

## ESPELEOCLIMA E SUAS APLICAÇÕES NO MANEJO DO TURISMO EM CAVERNAS

Heros Augusto Santos Lobo<sup>1</sup>

**Resumo:** *O presente artigo apresenta uma revisão sobre os estudos dos sistemas atmosféricos em cavernas, com enfoque na apresentação de suas principais características e sua relação com o manejo do turismo em cavernas. São abordados aspectos inerentes ao comportamento habitual da temperatura, umidade relativa do ar, concentração de gás carbônico e radônio e dos fluxos de energia. O artigo enfatiza a carência de estudos espeleoclimáticos de longo prazo em cavernas brasileiras, tanto focados em questões de manejo quanto no conhecimento básico de seus padrões de variabilidade atmosférica.*

**Palavras-Chave:** *Atmosfera Subterrânea; Caverna; Manejo Espeleológico; Microclima; Espeleoclima.*

### SPELEOCLIMATE AND ITS APPLICATIONS IN THE TOURISM MANAGEMENT IN CAVES

**Abstract:** *This paper present a review about the studies of atmospheric systems in caves, focused on the presentation of its main characteristics and the relationship with management of tourism in caves. Some inherent aspects of the patterns of temperature, relative humidity, carbon dioxide and radon concentration and the energy flow are addressed. The article highlights the necessity of long-term speleoclimatic studies in Brazilian caves, focused both in management issues and in the basic knowledge of its atmospheric variability patterns.*

**Key-Words:** *Underground atmosphere; Cave; Speleological Management; Microclimate, Speleoclimate.*

## INTRODUÇÃO

As cavernas se constituem em espaços subterrâneos em meio às rochas, cujas dimensões podem variar horizontal ou verticalmente, entre poucos metros e centenas de quilômetros, com um ou mais acessos à superfície. As cavernas se constituem como elementos-chave de um sistema cárstico, intervindo tanto em processos de transformação em superfície e sub-superfície do meio físico (CIGNA; FORTI, 1986; FREITAS; SCHMEKAL, 2003) quanto na manutenção da fauna cavernícola (HOENEN; MARQUES, 2000; TRAJANO; BICHUETTE, 2006). A atmosfera das cavernas é marcada por singularidades que a diferenciam dos demais sistemas atmosféricos naturais, em função de fatores como o confinamento espacial, a ausência de luz e a baixa incidência de energia solar direta (BUECHER, 1999; CIGNA, 2004).

<sup>1</sup> Doutor em Geociências e Meio Ambiente (UNESP). Mestre em Geografia (UFMS). Especialista em Gestão e Manejo Ambiental em Sistemas Florestais (UFLA). Bacharel em Turismo (UAM). Sociedade Brasileira de Espeleologia - E-mail: heroslobo@hotmail.com  
DOI: 10.7154/RDG.2012.0023.0002

Em diversos estudos (e.g. HOYOS *et al.*, 1998; SÁNCHEZ-MORAL *et al.*, 1999; FREITAS; SCHMEKAL, 2003; FERNÁNDEZ-CORTÉS, 2006 a, 2006 b), a atmosfera cavernícola vem sendo tratada como um microclima, considerando prioritariamente a escala espacial e a redução proporcional dos processos de troca de energia e massa. Entretanto, as características fisiográficas das cavernas condicionam uma nomenclatura focada nos sistemas atmosféricos subterrâneos. Termos como microclima cavernícola ou espeleoclima se destacam por representarem melhor tais especificidades. Neste trabalho optou-se pelo termo espeleoclima, visando à diferenciação em relação aos significados gerais de um microclima. Assim, inserindo-se no contexto de pesquisas espeleoclimáticas, o presente artigo traz uma revisão sobre as características gerais do espeleoclima, bem como sua aplicação em estudos de manejo do turismo em cavernas.

### ***Caracterização do espeleoclima***

A atmosfera subterrânea apresenta processos físico-químicos de transferência e conservação de energia e massa semelhantes aos encontrados em sistemas atmosféricos da superfície terrestre, mas em intensidades atenuadas na maioria dos casos (LUETSCHER *et al.*, 2008). A reposição energética ocorre a partir de fluxos gasosos e hídricos de troca com o ambiente externo, o qual recebe incidência direta da radiação solar, bem como sob influência geotermal. Embora a atmosfera subterrânea seja marcada por uma estabilidade térmica e composicional relativamente maior se comparada ao meio externo (LUETSCHER *et al.*, 2008), esta condição não denota em sua classificação como um sistema fechado (BOURGES *et al.*, 2006). Trata-se, portanto, de um sistema aberto e homeostático, com ajustes controlados por mecanismos inter-relacionados de regulação, possibilitando a manutenção de uma condição primária de estabilidade, tal como descrevem Watson e Lovelock (1983) e Lovelock (2006), gerando a modelagem padrão do estado estacionário da atmosfera. Esta modelagem, dinâmica e homeostática, deve ser observada com cautela, devido o risco de instabilidade estrutural, que pode ser causado por pequenas mudanças no modelo (ABRAHAM, 2009). No caso de ambientes subterrâneos, esta mudança fundamental no modelo pode ser interpretada pela simplificação da biosfera, muito provavelmente incapaz de regular o ambiente em processo de retroalimentação, assim como sugerem, para os casos gerais, Williams (1992) e Lenton (1998) – apesar do exemplo citado por Moreira e

Trajano (1992), para colônias de morcegos atuando no aumento da temperatura do ar em algumas cavernas. Todavia, trabalhos recentes têm demonstrado a retroalimentação existente entre a biosfera e a atmosfera, como no caso das cianobactérias oceânicas e a formação de nuvens, corroborando em parte com as hipóteses geofisiológicas Lovelock (2006). Esta nova perspectiva vem sendo usada com maior frequência em estudos de dinâmica climática, em função dos princípios de vulnerabilidade do ambiente relativos à antropização (MERTZ *et al.*, 2009).

As especificidades espaço-temporais, geofisiológicas e geofisiográficas mencionadas permitem a compreensão da diferenciação dos sistemas atmosféricos subterrâneos. Nos estudos atmosféricos de superfície, os principais elementos considerados nas análises de dinâmicas de circulação e definição de padrões são a temperatura, a umidade relativa e a pressão atmosférica, bem como os fenômenos decorrentes da interação entre estes elementos, como as chuvas, os ventos, a cobertura do céu (nuvens) e os sistemas atmosféricos atuantes. Isto se percebe em análises da escola da climatologia geográfica rítmica do geógrafo Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro (ZAVATTINI, 2004) e em outras metodologias (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). No caso das cavernas, as principais variáveis consideradas nos estudos atmosféricos são apresentadas na Tabela 1, a partir de uma revisão de diversos trabalhos já publicados.

A variabilidade da dinâmica atmosférica dos elementos citados na Tabela 1 recebe influência do confinamento espacial (GEIGER, 1951; POULSON; WHITE, 1969; BAILEY, 2005), de sua estratificação vertical (TARHULE-LIPS; FORD, 1998; LUETSCHER; JEANNIN, 2004; BOURGES *et al.*, 2006) da movimentação relativamente pequena de massa e energia (CIGNA, 1967), da menor disponibilidade ou ausência total de luz (GEIGER, 1951; POULSON; WHITE, 1969; BADINO, 2004; STOEVA; STOEVA, 2005) e da estabilidade relativa dos parâmetros físico-químicos, que por sua vez é proporcional ao confinamento espacial, à profundidade e distância do meio externo e ao número e posição dos acessos ao ambiente externo (GEIGER, 1951; CHOPPY; CIGNA, 1994; BAKER; GENTY, 1998; BAILEY, 2005; BOURGES *et al.*, 2006).

