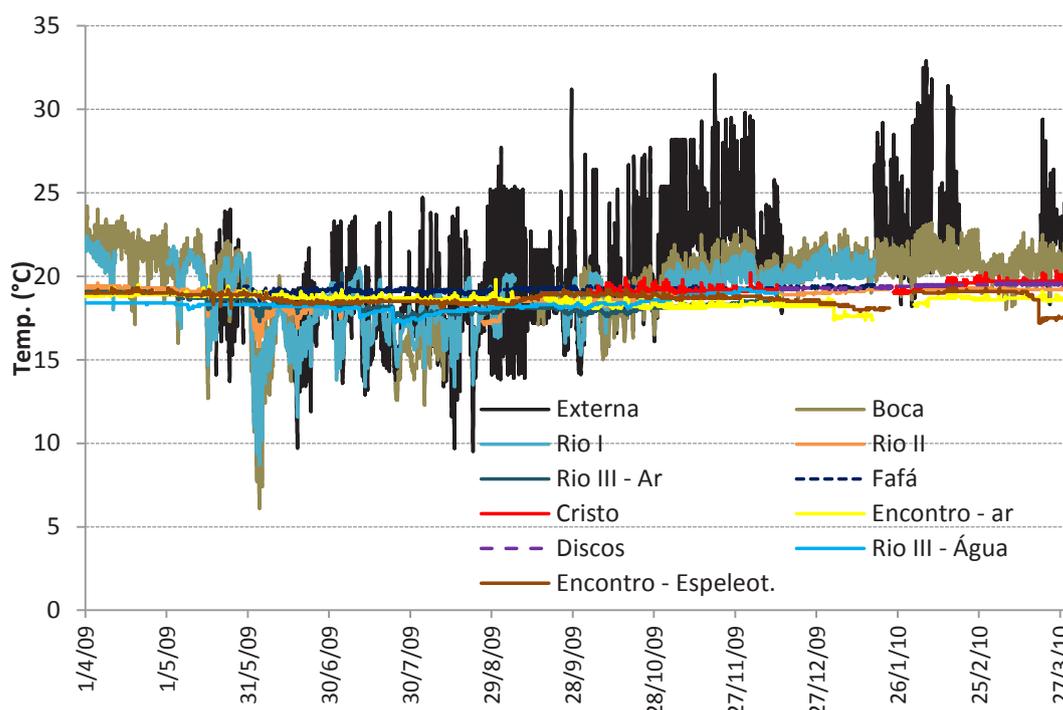


Figura 3 - Séries originais de temperatura anual do monitoramento espeleoclimático da caverna Santana (2009-2010)

Os dados apresentados na fig. 3 permitem uma comparação entre a temperatura externa e algumas das estações internas da caverna. As respostas das estações na galeria do rio são evidentes em relação aos sinais de entrada do microclima externo. As variações diurnas são perceptíveis na maioria das estações, mas ocorrem em proporções menores à medida que se avança ao interior da caverna. O gradiente térmico horizontal gerado por esta dinâmica possui respostas mais evidentes nos extremos de temperaturas mínimas.

Para as galerias superiores, as respostas aos estímulos do microclima externo tornam-se menos evidentes, à exceção da estação Fafá, situada na galeria do rio Verde. Nas estações Cristo e Encontro, aparecem picos de temperatura sem correlação aparente com as demais estações da zona interna ou mesmo com o sinal de entrada externo. Estes foram relacionados com a presença de grupos de visitantes, de tamanhos distintos, atingindo uma variação máxima de 1,3 °C e dissipação em questão de horas.

Em seguida, foram realizados testes de correlação entre as séries de T, por meio do coeficiente r de Pearson. Pelos resultados obtidos, as influências do microclima externo refletem em maior grau nas estações Boca (0,783), Rio I (0,756), Fafá (0,649), Rio II (0,605) e Rio III água (0,601). A estação Encontro não apresentou correlação com o meio externo (-0,393) e nem com a maioria das demais estações. No caso da estação Encontro, suas ligações mais fortes são com as estações Cristo (0,866) e Discos (0,723). A estação Cristo apresenta maior correlação com as estações Encontro, Discos (0,765) e Rio II (0,633). As relações de correlação por meio do coeficiente r de Pearson são coerentes com a perspectiva de divisão da caverna em zonas atmosféricas, obtidas pela análise de agrupamentos hierárquicos (AHC) (fig. 4a).



