

**ESTUDO ESPELEOCLIMÁTICO DA DINÂMICA DE TROCA GASOSA EM
ESTRATIFICAÇÃO VERTICAL ENTRE A SUPERFÍCIE E DUAS CAVIDADES
NATURAIS NO SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES – SÃO
DESIDÉRIO, BA**

RELATÓRIO FINAL

Coordenação e execução: Heros Augusto Santos Lobo
Apoio em campo: Renato Barros Coelho
Jussyclebson de Souza

**SÃO PAULO
MARÇO/2012**

1. INTRODUÇÃO

Os estudos do espeleoclima vêm sendo amplamente utilizados em diversas cavernas do mundo com objetivos como: o estudo da dinâmica da atmosfera subterrânea; as pesquisas de paleoambientes e de modelagem climática para fins de compreensão do aquecimento global atual; e para o manejo sustentável do espeleoturismo.

No Brasil, os estudos espeleoclimáticos ainda são poucos, se tratando de um campo recente de investigações espeleológicas e com amplas possibilidades de expansão. Os trabalhos mais extensos e consistentes já realizados no país foram realizados por Carvalho (2001), realizado em 1991-1992, na gruta Olhos d'Água, em Castro-PR; Boggiani et al. (2007), realizado em 1999, nas grutas do Lago Azul e Nossa Senhora Aparecida, em Bonito-MS; Viana Jr. (2002), realizado em 2002, na caverna de Santana, em Iporanga-SP; Rocha (2010), realizado em 2009 em 10 cavernas do Parque Estadual Intervales, em Ribeirão Grande-SP; e Lobo (2011), realizado em 2008-2010, na caverna de Santana, em Iporanga-SP.

Estes estudos focaram no monitoramento higrotérmico (temperatura do ar e umidade relativa do ar), à exceção de Carvalho (2001), que também incluiu a pressão atmosférica e de Lobo (2011), que abordou também a pressão atmosférica, a concentração de gás carbônico e os fluxos de ar.

De um modo geral, predominam nestes estudos a caracterização descritiva das variáveis pesquisadas e, em alguns casos (e.g. Boggiani et al., 2007), a sua correlação com a presença de pessoas para fins de análise de impacto da visitação turística em cavernas. Raramente se encontra um enfoque na interpretação da dinâmica de circulação atmosférica no ambiente, tal como foi realizado em Lobo (2011). Este enfoque é primordial para as constatações posteriores acerca de eventuais impactos da visitação, pois além da percepção e análise da estabilização dos parâmetros aferidos para a identificação da intensidade de impactos no ambiente, é preciso conhecer quais os fluxos preferenciais e tendências da atmosfera subterrânea – dispersiva ou cumulativa –, para uma compreensão ampla das possibilidades de suporte do ambiente à visitação, tal como executado em Lobo; Zago (2010) e Lobo (2011).

Neste panorama mundial e buscando ampliar o contexto de pesquisas em território nacional, o presente estudo, de caráter exploratório, descritivo e experimental, se pauta nos seguintes objetivos:

- Estabelecer uma primeira análise da dinâmica de troca atmosférica entre o microclima de superfície e a porção proximal das cavidades naturais localizadas no fundo de duas dolinas no sistema cárstico do rio João Rodrigues
- Identificar o grau de interferência da atmosfera externa na água deste rio em uma destas dolinas, no Lago do Cruzeiro
- Estabelecer uma linha de base da atmosfera subterrânea destas duas cavernas, para subsidiar futuros estudos focados em sua capacidade de carga, no caso de serem utilizadas para a visitação turística.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

De um modo geral, os estudos espeleoclimáticos ainda são pouco frequentes no Brasil, quer na quantidade de estudos realizados, quer – e principalmente – em sua

extensão temporal. As cavernas com estudos mais extensos são aquelas que possuem visitação turística, como é caso dos estudos da gruta de Ubajara, Ceará (VERÍSSIMO et al., 2003, 2005), gruta do Lago Azul, Mato Grosso do Sul (BOGGIANI et al., 2007), gruta de Botuverá, Santa Catarina (RABELO et al., 2003) e a caverna de Santana, São Paulo (LOBO, 2011), entre outros poucos exemplos. Raras são as exceções de estudos feitos em cavernas antes de sua abertura formal para a visitação, como é o caso das grutas Olhos d'Água, no Paraná (CARVALHO, 2001) e Nossa Senhora Aparecida, no Mato Grosso do Sul (BOGGIANI et al., 2007).