Tabela 1: Parâmetros físicos e químicos considerados no estudo do espeleoclima

Trabalho consultado	Parâmetros Ambientais											
	Temperatura					Umidade (Relativa/absoluta)	Pressão Atmosférica	Fluxos		Concentração gasosa		Condensação
	Ar	Água	Rocha/ Espeleotemas/ Solo	Gelo (quando existente)				Água	Ar	CO <sup>2</sup>	<sup>222</sup> Rn	
Baker; Genty (1998)										x		
Bourges et al. (2001)								x				
Buecher (1999)			x		x				x			
Calaforra et al. (2003)	x											
Carrasco et al. (2002)					x					x		x
Cigna (1967)							x		x			
Cigna (2002a)	x				x							
Cigna (2002b)		x										
Cigna (2004)	x				x				x			
Cigna (2005)											x	
Cigna; Forti (1986)									x			
Cigna; Choppy (2001)								x	x			
Colazzo et al. (2007a, b)							x					
Dragovich; Grose (1990)										x		
Dublyansky; Dublyansky (1998)					x							
Fernández-Cortés et al. (2006a)			x									
Fernández-Cortés et al. (2006b)										x		
Freitas; Schmekal (2003)												x
Freitas; Schmekal (2006)										x		x
Hakl et al. (1996)											x	
Heaton (1986)								x				
Hoyos et al. (1998)										x		
Kranjc; Opara (2002)	x											
Liñan et al. (2008)										x		
Luetscher; Jeannin (2004)			x					x	x			
Mangin; Andrieux (1988)	x	x					x					
Mangin et al. (1999)	x											
Pflitsch; Piasecki (2003)									x			
Pflitsch et al. (2006)					x							
Piasecki et al. (2006)					x							
Pulido-Bosch et al. (1997)			x									
Sánchez-Moral et al. (1999)	x									x		x
Villar et al. (1984a, b)	x											

A estabilidade do espeleoclima e a circulação de ar em seu interior dependem também das dimensões do sistema subterrâneo, da movimentação do ar por efeito barométrico (POULSON; WHITE, 1969) e da complexidade dos possíveis níveis de galerias existentes. A figura 1 ilustra exemplos de diferentes padrões básicos de circulação de ar que interferem

no espeleoclima, em função das estações do ano e/ou do ciclo diuturno. Em sistemas complexos, é comum ocorrer uma mistura entre estes diferentes padrões.

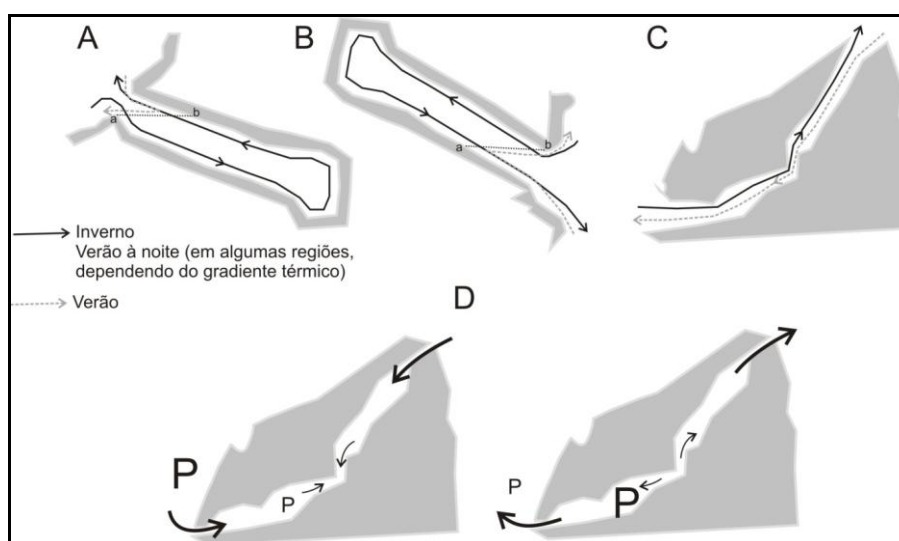


Figura 1: Modelo conceitual baseado em Eraso (1969), Mangin; Andrieux (1988) e Cigna (2004), sem escala e com exagero vertical em A e B, ilustrando em cortes transversais diferentes padrões de circulação atmosférica subterrânea. Em A e B, cavernas tipo “saco de ar”, sendo A – armadilha para o ar frio; e B – armadilha para o ar quente. Os exemplos C e D referem-se a cavernas com maior dinâmica atmosférica, sendo C um modelo de circulação por diferença de temperatura e D de cavernas barométricas.

As cavernas com desenvolvimento descendente em relação ao eixo horizontal (Figura 1A) são classificadas como armadilhas para a captura do ar frio. No inverno, o ar mais aquecido do interior da caverna flui para o meio externo. No verão, forma-se um bolsão de ar mais frio em seu interior (eixo a-b), limitando a circulação do ar a uma zona demasiadamente restrita, próxima da boca (ERASO, 1969; MANGIN; ANDRIEUX, 1988; CIGNA, 2004). Em cavernas com este perfil de desenvolvimento, em regiões mais frias do globo terrestre (latitudes ou altitudes mais altas), é comum a formação de corpos de gelo – em diversos casos, perenes – no interior destas cavernas (PFLITSCH *et al.*, 2006; PIASECKI *et al.*, 2006). No caso de cavernas com desenvolvimento ascendente (Figura 1B), a situação se inverte: o fluxo no verão é para baixo. No inverno, um bolsão de ar quente se forma a partir do eixo a-b, na zona interna, caracterizando uma armadilha para a captura do ar quente (ERASO, 1969; MANGIN; ANDRIEUX, 1988; CIGNA, 2004).

Em cavernas com mais de uma entrada, a circulação de ar gera fluxos por meio de dois mecanismos: o gradiente térmico e a pressão atmosférica. No caso do gradiente térmico, a movimentação ocorre em função de um processo de termoequilíbrio, entre a temperatura do ar dentro e fora das cavernas. Nas estações quentes do ano, quando o ar exterior é mais

quente que dentro da caverna, o ar mais frio e denso sai do interior da caverna por seu acesso inferior. No inverno, o ar fora da caverna fica relativamente mais frio que eu seu interior – portanto, mais denso –, impedindo a sua saída pelo acesso inferior (ERASO, 1969; BADINO, 2010; PFLITSCH *et al.*, 2010). Nestas circunstâncias, o ar da caverna está relativamente mais quente, saindo pelo acesso superior, em uma movimentação chamada de “efeito chaminé” (Figura 1C). Badino (2010) faz reservas em relação ao uso deste termo, dado que as cavernas não se assemelham às chaminés, pois estas últimas possuem uma fonte de aquecimento de ar em seu interior. Pflitsch *et al.* (2010) acrescentam ainda que a temperatura de cavernas com esta dinâmica apresenta um notável gradiente vertical, sendo maior próxima ao acesso superior em relação ao inferior, considerando a média anual.

Por fim, as cavernas barométricas, onde a pressão atmosférica exerce papel fundamental na dinâmica de circulação de ar. Este tipo de circulação é comum em grandes sistemas subterrâneos (BADINO, 2010; PFLITSCH *et al.*, 2010), como as cavernas com centenas de quilômetros dos Estados Unidos. Por outro lado, Pflitsch *et al.* (2010) relatam sua ocorrência em cavernas menores, de poucos metros, o que os leva a concluir que este tipo de circulação de ar em cavernas carece de muitos estudos para ser mais bem compreendida. O exemplo da Figura 1D demonstra o esquema básico das cavernas barométricas, que devem no mínimo dois acessos, além de ter o volume interno muito maior que os seus acessos restritos – embora Badino (2010) explique que o mecanismo de circulação barométrica do ar também é importante em cavernas com uma única entrada e/ou pequenas. Nelas, quando a pressão atmosférica externa é maior do que a interna, os fluxos de ar convergem para dentro do sistema por todos os seus acessos. Por outro lado, quando a pressão atmosférica externa diminui e fica menor que a de dentro da caverna, o ar do interior sai por todos os acessos. Pflitsch *et al.* (2010) complementam que a velocidade do ar é maior perto dos acessos do que no interior da caverna, tal como representado pela espessura das setas na Figura 1D. Os autores lembram também que em cavernas de circulação térmica ou barométrica, a referência se dá ao processo dominante no sistema analisado. Isto porque apenas em uma perspectiva teórica a circulação de ar ocorre em função de apenas um dos mecanismos. Na prática, ambos coexistem e interferem em diferentes proporções na circulação de ar nos sistemas atmosféricos subterrâneos.

Outra forma de circulação de ar é a convecção. Badino (2010) explica que os impactos gerados em trechos pequenos e restritos de uma caverna podem ser propagados para todo

o ambiente, por meio de correntes convectivas, mudando drasticamente a circulação de ar e o balanço térmico no ambiente. Um fenômeno deste tipo foi observado na gruta do Penhasco, em Buritinópolis-GO, onde o impacto higrótérmico gerado por três carbureteiras foi registrado em sensores em diversos pontos da caverna (LOBO; ZAGO, 2010).