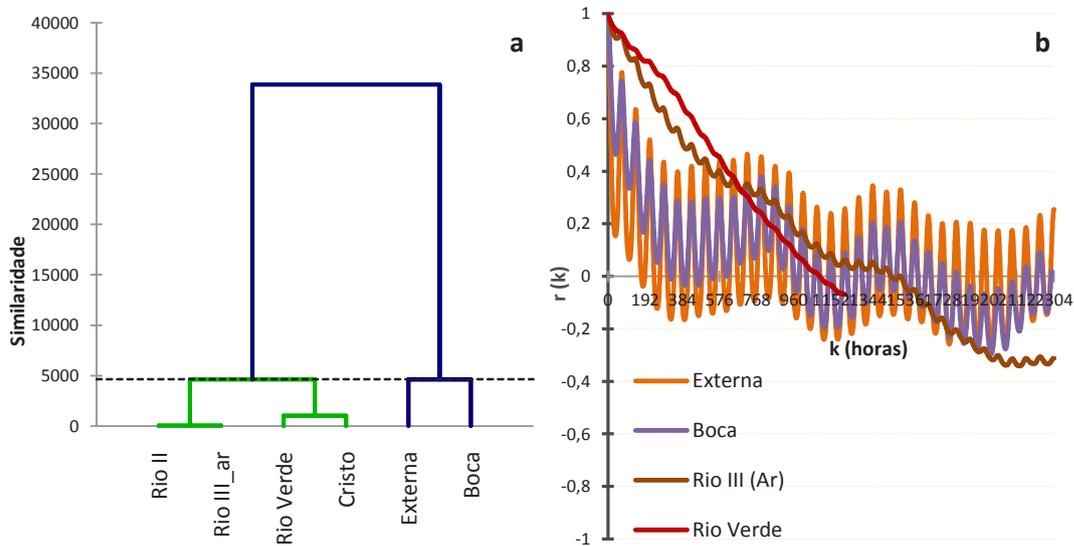


Figura 4 - a) dendrograma de similaridades entre as séries trimestrais de temperatura do ar; b) gráfico comparativo dos correlogramas de temperatura do ar de pontos nas três zonas térmicas obtidas no dendrograma da AHC

A análise de agrupamentos (fig. 4a) levou à obtenção de quatro principais grupos de estações de monitoramento da T. Os mais diferenciados foram os grupos da estação Externa e o da estação Boca. O primeiro retrata o microclima externo, enquanto o segundo é o principal meio de contato entre o microclima e o espeleoclima, uma área transicional típica. À medida que se adentra na caverna, os demais grupos se destacam entre as estações da galeria do rio (Rio II e Rio III ar) e da galeria superior (Rio Verde e Cristo).

Outro aspecto relevante na obtenção de zonas baseadas nos padrões de variabilidade da T é a diferença nos padrões de autocorrelação (fig. 4b). O correlograma da estação Externa é o que apresenta o decaimento mais rápido, sendo seguido pelos correlogramas das estações Boca, Rio Verde (Fafá) e Rio III Ar. Os correlogramas das estações Externa e Boca são bastante semelhantes entre si, o que as aproxima até mesmo nas análises de agrupamentos da fig. 4a.

Para demonstrar a variabilidade da UR, foram utilizados dados de uma fase de detalhe do monitoramento, entre julho e setembro de 2010, com intervalo de registro de dados de 20min. Isto porque a fase anual apresentou diversos problemas para a caracterização da UR, com condensações constantes nos sensores, muito provavelmente em função das chuvas constantes no período do monitoramento, que tornaram o ar visivelmente com maior saturação hídrica.

Para a presente análise, foram considerados prioritariamente os resultados das aferições nas estações Externa, Boca e Rio II (fig. 5), dado que nas demais galerias, os registros realizados foram constantes em 99,9%.

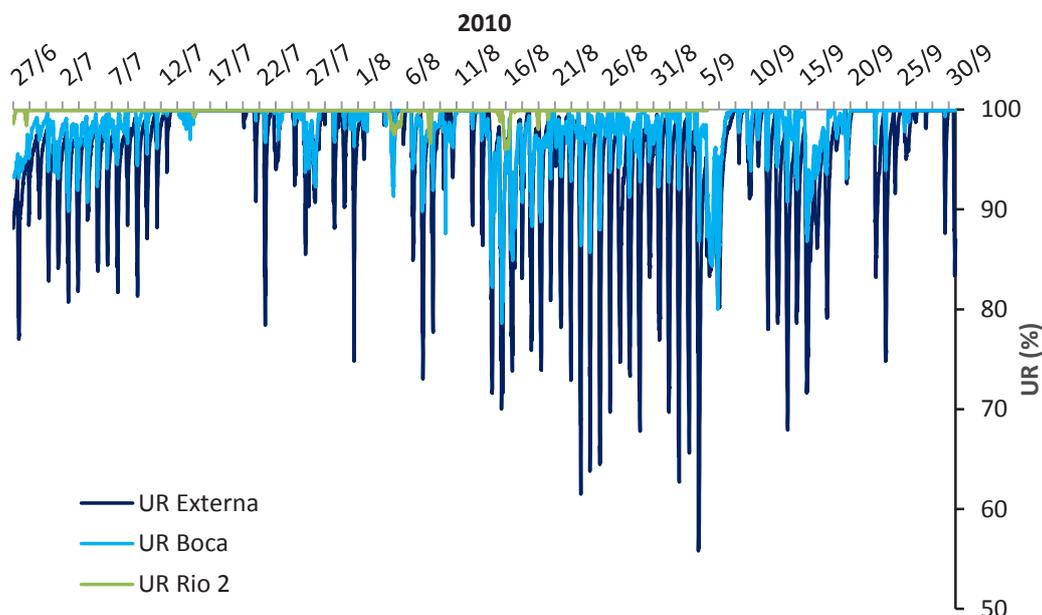


Figura 5 - Séries originais de umidade relativa do ar coletadas nas estações Externa, Boca e Rio II (Julho-Setembro/2010)