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). 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.

A análise da atmosfera subterrânea é feita com base no monitoramento contínuo de seus parâmetros físicos e químicos. As principais variáveis consideradas nos estudos atmosféricos são a temperatura do ar, a temperatura das rochas, espeleotemas e/ou do solo, a temperatura da água, a umidade relativa e absoluta do ar, a pressão atmosférica, os fluxos de água e de ar, as taxas de concentração de CO₂ e de radônio (²²²Rn) e a condensação nas paredes, teto e espeleotemas (e.g. VILLAR et al., 1984a, b; MANGIN; ANDRIEUX, 1988; SÁNCHEZ-MORAL et al., 1999; PULIDO-BOSCH et al., 1997; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006; LUETSCHER; JEANNIN, 2004).

Diversos fatores interferem na variabilidade da dinâmica atmosférica destes elementos, tais como o confinamento espacial, a estratificação vertical, a movimentação relativamente pequena de massa e energia, a menor disponibilidade ou ausência total de luz e a 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; BADINO, 2009).

A estabilidade do espeleoclima e a circulação de ar no interior de uma caverna 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** 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.

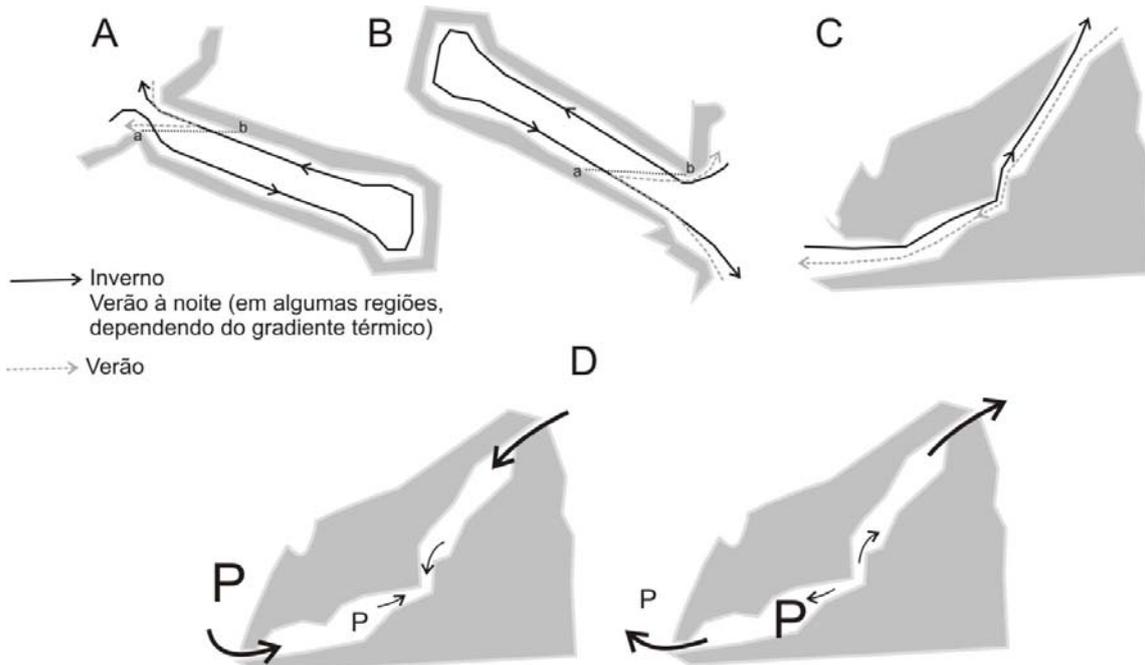


Figura 1: Modelo conceitual baseado em Eraso (1969), Mangin; Andrieux (1988) e Cigna (2004), sem escala e com exagero vertical em A e B, ilustrando em cortes transversais diferentes padrões de circulação atmosférica subterrânea. Em A e B, cavernas tipo “saco de ar”, sendo A – armadilha para o ar frio; 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.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