Cigna (1967) e Badino (2010) explicam que a circulação do ar em cavernas ocorre por causas estáticas e dinâmicas. Como causas estáticas, podem-se mencionar as diferenças entre a densidade do ar dentro e fora das cavernas levando em conta a temperatura do ar, a umidade relativa e a sua composição química; e a variação na pressão atmosférica. Como causas dinâmicas, os fluxos de água dentro e fora das cavernas. Choppy e Cigna (1994) mencionam também que o espeleoclima de cavernas inteiras ou trechos de cavernas isolados do contato com a atmosfera externa podem ser diferentes do espeleoclima habitual. Os autores se referem a galerias isoladas por sifões, desabamentos ou dutos muito estreitos. O sistema atmosférico subterrâneo destas áreas resulta, normalmente, das trocas entre a água de percolação – e o gás que ela transporta – e a rocha encaixante.

Em cavernas complexas a circulação do ar também varia conforme o número de acessos ao meio externo, a diferença nas dimensões entre as galerias e salões e a distância entre os acessos (CIGNA, 2004). Quanto menor for a incidência solar sobre a caverna – pela restrição de seus acessos, em função da espessura da capa de rocha que a protege ou pela circulação de água e ar em relação ao meio externo – maior serão: a sua estabilidade climática (RACOVITA, 1975; STOEVA; STOEV, 2005) e a influência recebida da energia geotermal (LUETSCHER; JEANNIN, 2004).

O espeleoclima é tradicionalmente classificado em três categorias (RACOVITA, 1975; LUETSCHER; JEANNIN, 2004; STOEVA; STOEV, 2005), em função da temperatura. A zona heterotérmica se localiza próxima aos acessos ao meio externo e recebe influências atmosféricas externas. A zona de temperaturas constantes (ou homeotérmica) se localiza em áreas relativamente mais profundas, onde predomina maior estabilidade térmica. Por fim, a zona transicional insaturada, que possui características intermediárias entre as outras duas. Estudos recentes (e.g. LUETSCHER *et al.*, 2008) têm demonstrado que a variação dos parâmetros atmosféricos em relação ao meio externo pode ocorrer mesmo em áreas mais remotas de uma caverna, colocando dúvidas sobre a efetividade desta classificação tradicional.

A relação entre os parâmetros térmicos (ar, água e rocha) em uma caverna é constante e dinâmica, ocorrendo por meio de processos de condução, convecção, advecção, condensação e radiação (ERASO, 1969), variando em função de fatores como: a profundidade em relação à superfície e o grau de confinamento na caverna (FREITAS; SCHMEKAL, 2003; CIGNA, 2004; FERNÁNDEZ-CORTÉS *et al.*, 2006a; LUETSCHER *et al.*, 2008); a temperatura da rocha (FREITAS; SCHMEKAL, 2003; LUETSCHER; JEANNIN, 2004); as correntes de ar originadas no exterior e/ou por convecção (CIGNA; FORTI, 1986; STOEVA; STOEVA, 2005); e o fluxo de água no sistema (STOEVA; STOEVA, 2005). A temperatura da rocha reflete, em profundidades de até 50 m – excepcionalmente, em profundidades superiores a 100 m – a média anual histórica da temperatura do ar no ambiente externo (PFLITSCH; PIASECKI, 2003; LUETSCHER, JEANNIN, 2004), além de ser o fator de prevalência na temperatura do espeleoclima (PFLITSCH; PIASECKI, 2003).

Outros fatores relevantes para a compreensão do espeleoclima são a umidade e o gás carbônico (CO<sub>2</sub>). A gênese e o comportamento destes elementos no ambiente são, de certa forma, interligados (BATIOT-GUILHE *et al.*, 2007). A água dissolvida no ar é proveniente dos fluxos subterrâneos e/ou meteóricos, por meio da circulação subterrânea e da percolação. Estes mesmos processos possibilitam o acúmulo de CO<sub>2</sub>, quer pelo carreamento de matéria orgânica nos rios – a qual posteriormente entra em decomposição –, quer pelo transporte por águas meteóricas do CO<sub>2</sub> originado no solo acima da caverna (BUECHER, 1999; CARRASCO *et al.*, 2002; LIÑÁN *et al.*, 2008).

A umidade relativa do ar é a porcentagem de água contida no ar a uma determinada temperatura em relação à sua capacidade máxima de retenção de umidade (HILL; FORTI, 1997; PALMER, 2007). Em zonas profundas de cavernas, em grande parte dos casos, a umidade relativa e absoluta tendem a ser elevadas, próximas do ponto de saturação, devido a própria umidade existente em função da percolação em rocha, levando a condensação da água nas paredes, teto e espeleotemas (HILL; FORTI, 1997; PALMER, 2007). A umidade relativa do ar é um dos principais fatores atmosféricos que influenciam o crescimento ou a redução dos espeleotemas (HILL; FORTI, 1997).

O estudo higríco também é sujeito a certas complicações. Alguns instrumentos que aferem a umidade do ar apresentam problemas com a condensação de água em seu sensor de leitura, interferindo nos resultados obtidos (CIGNA, 2002a). Além disso, existe uma variabilidade higríca no ar, causada por movimentos catabáticos (BAILEY, 2005; FERNÁNDEZ-CORTÉS *et*



al., 2006b), de modo que a umidade relativa do ar é maior próxima ao teto. Estudos feitos por Forbes (1998) demonstram a existência de uma estratificação vertical da umidade. A uma altura de 1,2 m do solo, a umidade relativa é menor – em função do aumento na circulação de ar. A partir desta altura a umidade aumenta, muito provavelmente, influenciada pela proximidade com a condensação existente nas paredes e teto das cavernas.

Para a aferição da condensação ainda não existem métodos amplamente difundidos. Até o presente, os trabalhos de Freitas e Schmekal (2003, 2006) apresentam os resultados mais eficazes até o presente. Por outro lado, a umidade do ar não tem sido amplamente utilizada como parâmetro fundamental de manejo ambiental. As exceções encontradas são aquelas que a relacionam com a condensação e com a concentração de CO<sub>2</sub>.

Sobre o CO<sub>2</sub>, Simon *et al.* (2007) detalham a sua origem em cavernas, considerando a entrada de carbono orgânico particulado (POC) e carbono orgânico dissolvido (DOC). Este último predomina nos ambientes subterrâneos, em função da entrada de corpos d'água, pelo processo de dissolução de CaCO<sub>3</sub> por meio da percolação, que libera CO<sub>2</sub> quando a solução saturada entra em contato com a atmosfera subterrânea (FORD; WILLIAMS, 2007; LIÑÁN *et al.*, 2008). A percolação também é responsável pela liberação do <sup>222</sup>Rn das rochas, elemento que está sempre presente nos solos e nas rochas por onde a água se infiltra (BUECHER, 1999; ALBERIGI, 2006; CAMPOS *et al.*, 2006; ALBERIGI; PECEQUILO, 2008).

### ***Espeleoclima e manejo turístico***

Além das razões intrínsecas para a compreensão do espeleoclima, como o conhecimento do clima atual e pretérito (LUESTSCHER *et al.*, 2008; BADINO, 2010), a aplicação de conhecimentos em espaços confinados em superfície (BAILEY, 2005) e as interferências de possíveis mudanças climáticas da Terra nos ambientes subterrâneos (BADINO, 2004; STOEVA; STOEVA, 2005), o seu estudo é igualmente importante para fins de conservação ambiental (CIGNA FORTI, 1988; ZELINKA, 2002; MANGIN, 2010). Em muitas cavernas, a existência e manutenção de determinados elementos depende da estabilidade do ciclo habitual natural das condições atmosféricas, como no caso de pinturas rupestres (VILLAR *et al.*, 1984b; PULIDO-BOSCH *et al.*, 1997; MANGIN *et al.*, 1999; SÁNCHEZ-MORAL *et al.*, 1999; MANGIN, 2010), dos espeleotemas e rochas (CABROL, 1997; PULIDO-BOSCH *et al.*, 1997;

FERNÁNDEZ-CORTÉS *et al.*, 2006a), da biota cavernícola (HOENEN; MARQUES, 2000; RUSSELL; MACLEAN, 2007) e da interação entre estes elementos (BASTIAN; ALABOUVETTE, 2009).