As variações da UR possuem aparente relação com a variação no meio externo em alguns momentos do monitoramento, sobretudo na estação Boca. À medida que se avança ao interior da caverna, as variações se atenuam, em função da saturação hídrica da atmosfera da maior parte da caverna. Não foram registradas variações da UR para além da estação Rio II, o que foi também corroborado pelos coeficientes de correlação. Estes confirmaram a correlação direta entre as estações Externa e Boca (0,762). Por outro lado, não foi apontada elevada correlação entre a estação Externa e Rio II (-0,028). Este padrão demonstra um limite entre as influências do meio externo na saturação hídrica do meio interno, o qual não atinge de forma sistemática a estação Rio II. Tais resultados se reforçam com a análise de agrupamentos (AHC) (fig. 6a). O resultado demonstrou que a estação Rio II pertence ao grupo de estações cujo padrão mais evidente é a estabilidade hídrica da atmosfera cavernícola, sendo a única estação deste grupo que apresentou valores aferidos abaixo de 99,9%.

Desta forma, percebe-se a existência de três zonas hídricas na caverna Santana: a Externa, a da estação Boca e, por fim, a zona tipicamente interna, cuja característica fundamental é a saturação. A divisão da área interna da caverna em mais de uma zona, assim como na temperatura, não é tão evidente, em função da saturação hídrica. Desta forma, as zonas hídricas obtidas a partir dos agrupamentos podem ser representadas pelas três estações analisadas, evidenciando mais uma vez suas diferenças nos padrões de resposta da função de autocorrelação (fig. 6b).

Os correlogramas das três séries ora consideradas como representativas de suas respectivas zonas hídricas apresentam semelhanças e diferenças a serem destacadas. Embora possam ser classificados como pertencentes a distintas zonas hídricas, os correlogramas das estações Externa e Boca apresentam padrões semelhantes de variabilidade, se distinguindo principalmente pelos coeficientes de autocorrelação atingidos. Entretanto, o correlograma da estação Rio II apresenta padrão totalmente diferenciado de variabilidade em relação às demais estações, reforçando a interpretação de se tratar de outra zona hídrica da caverna – embora esteja muito próxima do meio externo.



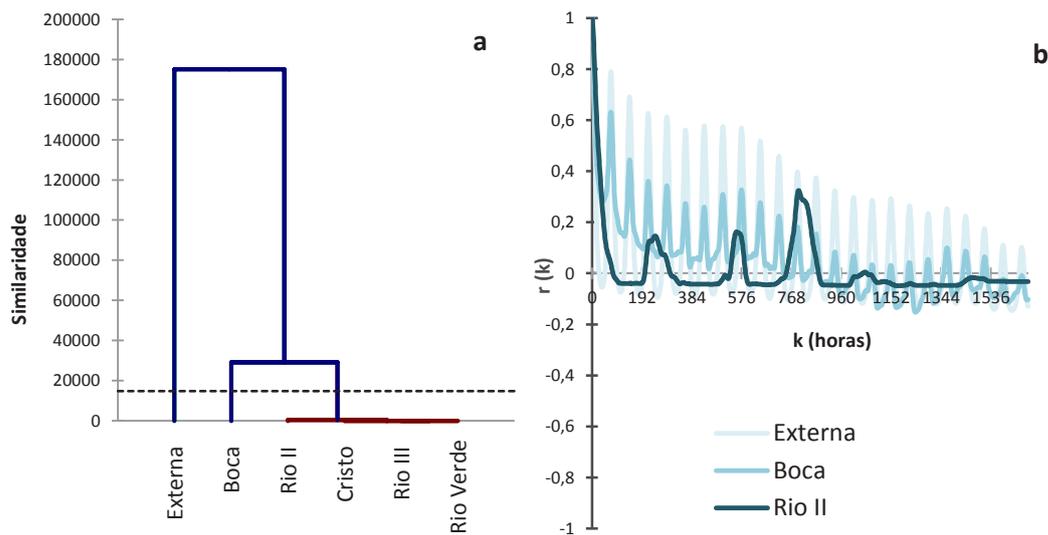


Figura 6 - a) dendrograma de similaridades entre as séries trimestrais de umidade relativa do ar; b) gráfico comparativo dos correlogramas de umidade relativa do ar das estações Externa, Boca e Rio II