A presente pesquisa foi desenvolvida no sistema cárstico do rio João Rodrigues, localizado no município de São Desidério, Oeste da Bahia (Figura 2). A região está inserida em meio à interface do afloramento dos arenitos do Grupo Urucuia com os carbonatos da Formação São Desidério do Grupo Bambuí (CAMPOS; DARDENNE, 1997). A região é rica em cavernas, com destaque para os grandes volumes subterrâneos e/ou na zona de transição entre a superfície e a sub-superfície, gerados por dolinamentos e salões de abatimento.

O clima da região oeste da Bahia, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, um clima tropical com inverno seco. O regime das chuvas é bem definido, com um verão chuvoso entre outubro e abril e um inverno seco entre maio e setembro. As médias de temperatura variam entre 20 °C e 26 °C, com máximas de 42 °C e mínimas de 13,3 °C. A umidade relativa do ar varia entre 50% e 80%. A precipitação média anual para a região de Barreiras – onde São Desidério está incluído – é da ordem de 900 – 1000 mm, mas distribuída de forma bastante irregular. No período chuvoso, as médias mensais chegam a 250 mm, quase 25% do total para o ano, e tendendo à zero no período seco (GASPAR, 2006).

ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DOS ESTUDOS DE ESPELEOCLIMA

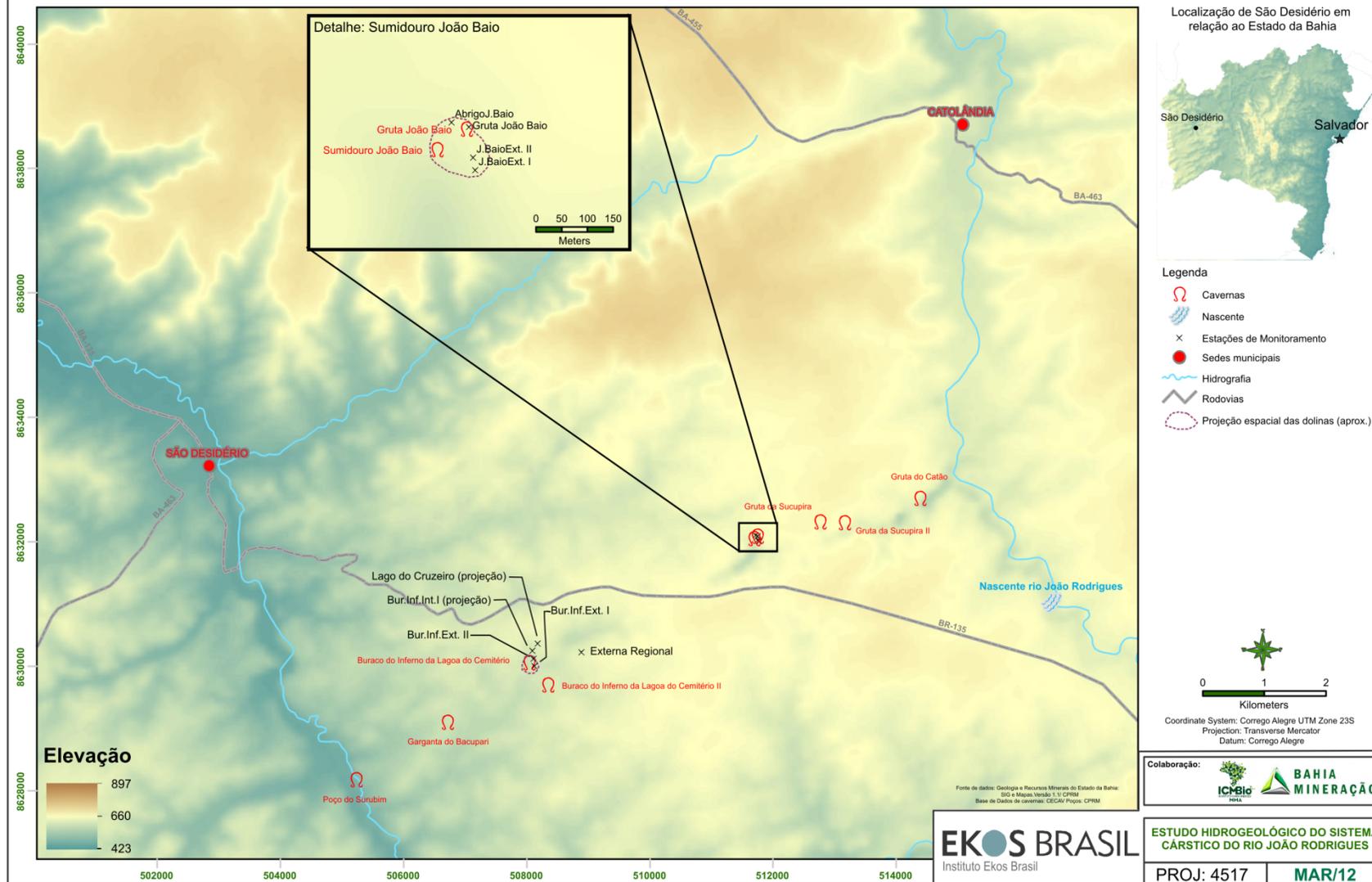


Figura 2: Mapa de localização das estações de monitoramento espeleoclimático no sistema cárstico do rio João Rodrigues – São Desidério, BA

Conforme dados fornecidos pelo INEMA (2012), durante o monitoramento realizado houve grande estiagem na região, sem nenhum registro de chuvas para os meses de julho, agosto e setembro. A chuva foi registrada apenas em outubro (Figura 3).

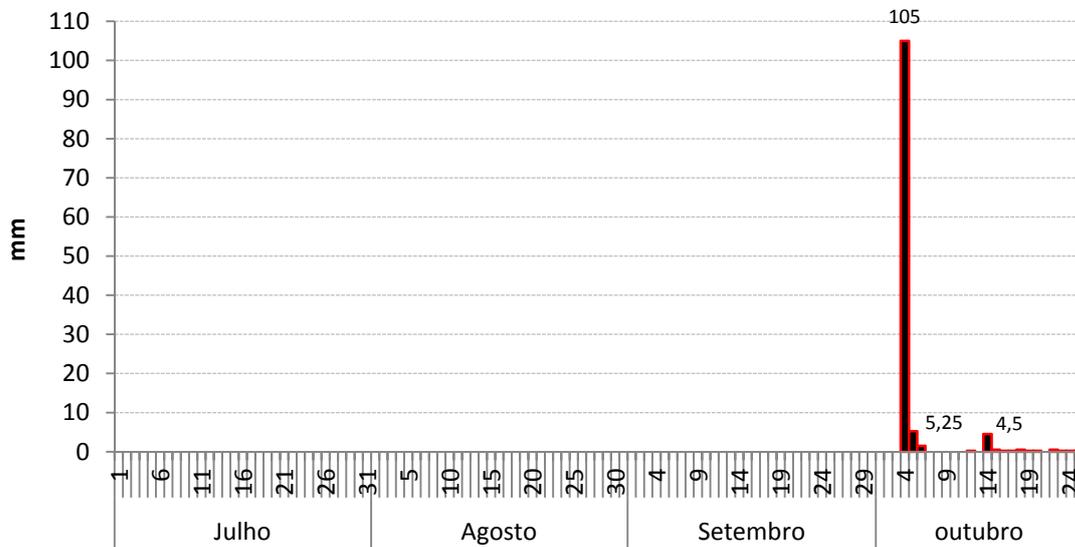


Figura 3: Registro de chuva diária para São Desidério (Estação Roda Velha – GR-CR-01)

Como se observa, a quebra da estiagem se deu com um evento extremo de precipitação, de 105 mm, seguido por chuvas diárias menores, entre 0,25 mm e 5,25 mm nos dias subsequentes, marcando o fim do período anual de estiagem na região. Assim, pode-se dizer que os dados coletados são representativos para a caracterização da dinâmica atmosférica nas dolinas e cavernas monitoradas para o período da estiagem.