Por conta destes fatores, o espeleoclima vem recebendo substancial atenção no caso de cavernas abertas ao turismo. Em um passado recente, a negligência conferida para as alterações nos parâmetros climáticos levou determinadas cavidades à proibição do uso público, como a caverna Candamo, na Espanha, cuja estrutura de visitação foi implantada em 1925, incluindo um sistema de iluminação artificial. A degradação exacerbada do ambiente levou ao seu fechamento em 1979. Em 1989, a reabertura foi considerada e condicionada a estudos de capacidade de carga com base em parâmetros espeleoclimáticos (HOYOS *et al.* 1998). Outros exemplos de degradação do espeleoclima ou do meio físico em decorrência do impacto nos parâmetros atmosféricos são observados nos trabalhos de Pulido-Bosch *et al.* (1997) e Sánchez-Moral *et al.* (1999).

O uso dos estudos espeleoclimáticos na capacidade de carga em cavernas também é notório em diversas partes do mundo, como Espanha, França, Itália, Eslováquia e Estados Unidos, entre outros. Estudos pioneiros sobre o tema, em uma perspectiva determinística de análise – onde a variabilidade de um parâmetro atmosférico é considerada suficiente para a delimitação dos limites de visitação – foram apresentados nos trabalhos de Hoyos *et al.* (1998), Calaforra *et al.* (2003), Fernández-Cortés (2004), Fernández-Cortés *et al.* (2006a) e Lario e Soler (2010). No Brasil, este tipo de estudo ainda está em fase de iniciação.

Há casos também onde as modificações e benfeitorias executadas para facilitar o uso turístico geram danos ambientais nas cavernas, levando a alteração da dinâmica da atmosfera subterrânea. Como exemplo, na caverna Glowworm, na Nova Zelândia, uma porta selada foi colocada na entrada superior. Com isto, foi necessário um controle rigoroso entre aberturas e fechamentos, de modo a não gerar excesso ou escassez de condensação nas paredes, prejudicando, desta forma, os processos naturais de deposição mineral, condensação e evaporação (FREITAS; SCHMEKAL, 2003). No caso da fauna cavernícola, os possíveis impactos das alterações espeleoclimáticas são ainda desconhecidos, em função da notória dificuldade de se estabelecer padrões de monitoramento (CULVER; SKET, 2002) e da falta de pesquisas direcionadas para o tema.

Outra característica importante no uso do espeleoclima para o manejo ambiental é a inovação técnica e tecnológica. Na atualidade, equipamentos de aferição em tempo real e

registro simultâneo de dados permitem análises mais rápidas de séries mais amplas de dados, a um custo acessível (CIGNA, 2002a). Tais equipamentos precisam ser robustos, resistentes às condições adversas do ambiente e com grande precisão em seus sensores de leitura (CIGNA, 2002a; MANGIN, 2010). O uso de técnicas estatísticas também tem se consolidado, a partir de procedimentos como as análises de séries temporais (MANGIN *et al.*, 1999; CALAFORRA *et al.*, 2003; MANGIN, 2010), a geoestatística (FERNÁNDEZ-CORTÉS *et al.*, 2006b; PIASECKI *et al.*, 2006; LOBO; ZAGO, 2010) e os coeficientes de correlação (PULIDO-BOSCH *et al.*, 1997; LIÑÁN *et al.*, 2008). O rigor na coleta de dados também é de suma importância para a obtenção de resultados fiáveis. O uso de registradores automáticos é fundamental, distribuídos em toda a área sob influência antrópica, pelo período mínimo de um ano (CIGNA, 2002b). Cigna (2002b) aponta a necessidade mínima de quatro registros diários; Zelinka (2002) apresenta intervalos variáveis entre dez minutos e uma hora, dependendo da finalidade do estudo; e Mangin (2010) apresenta exemplos com intervalo de coleta de quinze minutos, mas com séries históricas variáveis entre quinze e vinte anos. Os estudos que relacionam o espeleoclima ao manejo ambiental são focados em três correntes distintas de análise: I) o manejo baseado na temperatura atmosférica; II) as concentrações de CO<sub>2</sub> e <sup>222</sup>Rn e suas implicações ao ambiente e à saúde humana; e III) os fluxos de energia e matéria e a dispersão de impactos antrópicos.

### ***Manejo turístico de cavernas baseado na temperatura atmosférica***

Em diversos lugares do mundo, o monitoramento climático em cavernas se iniciou em função do uso turístico, como na Eslováquia, em 1870 (ZELINKA, 2002) ou na Eslovênia, em 1884 (KRANJC; OPARA, 2002). Os atributos do espeleoclima se constituem nos parâmetros de utilização mais prática e aplicável ao manejo e gestão turísticos de cavernas. O elemento mais utilizado para este fim é a temperatura, considerando como parâmetros a sua variabilidade no ar, rocha e água, o que constitui o subsistema térmico.

O estudo do subsistema térmico se baseia no monitoramento periódico destas variáveis em escalas temporais pré-definidas, considerando também aspectos como a interação com o clima externo, a variabilidade morfológica das cavernas, a pressão do uso turístico e as fontes artificiais de calor introduzidas, como os sistemas de iluminação (PULIDO-BOSCH *et al.*, 1997; CIGNA; BURRI, 2000; KRANJC; OPARA, 2002; RUSSELL; MACLEAN, 2007).

Dos parâmetros deste subsistema, a temperatura do ar é usada amplamente para fins de manejo, sobretudo com o objetivo de determinar a capacidade de carga turística. Sua aplicação tem sido feita, geralmente, de três formas. A primeira deles é a limitação espacial da visitação em função dos impactos na temperatura. Nestes casos, em áreas onde a estabilidade térmica é maior, o acesso não é recomendado (e.g. FERNÁNDEZ-CORTÉS *et al.*, 2006a, c). O segundo é a limitação temporal de acesso, em função da alteração da temperatura do ar causada pela permanência excessiva de pessoas em um determinado lugar (e.g. FERNÁNDEZ-CORTÉS *et al.*, 2006a, b). Em cavernas estudadas na França, foi observada a modificação de espeleotemas em função da variação na temperatura a partir de alguns limites de permanência de pessoas no ambiente (CABROL, 1997). Em outro estudo (LOBO, 2011), na caverna de Santana, Brasil, foi observado que o fator preponderante da relação entre a temperatura e a presença de visitantes não era o tamanho dos grupos ou o total de visitas diárias, mas sim, o tempo máximo de permanência em pontos específicos da caverna. Por fim, a limitação do total de visitas diárias permitidas ou de pessoas em um grupo, em função da manutenção das condições naturais de variação climática (e.g. HOYOS *et al.*, 1998; CALAFORRA *et al.*, 2003; LARIO; SOLER, 2010).

### ***Parâmetros químicos da atmosfera: manejo ambiental e riscos aos visitantes***

Em linhas gerais, os parâmetros químicos mais relevantes da atmosfera cavernícola para fins de manejo são a água dissolvida no ar e as concentrações de CO<sub>2</sub> e de <sup>222</sup>Rn. Seu estudo se justifica por dois motivos principais: a conservação do ambiente e os potenciais riscos à saúde humana.

Em estudos feitos na caverna Candamo, Espanha, Hoyos *et al.* (1998) encontraram concentrações de CO<sub>2</sub> na água que eram entre três e sete vezes maiores que as da atmosfera subterrânea. Pulido-Bosch *et al.* (1997) mencionam que, em alguns casos, esta proporção pode atingir grandezas superiores a vinte vezes. No mesmo trabalho, os autores também apontam uma estreita relação entre a concentração de CO<sub>2</sub> no ar e a distância do ponto monitorado em relação à entrada da caverna Candamo, Espanha – quanto mais distante, maior a concentração. Song *et al.* (2000) constataram esta mesma correlação espacial na caverna Bayun, China, assim como Fernández-Cortés *et al.* (2006a) na caverna d'Água, Espanha. Dragovitch e Grose (1990) mencionam que a concentração mínima para a

ocorrência de corrosão da calcita em espeleotemas é de 2400 ppm. Porém, estudos feitos em cavernas espanholas demonstram empiricamente a ocorrência de corrosão por condensação induzida pela presença humana, considerando variações da ordem de 500ppm (SÁNCHEZ-MORAL *et al.*, 1999) e até mesmo 100 ppm (HOYOS *et al.*, 1998), tendo como base valores muito abaixo dos 2400 ppm.