DISCUSSÃO DOS DADOS E ZONEAMENTO ESPELEOCLIMÁTICO

A atmosfera das cavernas com grande restrição espacial nos acessos à rede subterrânea de condutos, como é o caso da caverna Santana, é constituída de espeleoclima parcialmente isolado em relação ao meio externo que a circunda. De igual forma, torna-se importante lembrar que o microclima externo possui particularidades que devem ser consideradas para efeitos de caracterização e de comparação. O confinamento da atmosfera adjacente à caverna em compartimentos de fundo de vale – típicos da paisagem estudada – e a espessa cobertura vegetal da Mata Atlântica, são fatores de ordem fisiográfica e fitofisionômica fundamentais para a caracterização de um microclima, conforme Geiger (1951) e Bailey (2005). A localização do Vale do Ribeira em região de clima subtropical, de ritmo irregular em área de influência oceânica secundária (GUTJAHR; TARIFA, 1993) também é importante para esta delimitação inicial. Outros aspectos certamente contribuem para os resultados obtidos, como a presença de um curso d'água ativo – o rio Roncador –, que acumula efeito de memória das variações de temperatura do ambiente externo; ou mesmo a espessura da camada rochosa que abriga a caverna, atuando como atenuador das variações térmicas (PFLITSCH; PIASECKI, 2003).

No geral, os resultados obtidos diferem sensivelmente do estudo conduzido por Viana Jr. (2002), o monitoramento anual mais amplo até então para a caverna Santana. A média da temperatura externa foi de 19,99 °C no estudo atual e de 18 °C no estudo anterior. A máxima registrada foi 4,7 °C maior que no estudo anterior (32,9 °C, contra 28,3 °C) e a mínima atingiu uma diferença surpreendente: de -0,2 °C no estudo de Viana Jr. (2002) e de 6,1 °C no presente estudo – totalizando 6,3 °C de diferença. Embora as diferenças sejam notáveis, devem ser considerados no mínimo dois fatores na análise dos dados: a evolução tecnológica da instrumentação utilizada e as variações infra-anuais, em ciclos mais amplos do que os períodos monitorados. Sobre a UR, os valores máximos e mínimos foram mais próximos entre si: mínima de 62,4% em Viana Jr. (2002) e 60,2% na presente pesquisa e máxima de 100% em Viana Jr. (2002) e 99,9% no levantamento deste artigo.

Outro aspecto analisado foi a relação da T do ar com a água e as rochas. O estado de equilíbrio termodinâmico em cavernas se explica em função da existência de fatores reguladores em longo prazo, como a T da rocha e da água, quando esta se faz presente. Estes atuam como tamponadores térmicos, atenuando as alterações diurnas. Nos trabalhos de Cigna (2004) e Stoeva e Stoev (2005) é ressaltado que a temperatura do ar no interior de uma caverna se encontra em equilíbrio com a temperatura da rocha e da água. Na caverna Santana, os valores máximos e mínimos foram

os mesmos para a água do rio, que se localiza no 5° nível de galerias, e a superfície rochosa em um ponto no salão do Encontro, no 4° nível de galerias (tab. 1).

Tabela 1 - Medidas estatísticas das séries anuais de temperatura da água (rio Roncador) e da superfície de rocha (salão do Encontro)

MEDIDA ESTATÍSTICA	TEMP. ÁGUA	TEMP. SUP. DE ROCHA
Máxima (anual)	19,3 °C	19,3 °C
Mínima (anual)	17,1 °C	17,1 °C
Média (anual)	18,66 °C	18,29 °C
Amplitude (anual)	2,2 °C	2,2 °C

Ressalta-se, no entanto, que a correlação direta entre a temperatura da água e da rocha, com índice r de 0,416, não é tão significativa – apesar dos resultados quase idênticos entre si na Tabela 1. A temperatura da água possui um índice elevado de correlação com as estações Externa (0,601), Boca (0,509), Rio I (0,487), Rio II (0,506), Fafá (0,516) e Rio III (0,422), o que demonstra que carrega influência do meio externo e, conseqüentemente, também influencia relativamente na atmosfera da caverna, tal como descrevem Badino (2004) e Stoeva e Stoev (2005). Além disso, é provável que a água se resfrie ao entrar no sistema subterrâneo, em função da temperatura relativamente mais fria da rocha, a qual mantém um nível baixo de variação térmica, com grande memória cumulativa da variação climática local e que governa os subsistemas térmicos subterrâneos, como já observado por Pflitsch e Piasecki (2003).