3.2. DELIMITAÇÃO METODOLÓGICA

Certamente, o uso de todas as variáveis atmosféricas citadas no referencial teórico e a correlação dos diversos fatores que controlam sua dinâmica de variabilidade requerem estudos amplos, temporal e espacialmente. A realização de tais estudos está atrelada, principalmente, à disponibilidade recursos e a necessidade de obtenção de modelos atmosféricos mais amplos, em estudos de longo termo.

Para o presente estudo de caráter experimental, foram selecionadas duas variáveis, as quais permitem traçar indicativos preliminares acerca da movimentação gasosa em ambientes confinados ou semi-confinados: a temperatura e a umidade relativa do ar. Paralelamente, foi feito também o monitoramento da temperatura da água no lago do Cruzeiro (no interior do buraco do inferno da Lagoa do Cemitério), buscando identificar algumas possibilidades acerca da interação termal do sistema ar-água. Inicialmente, foi proposta a realização de um monitoramento concomitante da temperatura da superfície de rocha, mas o instrumento utilizado para tal foi submerso em uma cheia excepcional na gruta do João Baio, deixando de funcionar e perdendo todos os dados registrados (ar, água e rocha – Figura 4).



Figura 4: Local de instalação de termômetro com *datalogger* (esquerda), com sonda de imersão na água e sonda tipo braçadeira, em um espeleotema na parede; e instrumento retirado em outubro/2011 de campo, com sinais de submersão e incrustação carbonática nos cabos das sondas e caixa de proteção (direita).