Como mencionado, a visita turística pode acarretar no aumento momentâneo na concentração de CO<sub>2</sub> no ar. Milanolo; Grabrovsek (2009) calcularam em dois experimentos acréscimos de origem humana variáveis entre 0,35 e 0,45l CO<sub>2</sub> min.<sup>-1</sup> pessoa<sup>-1</sup>. Este aumento na concentração de CO<sub>2</sub>, ainda que pontual, teoricamente pode ser dissolvido em meio aquoso, nos gotejamentos e na condensação. A solução resultante deste fenômeno pode se tornar novamente agressiva, corroendo as rochas carbonáticas, em um processo conhecido como corrosão por condensação (PULIDO-BOSCH *et al.*, 1997; BAKER; GENTY, 1998; SARBU; LASCU, 1997; HOYOS *et al.*, 1998; CARRASCO *et al.*, 2002; JAMES, 2004a, b, c; COLLAZO *et al.*, 2007b; FERNÁNDEZ-CORTÉS *et al.*, 2006b). Assim, a dissolução que ocorre majoritariamente na rocha matriz, passa a se intensificar em ambientes de deposição, onde o processo dominante é a precipitação de minerais. Com isso, o processo se inverte parcialmente neste caso.

O monitoramento da umidade relativa e da temperatura do ar em conjunto com a variação na concentração de CO<sub>2</sub> é fundamental para fins de manejo ambiental espeleológico. Fernández-Cortés (2004) acrescenta que a precipitação de calcita é maior em ambiente de menor umidade do ar, favorecendo a evaporação de água da percolação. Por outro lado, a temperatura exerce papel importante na taxa de solubilidade do CO<sub>2</sub> na água, que é inversamente proporcional a temperatura. O monitoramento deve obedecer também a um ciclo sazonal no mínimo anual. As pesquisas de Liñán *et al.* (2008) na caverna Nerja, Espanha, demonstram que a interferência antrópica na concentração de CO<sub>2</sub> no ar pode variar não somente em função do fluxo de visita, mas também conforme a época do ano. A existência de amplitude térmica é fundamental para a ocorrência de condensação e possível corrosão posterior (JAMES, 2004c; DREYBRODT *et al.*, 2005), de modo que variações da ordem de 10°C podem gerar montantes de corrosão da ordem de 0,3 µm/ano – em caso deste valor corresponder à amplitude anual – à 3 µm/ano – caso o valor corresponda à amplitude diária (DREYBRODT *et al.*, 2005). Em pesquisa conduzida em cavernas no Caribe, Tahule-Lips e Ford (1998) constataram a ocorrência de corrosão por condensação na zona de

entrada das cavernas monitoradas, onde a influência do clima externo é maior e ocorre uma variação térmica diária.

Os fluxos de ar e água também precisam ser monitorados. A movimentação gasosa é responsável pela dispersão ou acúmulo das variações físicas e químicas do ar. A concentração de CO<sub>2</sub> possui grande dependência dos fluxos de ar, o que interfere diretamente nos processos de liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera por meio da percolação e/ou da deposição de carbonatos (KOWALCZK; FROLICH, 2010).

Além disso, a existência de padrões de dispersão gasosa contribui para o retorno mais rápido dos padrões naturais de concentração de CO<sub>2</sub> no ar a partir da visita turística. Este fator é fundamental, considerando a velocidade da transferência do CO<sub>2</sub> do ar para a água para que ocorra a dissolução da calcita. Neste ponto, os autores consultados não apresentaram um consenso, dado que para James (2004b), esta velocidade é lenta, enquanto que para Dreybrodt *et al.* (2005) a água condensada nas paredes entra rapidamente em equilíbrio com o CO<sub>2</sub> dissolvido no ar. Com base em dados coletados na caverna Candamo, Espanha, Hoyos *et al.* (1998) demonstraram teoricamente que um aumento de 0,15°C e de 110 ppm de CO<sub>2</sub> no ar – considerando a umidade relativa do ar sempre constante, próxima a 100% – permitiria um aumento na taxa de dissolução de calcita na rocha da ordem de aproximadamente 7,3%. Apesar de não terem obtido a comprovação prática do dado, o valor serve como uma referência inicial. Embora a alteração tenha ocorrido a despeito de uma estabilização rápida – duas horas para a temperatura e sete horas para o CO<sub>2</sub> –, os dados foram obtidos na época do ano de menor concentração de CO<sub>2</sub> na caverna, quando as alterações antrópicas podem ter sido mais substanciais. Em outro estudo, conduzido na caverna Cisarska, na república Tcheca, Faimon *et al.* (2006) concluíram que a concentração de CO<sub>2</sub> de origem antrópica somente atingiria níveis críticos em condições extremas de visita – como exemplo, para o caso estudado, grupos de mais de 100 pessoas permanecendo mais de 4h dentro da caverna.

O CO<sub>2</sub> em altas concentrações também apresenta riscos para a saúde humana, até mesmo porque a sua produção advém de um processo de oxidação, o qual, por consequência, diminui a disponibilidade de O<sub>2</sub> no ambiente. Este processo pode ser agravado em cavernas que se constituem como “armadilhas térmicas” (Figura 1), bem como pela disponibilidade de matéria orgânica (BADINO, 2009).

Outro grande risco atmosférico em cavernas está relacionado à concentração do isótopo  $^{222}\text{Rn}$ . Trata-se de um gás da série do Urânio ( $^{238}\text{U}$ ), que se desprende das rochas por difusão ou transporte em meio aquoso (CIGNA, 2005). Seu decaimento ocorre em 3.82 dias, gerando uma série de partículas atômicas conhecidas como filhos do  $^{222}\text{Rn}$ . Estes se fixam rapidamente à poeira ou à água dissolvida no ar, podendo ser inalados e se concentrar no pulmão, sendo considerados carcinogênicos (BUECHER, 1999; CRAVEN; SMITH, 2006). O foco maior de preocupação, como já constatado em estudos de compilação (CIGNA, 2005; CRAVEN; SMITH, 2006), é a saúde de pessoas que ficam expostas por um tempo maior ao ambiente subterrâneo, como guias de turismo, sendo que pesquisadores, espeleólogos e turistas não apresentam níveis alarmantes de frequência ao ambiente.

Além das questões relacionadas à saúde humana, estudar a concentração do  $^{222}\text{Rn}$  em cavernas é também importante para compreender a circulação do ar em seu interior (HAKL *et al.*, 1996; BUECHER, 1999; BATIOT-GUILHE *et al.*, 2007). Em cavernas horizontais, a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  se correlaciona ao gradiente térmico, enquanto que em cavernas verticais, o fator preponderante de correlação é a pressão atmosférica (HAKL *et al.*, 1996).

### ***Fluxos de energia e matéria e a dispersão de impactos antrópicos***

A existência de fluxos de ar e água em direção ao meio externo se constitui em possibilidade de prevenção e dispersão dos impactos antrópicos, tornando as cavernas com estas características mais propícias ao uso turístico de baixo impacto ambiental. Além disso, Bourges *et al.* (2001), Fernández-Cortés *et al.* (2006b), Liñán *et al.* (2008) e Kowalczyk; Frolich (2010) acrescentam que a circulação atmosférica subterrânea é fundamental para a compreensão do acúmulo de  $\text{CO}_2$  no ar. Por outro lado, correntes de ar ascendentes e em direção ao interior das cavidades podem gerar impactos cumulativos no ambiente, o que reforça a importância do conhecimento da dinâmica atmosférica subterrânea.

As correntes de ar em conjunto com os fluxos de água são os grandes responsáveis pelo equilíbrio térmico por advecção na atmosfera subterrânea. Em galerias inativas, sem a presença de rios, os fluxos de ar – ainda que muito tênues – são tipicamente os mais relevantes (LUETSCHER *et al.*, 2008).