Na continuidade, a interpretação dos dados coletados permitiu classificar a caverna Santana como uma warm trap (cf. CIGNA, 1967, 2004). A sua conformação física, com extensa rede de galerias desenvolvidas acima do plano horizontal, faz com que as massas de ar relativamente mais frio do interior da caverna criem um fluxo em direção ao ambiente externo nos períodos mais quentes (CIGNA, 1967, 2004; MANGIN; ANDRIEUX, 1988), o que se aplica à variação diurna ou mesmo às variações infra-anuais. Quando o ar no ambiente externo está relativamente mais frio que no interior da caverna, o fluxo se inverte. Este se dirige para o interior da caverna, fazendo com que a circulação de ar seja limitada pela formação de bolsões de ar relativamente mais quente nas partes mais altas e confinadas do sistema, tal como uma célula aprisionada de ar.

Tal como descrito em Mangin e Andrieux (1988) e Cigna (2004) para o modelo de circulação espeleoclimática da warm trap, os resultados do monitoramento de T demonstraram que nas estações Boca, Rio I e Rio II a temperatura variou abaixo da casa dos 18 °C. As estações Fafá, Cristo, Encontro e São Paulo, por sua vez, tiveram flutuações menores na temperatura e sempre acima dos 18 °C. A estação Rio III variou sua temperatura em um meio-termo entre estes dois grupos, entre 17,3 °C e 18,5 °C, cuja localização marcaria um provável limite no interior da caverna de penetração horizontal das massas de ar frio originadas no ambiente externo. Disso, entende-se que no inverno as temperaturas em salões superiores e zonas mais profundas são mais elevadas do que nas regiões próximas à boca e no meio externo.

As massas de ar relativamente mais quente confinadas nas galerias superiores também apresentaram um comportamento dinâmico de trocas atmosféricas, por condutividade térmica ou mesmo por fluxo direto de ar. Esta condição enfatiza ainda mais os apontamentos de trabalhos sobre espeleoclimatologia, tais como Cigna (1967), Pflitsch e Piasecki (2003) e Luetscher e Jeannin (2004), os quais demonstraram que mesmo em zonas mais profundas o espeleoclima não é estático e constante. Ainda que em escala relativamente reduzida, sempre ocorrem modificações, as quais contribuem para o entendimento da dinâmica espeleoclimática e do acúmulo e dispersão de fluxos gasosos.

Para uma investigação mais aprofundada desta dinâmica e em busca da comprovação do modelo warm trap proposto, os dados também foram analisados separadamente, conforme os meses mais quentes (set.-fev.) e mais frios (mar.-ago.) do ano. A interpretação dos dados sazonais complemen-



tou as considerações sobre a circulação atmosférica para a caverna Santana, com contribuição da análise estatística descritiva (fig. 7).