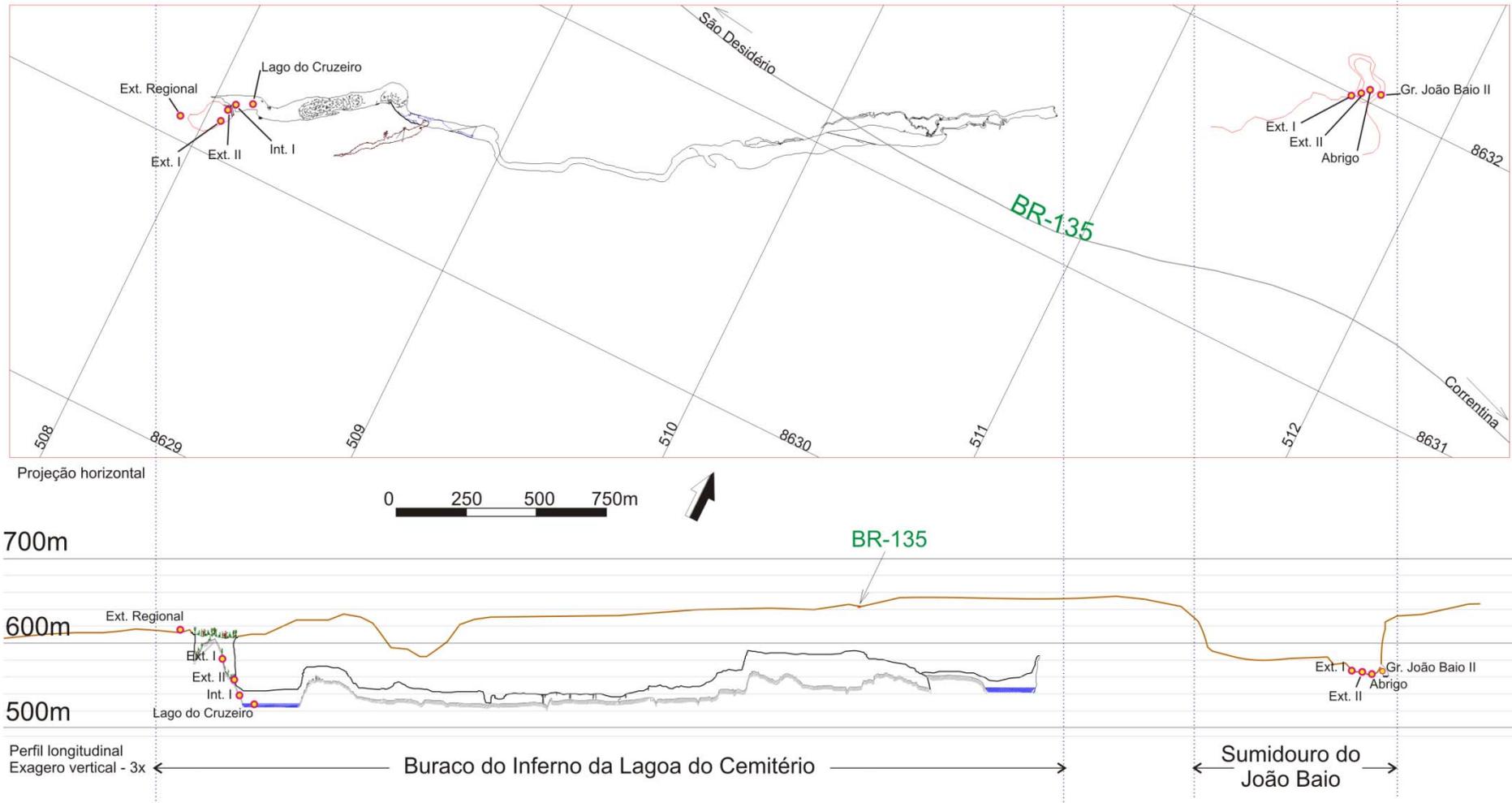
Ao todo, foram instaladas 10 estações de monitoramento, tal como descrito na Tabela 1 e exposto nas Figuras 2 e 5. O monitoramento foi realizado entre os dias 15 de julho e 25 de outubro de 2011, totalizando 103 dias e 4942 registros para cada variável por estação de coleta. Exceção deve ser feita à estação Lago do Cruzeiro, que deixou de registrar os dados desde o dia 5 de outubro até o final do período de monitoramento.

Tabela 1: Relação das estações de monitoramento espeleoclimático

Código	Dados de Localização*		
	UTM x	UTM y	alt. (m)
Externa Regional	0507964	8630204	607
Ext. I Buraco do Inferno	0508895	8630222	571
Ext. II Buraco do Inferno	0508101	8630230	558
Int. I Buraco do Inferno	No interior da cavidade natural, no desnível de acesso ao lago do Cruzeiro.		
Int. II Buraco do Inferno	Lago do Cruzeiro.		
Externa I João Baio	0511768	8632009	591
Externa II João Baio	0511764	8632033	575
Abrigo João Baio	0511722	8632101	566
Gruta João Baio**	0511756	8632092	574
Gruta João Baio	No interior da cavidade, no fundo do primeiro salão.		
Sifão João Baio	No interior da cavidade, próximo à água, no final da parte seca (Figura 2). Estação não funcionou, equipamento foi danificado.		

* Coordenadas UTM com uso do Datum SAD 69.