A dificuldade para aferição dos fluxos de ar é a escala de precisão necessária nos instrumentos utilizados, uma vez que a velocidade do ar em cavernas, salvo exceções, é da

ordem de décimos de metros por segundo. Por outro lado, os fluxos também podem ser inferidos a partir da existência e da posição de alguns espeleotemas, como algumas helictites e coralóides (HILL; FORTI, 1997; PALMER, 2007), ou mesmo calculados, em função das diferenças nos parâmetros atmosféricos encontradas nos ambientes interno e externo de uma caverna (LUETSCHER *et al.*, 2008; KOWALCZK; FROLICH, 2010). Em linhas gerais, os fluxos de ar são induzidos por diferenças térmicas, de densidade e de pressão entre a atmosfera interna e externa das cavernas (BUECHER, 1999; CIGNA, 2002a, 2004; PALMER, 2007). Outro indicador confiável é a taxa de concentração de gases como o CO<sub>2</sub> e o <sup>222</sup>Rn, que são considerados como bons traçadores para a análise de fluxos de ar em cavernas (HAKL *et al.*, 1996; CIGNA, 2005; BADINO, 2009). Também a posição de certos tipos de espeleotemas, como os coralóides, pode ser usada para a identificação de padrões de circulação gasosa (QUEEN, 1981, 2009).

Por fim, existe também a possibilidade de uso de traçadores químicos, como o Perfluorocarbono (PFT), testado como sucesso em cavernas no trabalho de Christoforou *et al.* (1996).

A aferição da intensidade e fluxo das correntes de ar deve ser feita de forma periódica. Conforme já observado, em diferentes épocas do ano os fluxos de ar se direcionam para áreas distintas, por vezes para fora ou para dentro da caverna (MANGIN; ANDRIEUX, 1988; CIGNA, 2004; COLLAZO *et al.*, 2007b; KOWALCZK; FROLICH, 2010). Face á esta sazonalidade, teoricamente, os impactos atmosféricos gerado pela presença humana podem adquirir padrão cumulativo em determinadas épocas, ao invés de dispersivo.

Os fluxos de água em direção às ressurgências do sistema também contribuem para a renovação da atmosfera cavernícola e para a dispersão dos impactos da visitação. A movimentação gera deslocamento de camadas de ar em contato com a água, além de alterar a sua temperatura e umidade (CIGNA, 1967, 2002a). Mesmo em cavernas com lagos em seu interior, a variação no nível d'água interfere na circulação atmosférica por "efeito pistão", gerando fluxos decorrentes de ar (PULIDO-BOSCH *et al.*, 1997).

De um modo geral, estes fluxos são classificados em níveis de de circulação de energia, com três classes distintas. O nível baixo de circulação de energia corresponde à mínima movimentação de água, como gotejamentos e escorrimentos. O nível moderado corresponde aos cursos d'água perenes e com movimentação regular. O nível alto corresponde aos cursos d'água que passam por inundações periódicas e/ou possuem



trechos encachoeirados, alterando periodicamente as condições naturais da atmosfera e até mesmo do meio físico, promovendo verdadeira renovação no ambiente (HEATON, 1986).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os padrões gerais de circulação atmosférica e suas relações com o manejo turístico de cavernas foram apresentados nesta revisão. Em sua maioria, as pesquisas já realizadas ocorreram em zonas temperadas do globo terrestre, com nítido enfoque para a temperatura do ar como parâmetro fundamental de aplicação ao manejo do turismo em cavernas, e com o CO<sub>2</sub> como segundo parâmetro em ordem de quantidade de estudos realizados. Muito provavelmente, o enfoque na temperatura e no CO<sub>2</sub> esteja relacionado às baixas temperaturas relativas das regiões temperadas em que os estudos foram conduzidos, associado à preocupação com a dissolução por corrosão de delicados espeleotemas e pinturas rupestres no interior de cavernas.

Por outro lado, é notável a lacuna existente sobre estudos que permitam a verificação dos atributos atmosféricos do espeleoclima em regiões tropicais e subtropicais, a exemplo do Brasil. Os estudos mais sistemáticos nestas regiões ainda são muito restritos, sendo poucos os exemplos de séries mais extensas de dados de monitoramento espeleoclimático no país, com no mínimo um ano de coleta em campo (e.g. CARVALHO, 2001; VIANA Jr., 2002; VERÍSSIMO *et al.*, 2003; BOGGIANI *et al.*, 2007; LOBO, 2011). Ainda assim, respostas pontuais têm sido obtidas por tais estudos, como a definição da capacidade de carga da gruta do Lago Azul (BOGGIANI *et al.*, 2007), em Bonito-MS, da caverna de Santana (LOBO, 2008, 2011), em Iporanga-SP e de diversas cavernas do Parque Estadual Intervalles-SP, com base nos estudos espeleoclimáticos de Rocha (2010) e outros estudos ambientais complementares. Todos estes trabalhos enfatizaram a temperatura do ar, por outros motivos, em função da grande dificuldade de se obter instrumentação adequada para o monitoramento de outros parâmetros atmosféricos compatíveis com as cavernas brasileiras, que em grande parte possuem condição constante de saturação hídrica. Desta forma, conclui-se pela importância de realização de novos e contínuos estudos espeleoclimáticos no Brasil, para permitir um conhecimento mais amplo sobre a sua variabilidade espeleoclimática e futuras comparações com estudos realizados em outros países, além do desenvolvimento de novos métodos focados na conservação do ambiente cavernícola.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, R. The misuse of mathematics. In: EMMER, M.; QUARTERONI, A. (Eds.) *Mathknow: Mathematics, applied sciences and real life*. Milão: Springer, 2009. v.3, p.1-8.

ALBERIGI, S. *Avaliação da exposição ao  $^{222}\text{Rn}$  nas cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR)*. 2006. 63 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisa em Energia Nuclear, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

ALBERIGI, S.; PECEQUILO, B.R.S. Níveis de Radônio em cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). *Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas*, Campinas, v.1, n.1, p.43-55, 2008.

BADINO, G. Cave temperatures and global climatic change. *International Journal of Speleology*, Bologna, v.33, n.1, p.103-114, 2004.

BADINO, G. The legend of carbon dioxide heaviness. *Journal of Cave and Karst Studies*, Huntsville, v.71, n.1, p.100-107, 2009.

BADINO, G. Underground meteorology – “What’s the weather underground?”. *Acta Carsologica*, Postojna, v.39, n.3, p.427-448, 2010.

BAILEY, W.G. Microclimatology. In: OLIVER, J.E. (Ed.) *Encyclopedia of world climatology*. Dordrecht: Springer, 2005. p.486-499.

BAKER, A.; GENTY, D. Environmental pressures on conserving cave speleothems: effects of changing surface land use and increased cave tourism. *Journal of Environmental Management*, v.53, p.165-175, 1998.

BASTIAN, F.; ALABOUVETTE, C. Lights and shadows on the conservation of a rock art cave: the case of Lascaux cave. *International Journal of Speleology*, Bologna, v.38, n.1, p.55-60, 2009.

BATIOT-GUILHE, C.; SEIDEL, J.L.; JOURDE, H.; HÉBRARD, O.; BAILLY-COMTE, V. Seasonal variations of  $\text{CO}_2$  and  $^{222}\text{Rn}$  in a Mediterranean sinkhole – spring (Causse d’Aumelas, SE France). *International Journal of Speleology*, Bologna, v.36, n.1, p.51-56, 2007.

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.

BOURGES, F.; MANGIN, A.; D'HULST, D. Le gaz carbonique dans la dynamique de l'atmosphère des cavités karstiques: l'exemple de l'Aven d'Ornac (Ardèche). *Earth and Planetary Sciences*, v.333, p.685-692, 2001.

BOURGES, F.; GENTHON, P.; MANGIN, A.; D'HULST, D. Microclimates of l'Aven d'Ornac and other French limestone caves (Chauvet, Esparros, Marsoulas). *International Journal of Climatology*, v.26, p.1651-1670, 2006.

BUECHER, R.H. Microclimate study of Kartchner caverns, Arizona. *Journal of Cave and Karst Studies*, Huntsville, v.61, n.2, p.108-120, 1999.

CABROL, P. Protection of speleothems. In: HILL, C.A.; FORTI, P. *Cave minerals of the world*. Huntsville: NSS, 1997. p. 294-300.

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.

CAMPOS, M.P.; PECEQUILO, B.R.S.; ALBERIGI, S.; MAZZILLI, B.P. Thoron exposure among tour guides in southern Brazilian show caves. *International Journal Low Radiation*, v.3, n.2/3, p.217-223, 2006.

CARRASCO, F.; VADILLO, I.; LIÑÁN, C.; ANDREO, B.; DURÁN, J.J. Control of environmental parameters for management and conservation of Nerja cave (Malaga, Spain). *Acta Carsologica*, Ljubljana, v.31, n.1, p.105-122, 2002.