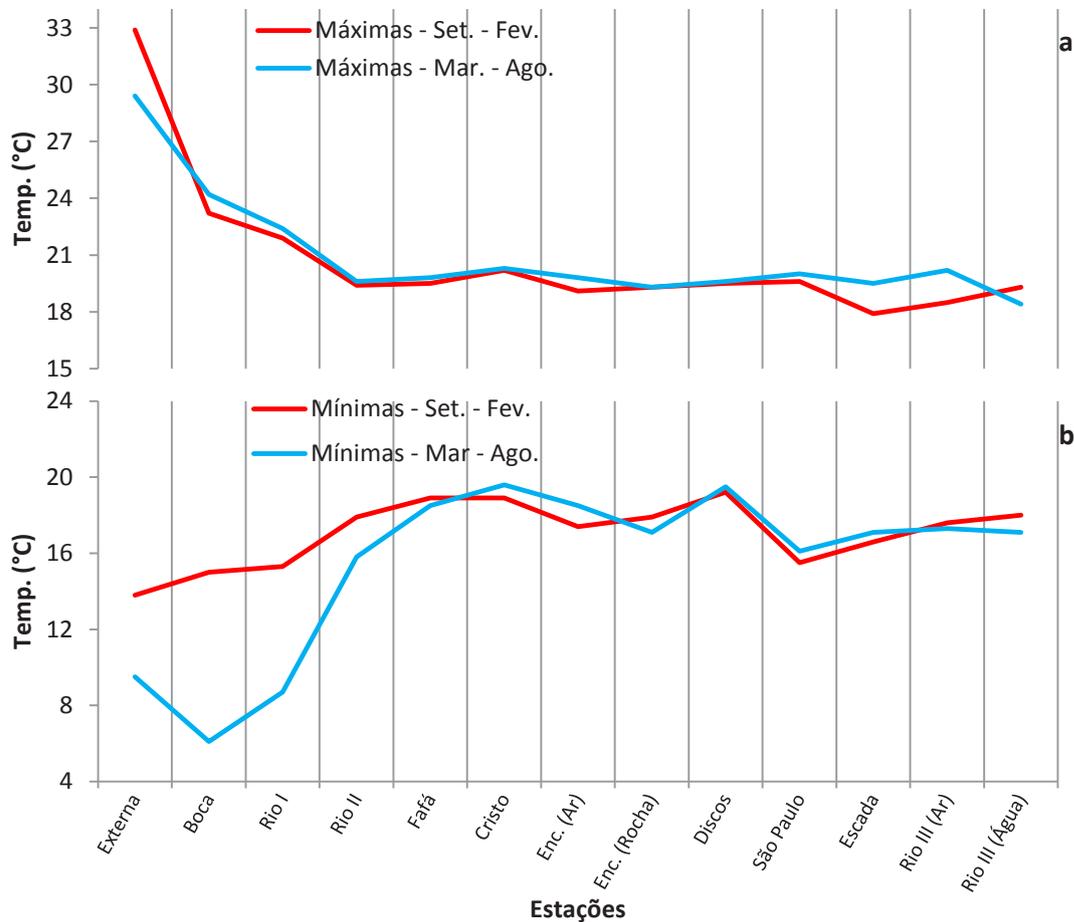


Figura 7 - Medidas de dispersão: máximas (A) e mínimas (B), por estação de monitoramento e considerando os períodos frio e quente do ano

As medidas de dispersão (fig. 7) contribuem para a ilustração das diferenças de circulação de ar na caverna Santana nos períodos quente e frio do ano, corroborando as interpretações anteriores. No período relativamente mais frio do ano (mar. – ago.), as máximas por estação no interior da caverna são superiores as máximas do período relativamente mais quente (set. – fev.), evidenciando o modelo conceitual das warm traps. Quanto às temperaturas mínimas, estas são menos elevadas no período relativamente quente (set. – fev.) nas estações dentro da caverna, outra característica comum às warm traps. Ainda sobre as mínimas, percebe-se nos meses mais frios a existência de influências da temperatura externa nas estações Boca, Rio I, Rio II, Fafá e Rio III, evidenciando limites preliminares para as trocas atmosféricas mais intensas entre o meio externo e o interno.

Assim, com as interpretações dos dados obtidos, a fig. 8 sintetiza um modelo de circulação atmosférica para a porção estudada da caverna Santana.

Conforme modelo proposto na fig. 8, a variação na temperatura do ar na caverna Santana é escalonada em função das estações de verão e inverno – ou mesmo dos períodos relativamente mais frios e quentes do dia –, contribuindo para o refinamento das zonas termoclimáticas propostas inicialmente por Lobo et al. (2009b), agora ampliadas por meio dos agrupamentos da variabilidade hídrica. Esta é menor, mas ocorre principalmente nos metros iniciais da galeria do rio Roncador, em função da proximidade com o meio externo. Assim, o resultado permite a obtenção de zonas higrótérmicas para a caverna Santana.