** Coordenadas da entrada da cavidade natural.



Mapa base do sistema: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas Organização cartográfica: Heros Lobo

Figura 5: Projeção das estações de monitoramento espeleoclimático em planta e perfil nas dolinas e cavernas pesquisadas do sistema cárstico do rio João Rodrigues – São Desidério, BA

A delimitação do estudo considerou a necessidade de uma melhor compreensão das trocas atmosféricas entre a zona termoclimática externa e a zona transicional (cf. classificação de LOBO *et al.*, 2009), um importante subsídio para a compreensão da dinâmica do sistema. As escalas de trabalho se diferenciaram em função das particularidades de cada uma das cavernas enfocadas. Na gruta do João Baio, o estudo pode ser considerado intensivo, em função das pequenas dimensões desta cavidade. No buraco do inferno da Lagoa do Cemitério, o estudo foi extensivo em relação à totalidade da caverna, mas intensivo na região de maior troca gasosa, a zona transicional, que permite uma interpretação do padrão dispersivo e/ou cumulativo para o restante da cavidade. A tendência é que após um primeiro trecho de uma cavidade subterrânea, os seus parâmetros atmosféricos sejam mais estáveis, sobretudo ao adentrarem na zona térmica típica (LOBO *et al.*, 2009).

No caso das cavidades do sistema cárstico João Rodrigues, a sua conformação fisiográfica – cavidades naturais no fundo de grandes dolinas de abatimento – permitiu e suscitou a necessidade de uma compreensão da troca gasosa entre a superfície, o transecto vertical e a cavidade ao fundo (Figura 5), de forma a permitir a interpretação da estratificação vertical da variabilidade espeleoclimática (cf. TARHULE-LIPS; FORD, 1998; LUETSCHER; JEANNIN, 2004; BOURGES *et al.*, 2006; BADINO, 2009), o que no caso específico em questão, é fundamental para a compreensão do sistema atmosférico subterrâneo.

3.3. INSTRUMENTOS UTILIZADOS E PONTOS DE MONITORAMENTO

Para a execução do monitoramento higrotérmico foram utilizados equipamentos da marca Testo, modelos 175-H1 (série antiga e nova) e 177-H1 e T2. Além disto, foram também utilizadas sondas externas de temperatura, para a água e a superfície de rocha. As principais características técnicas destes instrumentos são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características técnicas principais dos instrumentos utilizados no monitoramento higrotérmico

Instrumento	Capacidade de Memória	Acurácia	Resolução
Testo 175-H1	16.000	T 0,2 °C UR 2%	T 0,1 °C UR 0,1%
Testo 177-H1	48.000	T 0,2 °C UR 0,5%	T 0,1 °C UR 0,1%
Testo 177-T2*	48.000	T 0,1 °C	T 0,1 °C
Testo 175-H1 nova série	2.000.000	T 0,2 °C UR 2%	T 0,1 °C UR 0,1%
Sonda de imersão*	-	T 0,2 °C	T 0,1 °C
Sonda de superfície*	-	T 0,2 °C	T 0,1 °C

* Instrumentos que apresentaram problemas em campo, pela imersão.

Os instrumentos foram distribuídos em duas cavidades do sistema João Rodrigues: o Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério e o sumidouro do João Baio e a gruta do João Baio II. Em ambos os casos, e considerando não somente o estudo da troca gasosa no gradiente vertical, mas também os estudos mais amplos de hidrogeologia do sistema, o limite para a instalação de instrumentos nas cavidades foi a coluna d'água em sua porção proximal ao pórtico de cada cavidade.

3.4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

3.4.1. Análise dos dados atmosféricos por estação de monitoramento

O primeiro conjunto de análises aplicado foi a estatística descritiva. Por meio dela, foram obtidas as medidas de tendência central – média, moda e mediana – e de variabilidade – amplitude, desvio padrão e variância – para cada série de dados. Este procedimento permitiu uma primeira compreensão do sistema atmosférico estudado, bem como a obtenção das simplificações necessárias para as análises estatísticas subsequentes.

A análise dos parâmetros espeleoclimáticos foi realizada também por meio de procedimentos estatísticos específicos para séries temporais. Este tipo de análise é bastante usual tanto em trabalhos de hidrogeologia (e.g. MANGIN, 1984; LAROCQUE et al., 1998; MANGIN et al., 1999; FERRARI; KARMANN, 2008) quanto de climatologia (e.g. CALAFORRA et al., 2003; FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2006).