CARVALHO, S.M. Microclimatologia subterrânea da gruta Olhos d'Água (Castro, PR). In: DITZEL, C. de H.M.; SAHR, C.L.L. *Espaço e cultura: Ponta Grossa e os Campos Gerais*. Ponta Grossa: UEPG, 2001. p.443-462.

CÉSAR JÚNIOR, N. da S. Estudo meteorológico do laboratório subterrâneo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 14, Belo Horizonte. *Anais*. Belo Horizonte: SBE/CPG, 1980. p.140-147.

CHOPPY, J.; CIGNA, A.A. Proposition pour une etude micro-climatique en zones souterraines profondes. *International Journal of Speleology*, Bologna, v.23, n.1/2, p.91-93, 1994.

CHRISTOFOROU, C.S.; SALMON, L.G.; CASS, G.R. Air exchange within the Buddhist cave temples at Yungang, China. *Atmospheric Environment*, v.30, n.23, p. 3995-4006, 1996.

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. Modern trend in cave monitoring. *Acta Carsologica*, Ljubljana, v.31, n.1, p.35-54, 2002a.

CIGNA, A. A. Monitoring of caves: conclusions and recommendations. *Acta Carsologica*, Ljubljana, v.31, n.1, p.175-177. 2002b.

CIGNA, A.A. Climate of caves. In: GUNN, J. (Ed.) *Encyclopedia of caves and karst science*. London: Taylor & Francis, 2004. p.467-475.

CIGNA, A. A. Radon in caves. *International Journal of Speleology*, Bologna, v.34, n.1/2, p.1-18, 2005.

CIGNA, A.A.; CHOPPY, J. The climate in deep zones of karst. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL CHANGES IN KARST AREAS, 1, 2001, Padova. *Proceedings of...* Padova: IGU/UIS, 2001. p.305-306.

CIGNA, A.A.; FORTI, P. The speleogenetic role of air flow caused by convection. 1<sup>st</sup>. contribution. *International Journal of Speleology*, Bologna, v.15, p.41-52, 1986.

CIGNA, A.A.; FORTI, P. The environmental impact assessment of a tourist cave. In: UIS (ed.) CAVE TOURISM INTERNATIONAL SYMPOSIUM AT-170 ANNIVERSARY OF POSTOJNSKA JAMA, 1988, Postojna (Yugoslavia), *Proceedings*. Postojna: UIS, 1988. p. 29-38.

CIGNA, A.A.; BURRI, E. Development, management and economy of show caves. *International Journal of Speleology*, Bologna, v.29, n.1, p.1-27, 2000.

COLLAZO,V.O.; ORTIZ DE PINEDO, J.L.; RUIZ, R.M. Estudio del microclima de la cueva de Mendukilo. Astiz. Nafarroa. Periodo Enero – Diciembre 2006. *Sociedad de ciências espeológicas Alfonso Antxia*. Disponível em <<http://www.sociedadalfonsoantxia.org/Mendukilo.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2007a. p.1-47.

COLLAZO,V.O.; ORTIZ DE PINEDO, J.L.; RUIZ, R.M. Estudio del microclima de la cueva Pozalagua. Período de medición 2004-2006. *Sociedad de ciências espeológicas Alfonso Antxia*. Disponível em <<http://www.sociedadalfonsoantxia.org/Estudio%20del%20microclima%20de%20la%20cueva%20de%20%20Pozalagua%202004-2006.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2007b. p.1-53.

CRAVEN, S.A.; SMITH, B.J. Radon in caves: clinical aspects. *International Journal of Speleology*, Bologna, v.35, n.2, p.93-101, 2006.

CULVER, D.C.; SKET, B. Biological monitoring in caves. *Acta Carsologica*, Ljubljana, v.31, n.1, p.55-64, 2002.

DRAGOVITCH, D.; GROSE, J. Impact of tourism in carbon dioxide levels at Jenolan caves, Australia: an examination of microclimatic constraints on tourist cave management. *Geoforum*, v.21, n.1, p.111-120, 1990.

DREYBRODT, W.; GRABROVSEK, F.; PERNE, M. Condensation corrosion: a theoretical approach. *Acta Carsologica*, Ljubljana, v.34, n.2, p.317-348, 2005.

DUBLYANSKY, V.N.; DUBLYANSKY, Y.V. The problem of condensation in karst studies. *Journal of Cave and Karst Studies*, Huntsville, v.60, n.1, p.3-17, 1998.

ERASO, A. La corrosión climática em las cavernas. *Boletín Geológico y Minero*, v.80, n.6, p.564-581, 1969.

FAIMON, J.; STELEL, J.; SAS, D. Anthropogenic CO<sub>2</sub>-flux into cave atmosphere and its environmental impact: a case study in the Cisarska cave (Moravian Karst, Czech Republic). *Science of the Total Environment*, v.369, p.231-245, 2006.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. *Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico*. 2004. 424 p. Tese (Doutorado em Hidrogeologia e Química Analítica) – Universidad de Almería, Almería. 2004.

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, 2006a.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; SÁNCHEZ-MARTOS, F. Spatiotemporal analysis of air condition as a tool for the environmental management of a show cave (Cueva del Agua, Spain). *Atmospheric Environment*, v.40, p. 7378-7394, 2006b.

FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CALAFORRA, J.M.; JIMÉNEZ-ESPINOSA, R.; SÁNCHEZ-MARTOS, F. Geostatistical spatiotemporal analysis of air temperature as an aid to delineating thermal stability zones in a potential show cave: implications for environmental management. *Journal of Environmental Management*, v.81, p.371-383, 2006c.

FOKEN, T. *Micrometeorology*. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 306 p.

FORBES, J. Air temperature and relative humidity study: Torgac cave, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, Huntsville, v.60, n.1, p.27-32, 1998.

FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. 2.ed. rev. e atual. West Sussex: Wiley, 2007. 562 p.

FORTI, P. Speleothems (palestra). INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. CD-ROM. Kerrville: UIS/NSS, 2009.

FREITAS, C.R. de; SCHMEKAL, A. Condensation as a microclimate process: measurement, numerical simulation and prediction in the Glowworm cave, New Zealand. *International Journal of Climatology*, v.23, p.557-575, 2003.

FREITAS, C.R. de; SCHMEKAL, A. Studies of condensation/evaporation processes in the Glowworm cave, New Zealand. *International Journal of Speleology*, Bologna, v.35, n.2, p.75-81, 2006.

GEIGER, R. Microclimatology. In: MALONE T.F. (ed.) *Compendium of meteorology*. Boston: American Meteorological Society, 1951. p. 993-1003.

HAKL, J.; CSIGE, I.; HUNYADI, I.; VÁRHEGYI, A.; GÉCZY, Z. Radon transport in fractured porous media – experimental study in caves. *Environmental International*, v.22, n.1, p.433-437, 1996.

HEATON, T. Caves: a tremendous range in energy environments on earth. *National Speleological Society News*, Huntsville, v.08, n.44, p.301-304, 1986.

HILL, C.A.; FORTI, P. *Cave minerals of the world*. Huntsville: NSS, 1997. 464 p.

HOENEN, S.; MARQUES, M.D. Adaptação temporal e o ambiente cavernícola: uma interpretação. *Biotemas*, v.13, n.1, p.129-144, 2000.

HOYOS, M.; SOLER, V.; CAÑAVÉRAS, 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.

JAMES, J. Tourist caves: air quality. In: GUNN, J. (Ed.) *Encyclopedia of caves and karst science*. London: Taylor & Francis, 2004a. p.1561-1563.

JAMES, J. Carbon dioxide-enriched cave air. In: GUNN, J. (Ed.) *Encyclopedia of caves and karst science*. London: Taylor & Francis, 2004b. p.376-378.

JAMES, J. Condensation corrosion. In: GUNN, J. (Ed.) *Encyclopedia of caves and karst science*. London: Taylor & Francis, 2004c. p.492-494.

KOWALCZK, A.J.; FROLICH, P.N. Cave air ventilation and CO<sub>2</sub> outgassing by radon-222 modeling: how fast do caves breathe? *Earth and Planetary Science Letters*, v.289, p.209-219, 2010.

KRANJC, A.; OPARA, B. Temperature monitoring in Skocjanske Jame caves. *Acta Carsologica*, Ljubljana, v.31, n.1, p.85-96, 2002.