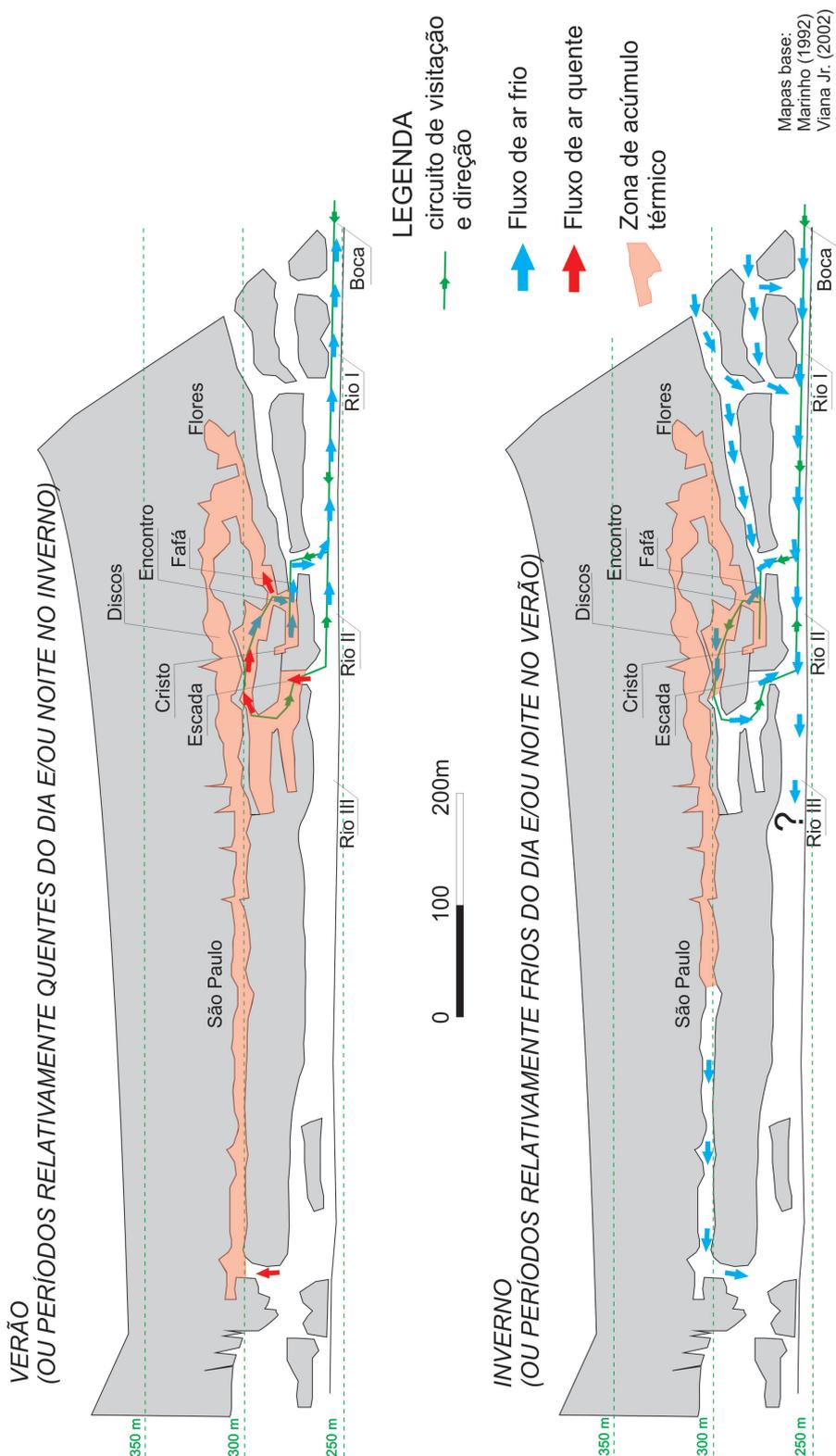


Figura 8 - Modelo conceitual de circulação de ar em corte longitudinal parcial da caverna Santana, caracterizando-a como uma warm trap



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado demonstrou a importância da extensão temporal e da densidade nos pontos de coleta para a compreensão ampla de um sistema atmosférico subterrâneo de maior complexidade espacial. Os intervalos temporais de 30min para o registro dos dados foram suficientes para uma caracterização geral do espeleoclima e definição da dinâmica atmosférica subterrânea.

As análises estatísticas de séries temporais possibilitaram o detalhamento dos dados nos pontos monitorados, contribuindo para as análises integradas do sistema atmosférico. Com isso, foram identificadas zonas climáticas na caverna Santana. As zonas identificadas possuem forte relação com a estratificação horizontal em relação ao meio externo e vertical em relação aos níveis de galeria, com grande influência do rio Roncador e da espessura da camada rochosa. Por consequência, foi possível obter o modelo geral de circulação atmosférica da caverna Santana, demonstrando seu padrão cumulativo térmico em relação às galerias superiores, tal como descrito em trabalhos anteriores para o padrão warm trap. A célula de aprisionamento do ar relativamente mais quente possui tamanho variável, sendo mais extensa no verão e em dias muito quentes, e se retraindo no inverno e dias mais frios, gerando uma dinâmica de renovação do ar na caverna pela degaseificação.

Por fim, é recomendável que estudos futuros sobre o espeleoclima da caverna Santana sejam focados em aspectos ligados à compreensão da origem e destino da movimentação gasosa em seu interior e de limites mais tênues entre salões, tais como São Paulo – São Jorge ou Discos – Vulcões, como exemplos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- BADINO, G. Cave temperatures and global climatic change. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.33, n.1, p.103-114, 2004.
- BARBIERI, A.J. **Depósitos minerais secundários das cavernas Santana, Pérolas e Laje Branca, Município de Iporanga – São Paulo**. 1993. 96 p. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.
- BAILEY, W.G. Microclimatology. In: OLIVER, J.E. (Ed.) **Encyclopedia of world climatology**. Dordrecht: Springer, 2005. p.486-499.
- BOGGIANI, P.C.; SILVA, O.J.; GESICKI, A.L.D.; GALATI, E.; SALLES, L.O.; LIMA, M.M.E.R. Definição de capacidade de carga turística das cavernas do Monumento Natural Gruta do Lago Azul (Bonito, MS). **Geociências**, Rio Claro, v.26, n.4, p.333-348, 2007.
- CALAFORRA, J.M.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; SÁNCHEZ-MARTOS, F.; GISBERT, J.; PULIDO-BOSCH, A. Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. **Environmental Conservation**, v.30, n.2, p.160-167, 2003.
- CIGNA, A. A. An analytical study of air circulation in caves. **International Journal of Speleology**, Bologna, v.3B, n.1/2, p.42-54, 1967.
- CIGNA, A. A. Monitoring of caves: conclusions and recommendations. **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.31, n.1, p.175-177. 2002.
- CIGNA, A.A. Climate of caves. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of caves and karst science**. London: Taylor & Francis, 2004. p.467-475.
- CRUZ JÚNIOR, F.W. da.; BURNS, S.J.; KARMANN, I.; SHARP, W.D.; VUILLE, M.; CARDOSO, A.O.; FERRARI, J.A.; DIAS, P.L.S.; VIANA JÚNIOR, O. Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. **Nature**, v.434, n.3, p.63-66, 2005.
- FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; SÁNCHEZ-MARTOS, F.; GISBERT, J. Microclimate processes characterization of the giant geode of Pulpí (Almería, Spain): technical criteria for conservation. **International Journal of Climatology**, v.26, p.691-706, 2006.
- GEIGER, R. Microclimatology. In: MALONE T.F. (ed.) **Compendium of meteorology**. Boston: American Meteorological Society, 1951. p. 993-1003.