LARIO, J.; SOLER, V. Microclimate monitoring of Pozalagua cave (Vizcaya, Spain): Application to management and protection of show caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, Huntsville, v.72, n.3, p.169-180, 2010.

LENTON, T.M. Gaia and natural selection. *Nature*, v.394, p.439-447, 1998.

LIÑÁN, C.; VADILLO, I.; CARRASCO, F. Carbon dioxide concentration in air within the Nerja cave (Malaga, Andalusia, Spain). *International Journal of Speleology*, v.37, n.2, p.99-106, 2008.

LOBO, H.A.S. Capacidade de carga real (CCR) da caverna de Santana, PETAR-SP e indicações para o seu manejo turístico. *Geociências*, Rio Claro, v.27, n.3, p.369-385, 2008.

LOBO, H.A.S. *Estudo da dinâmica atmosférica subterrânea na determinação da capacidade de carga turística na caverna de Santana (PETAR, Iporanga-SP)*. 2011. 392 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2011.

LOBO, H.A.S.; ZAGO, S. Iluminação com carbureteiras e impactos ambientais no microclima de cavernas: estudo de caso da lapa do Penhasco, Buritinópolis-GO. *Geografia*, Rio Claro, v.35, n.1, p.183-196, 2010.

LOVELOCK, J. *Gaia: cura para um planeta doente*. São Paulo: Cultrix, 2006. 192 p.

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.

LUETSCHER, M.; LISMONDE, B.; JEANNIN, P.Y. Heat exchanges in the heterothermic zone of a karst system: Monlesi cave, Swiss Jura mountains. *Journal of Geophysical Research*, v.113, p.1-13, 2008.

MANGIN, A. Cave management, visitation limits and environmental preserving. In: BELLA, P.; GAZIK, P.; VLCEK, L. (Eds.). INTERNATIONAL SHOW CAVES ASSOCIATION CONGRESS, 6, 2010, Liptovsky Mikulas. *Abstracts Excursion Guide*. Liptovsky Mikulas: Slovak Caves Administration, 2010. p.25.



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.

MANGIN, A.; BOURGES, F.; D'HULST, D. La conservation des grottes ornées: um problème de stabilité d'un système naturel (l'exemple de la grotte préhistorique de Gargas, Pyrénées françaises). *Earth and Planetary Sciences*, London, p.295-301, 1999.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206p.

MERTZ, O.; HALSNÆS, K.; OLESEN, J.E.; RASMUSSEN, K. Adaptation to climate change in developing countries. *Environmental Management*, v.43, p.743-752, 2009.

MILANOLO, S.; GRABROVSEK, F. Analysis of carbon dioxide variations in the atmosphere of Srednja Bijambarska cave, Bosnia and Herzegovina. *Boundary-Layer Meteorology*, v.131, p.479-493, 2009.

MOREIRA, J.R. de A.; TRAJANO, E. Estudo do topoclima de cavernas da província espeleológica arenítica Altamita-Itaituba, Pará. *Espeleo-Tema*, São Paulo, v.16, p.75-82, 1992.

PALMER, A.N. *Cave geology*. Dayton: Cave Books, 2007. 454 p.

PIASECKI, J.; SAWINSKI, T.; STRUG, K.; ZELINKA, J. Selected characteristics of the microclimate of the Demänovská Ice cave (Slovakia). In: ZELINKA, J. (Ed.) INTERNATIONAL WORKSHOP ON ICE CAVES, 2, Liptovsky Mikulas, 2006. *Proceedings*. Liptovsky Mikulas, Slovak Caves Administration, 2006. p.50-61.

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.

PFLITSCH, A.; PIASECKI, J.; SAWINSKI, T.; STRUG, K.; ZELINKA, J. Development and degradation of ice crystals sediment in Dobsinska ice cave (Slovakia). In: ZELINKA, J. (Ed.) INTERNATIONAL WORKSHOP ON ICE CAVES, 2, Liptovsky Mikulas, 2006. *Proceedings*. Liptovsky Mikulas, Slovak Caves Administration, 2006. p.38-49.

PFLITSCH, A.; WILES, M.; HORROCKS, R.; PIASECKI, J.; RINGEIS, J. Dynamic climatologic processes of barometric cave systems using the example of Jewel cave and wind cave in South Dakota, USA. *Acta Carsologica*, Postojna, v.39, n.3, p.449-462, 2010.

POULSON, T.L.; WHITE, W.B. The cave environment. *Science*, v.165, n.3867, p.971-981, 1969.

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.

QUEEN, J.M. *A discussion and field guide to the geology of Carlsbad caverns*. Carlsbad: NPS, 1981. 64 p.

QUEEN, J.M. Post-drainage evolution of the caves of the Guadalupe mountains, Southeastern New Mexico and West Texas, USA. In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. *Proceedings*. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.1, p.964-970.

RACOVITA, G. La classification topoclimatique des cavités souterraines. *Travaux de L'Institute de Speologie Emil Racovita*, v.14, p.197-216, 1975.

ROCHA, B.N. *Estudo microclimático do ambiente de cavernas, Parque Estadual Intervales, SP*. 2010. 107 p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

RUSSELL, M.J.; MACLEAN, V.L. Management issues in a Tasmanian tourist cave: potential microclimatic impacts of cave modifications. *Journal of Environmental Management*, v.87, p.474-483, 2007.

SÁNCHEZ-MORAL, S.; SOLER, V.; CAÑEVERAS, J.C.; SANZ-RUBIO, E.; VAN GRIEKEN, R.; GYSELS, K. Inorganic deterioration affecting Altamira cave, N Spain: quantitative approach to wall-corrosion (solutional etching) processes induced by visitors. *The Science of the Total Environment*, v.243/244, p.67-84, 1999.

SARBU, S.M.; LASCU, C. Condensation corrosion in Movile cave, Romania. *Journal of Cave and Karst Studies*, Huntsville, v.59 n.3, p.99-102, 1997.

SIMON, K.S.; PIPAN, T.; CULVER, D.C. A conceptual model of the flow and distribution of organic carbon in caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, Huntsville, v.69, n.2, p.279-284, 2007.

SONG, L.; WEI, X.; LIANG, F. The influences of cave tourism on CO<sub>2</sub> and temperature in Baiyun Cave, Hebei, China. *International Journal of Speleology*, Bologna, v.29, n.1, p.77-87, 2000.

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.

TARHULE-LIPS, R.F.A.; FORD, D.C. Condensation corrosion in caves on Cayman Brac and isla de Mona. *Journal of Cave and Karst Studies*, Huntsville, v.60, n.2, p.84-95, 1998.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M.E. *Biologia subterrânea: introdução*. São Paulo: Redespeleo, 2006. 92 p.

VERÍSSIMO, C.U.V.; SOUZA, A.E.B.A.; RICARDO, J.M.; BARCELOS, A.C.; NOGUEIRA NETO, J.A.; REIS, M.G. Microclima e espeleoturismo na gruta de Ubajara, CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 27, Januária. *Anais*. Januária: SBE, 2003. p.1-9.

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.

VILLAR, E; FERNANDEZ, P.L.; QUINDOS, L.S.; SOLANA, J.R.; SOTO, J. Air temperatura and air interchanges at Altamira cave (Spain). *Cave Science*, v.11, n.2, p.92-98, 1984a.

VILLAR, E; BONET, A.; DIAZ-CANEJA,, B.; FERNANDEZ, P.L.; GUTIERREZ, I.; QUINDOS, L.S.; SOLANA, J.R.; SOTO, J. Ambient temperature variations in the hall of paintings of Altamira cave due to the presence of visitors. *Cave Science*, v.11, n.2, p.99-104, 1984b.

WATSON,A.J.; LOVELOCK, J.E. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. *Tellus*, v.35B, p.284-289, 1983.

WILLIAMS, G.C. Gaia, nature worship and biocentric fallacies. *The Quarterly Review of Biology*, v.67, n.4, p.479-486, 1992.

ZAVATTINI, J.A. *Estudos do clima no Brasil*. Campinas: Alínea, 2004. 398p.

ZELINKA, J. Microclimatic research in the Slovakian show caves. *Acta Carsologica*, Ljubljana, v.31, n.1, p.151-163, 2002.

**Artigo recebido em 04/01/2012.**

**Artigo aceito em 22/02/2012.**