- GERARDI, L.H. de O.; SILVA, B.C.N. **Quantificação em geografia**. São Paulo: Difel, 1981. 161 p.
- GPME – GRUPO PIERRE MARTIN DE ESPELEOLOGIA. **Mapa da caverna de Santana**. São Paulo: GPME, 2009. 1 mapa. Escala 1:500.
- GUTJAHR, M.R.; TARIFA, J.R. Critérios relacionados a compartimentação climática de bacias hidrográficas: a bacia do rio Ribeira de Iguape-SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 5, 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1993. p.447-449.
- GUTJAHR, M.R.; TARIFA, J.R. A abordagem sinótica em estudos de compartimentação climática. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 6, 1995, Goiânia. **Anais do...** Goiânia: UFG, 1995. p.44-48.
- HOYOS, M.; SOLER, V.; CAÑAVERAS, J.C.; SÁNCHEZ-MORAL, S.; SANZ-RUBIO, E. Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo cave, Northern Spain). **Environmental Geology**, Berlin, v.33, n.4, p.231-242, 1998.
- LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2.ed. Rio Claro: Edunesp, 2003. 253 p.
- LAROCQUE, M.; MANGIN, A.; RAZACK, M.; BANTON, O. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). **Journal of Hydrology**, v.205, p.217-231, 1998.
- LOBO, H.A.S.; ZAGO, S. Iluminação com carbureteiras e impactos ambientais no microclima de cavernas: estudo de caso da lapã do Penhasco, Buritinópolis-GO. **Geografia**, Rio Claro, v.35, n.1, p.183-196, 2010.
- LOBO, H.A.S.; PERINOTTO, J.A. de J.; BOGGIANI, P.C.; ZAGO, S. Eventos musicais causam impactos no microclima de cavernas? Avaliação das alterações na atmosfera subterrânea da gruta Morro Preto (PETAR, Iporanga-SP). **Geonomos**, Belo Horizonte, v.17, n.1, p.01-10, 2009a.
- LOBO, H.A.S.; PERINOTTO, J.A. de J.; POUDOU, S. Análise de agrupamentos aplicada à variabilidade térmica da atmosfera subterrânea: contribuição ao zoneamento ambiental microclimático de cavernas. **Revista de Estudos Ambientais**, Blumenau, v.11, n.1, p.22-35, 2009b.
- LUETSCHER, M.; JEANNIN, P.Y. Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes. **Terra Nova**, v.16, n.6, p.344-350, 2004.
- MANGIN, A. Pour une meilleure connaissance des systems hydrologiques à partir des analyses corrélatore et spectrale. **Journal of Hydrology**, v.67, p.25-43, 1984.
- MANGIN, A.; ANDRIEUX, C. Infiltration et environnement souterrain, le role de l'eau sur les paramètres climatiques. **Actes des Journées Félix Trombe**, Moulis, p.79-95, 1988.
- PFLITSCH, A.; PIASECKI, J. Detection of an airflow system in Niedzwiedzia (Bear) cave, Kletno, Poland. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.65, n.3, p.160-173, 2003.
- PULIDO-BOSCH, A.; MARTÍN-ROSALES, W.; LÓPEZ-CHICANO, M.; RODRÍGUEZ-NAVARRO, M.; VALLEJOS, A. Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). **Environmental Geology**, Berlin, v.31 n.3/4, p.142-149, 1997.
- SCALEANTE, J.A.B. **Avaliação do impacto de atividades turísticas em cavernas**. 2003. 82. p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.
- SBE – SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA. **Cadastro nacional de cavernas do Brasil (CNC)**. Campinas: SBE, 2014. Disponível em: <<http://www.sbe.com.br>>. Acesso em: 16 jul. 2014.
- STOEVA, P.; STOEVA, A. Cave air temperature response to climate and solar and geomagnetic activity. **Memorie Della Società Astronomica Italiana**, v.76, p.1042-1047, 2005.
- VIANA JÚNIOR, O. **Hidroquímica, hidrologia e geoquímica isotópica (O e H) da fácies de percolação vadosa autogênica, caverna Santana, Município de Iporanga, Estado de São Paulo**. 2002. 113 p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

Trabalho enviado em junho de 2014

Trabalho aceito em julho de 2014