Uma série temporal é um arranjo quantitativo de um conjunto de dados ordenados de forma cronológica. A ideia básica da organização dos dados em função do tempo parte do princípio de que é possível decompor as séries temporais em um número finito de componentes independentes e não observáveis diretamente, que podem ser calculados antecipadamente. A condição para tanto é a existência de diferentes fatores independentes que interfiram na variável em questão (KIRCHGÄSSNER; WOLTERS, 2007). Outra característica deste tipo de análise, presente em dados atmosféricos, é sua baixa linearidade, apoiada em princípios de sistemas caóticos, onde uma alteração de qualquer magnitude em apenas uma variável pode alterar todo o modelo desenvolvido (STORCH; ZWIERS, 1999; WILKS, 2006). Por conta desta característica, a estatística de séries temporais é uma ferramenta fundamental para as análises climatológicas, dado que, em climatologia, apenas uma pequena proporção dos fatores que controlam as suas variações são considerados nos modelos matemáticos de análise, enquanto que os demais são interpretados de forma indireta (STORCH; ZWIERS, 1999).

As análises estatísticas de séries temporais se iniciaram com procedimentos de duas funções temporais: a autocorrelação e a densidade espectral. A autocorrelação quantifica a relação de dependência linear de sucessivos valores em um intervalo de tempo. 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 1 e 2.

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (1)$$

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (2)$$

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. Desta forma, o efeito memória é identificado quando o resultado da função de autocorrelação atinge o índice de 0,2 (MANGIN, 1984), valor este também utilizado por Calaforra et al. (2003), Ferrari; Karmann (2008) e Lobo (2011).

A autocorrelação é complementada pela função de densidade espectral. Esta corresponde a uma transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência, por meio da transformada de

Fourier da função de autocorrelação. A interpretação da função de densidade espectral, por meio da identificação de diferentes picos representando fenômenos periódicos, permite a caracterização do sistema (Equações 3 e 4):

$$S(f) = 2[1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k)r(k) \cos(2\pi fk)] \quad (3)$$

$$D(k) = \frac{(1 + \cos \pi \frac{k}{m})}{2} \quad (4)$$

Onde $f = j/2m$, sendo $j = 1$ para m , f é a frequência e $D(k)$ assegura que os valores estimados para $S(D)$ não sejam tendenciosos, por meio do filtro de Turkey da Equação 4 (LAROQUE *et al.*, 1998) – o qual é recomendado por Mangin (1984) e já foi testado com sucesso por Calaforra *et al.* (2003). A função da densidade espectral também determina o tempo de regulação (Treg) (Equação 5):

$$T_{reg} = \frac{S(f=0)}{2} \quad (5)$$

O tempo de regulação define a duração da influência do sinal de saída e fornece uma indicação da amplitude do impulso de resposta do sistema (LAROQUE *et al.*, 1998).

3.4.2. Análise estatística da dinâmica de troca atmosférica entre a superfície e a cavidade natural, por meio do fosso de cada dolina

Em um segundo momento, a análise dos dados foi aplicada visando a integração das variáveis analisadas entre as diversas estações de monitoramento, além dos dados originados por outros procedimentos de coleta. Para tanto, foram utilizados histogramas de frequência, coeficientes de correlação r de Pearson, correlação cruzada e análises de *clusters*, ou agrupamentos.

Os histogramas de frequência, bem como a relação entre duas ou mais variáveis, foram analisados por meio de gráficos, permitindo a interpretação da correlação visual entre os dados. Este procedimento foi utilizado, na maioria dos casos, em conjunto com os coeficientes de correlação de Pearson, que indica o grau de associação linear entre variáveis distintas (GERARDI; SILVA, 1981). Seu modelo se expressa da forma apresentada na Equação 6.

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (6)$$

Onde x_i e y_i representam os respectivos desvios de x e y ($x_i - \bar{x}$) e ($y_i - \bar{y}$). 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). Este procedimento já foi utilizado para análises de séries de dados espeleoclimáticos, em trabalhos como: Freitas; Schmekel (2006), para taxas de condensação de água nas paredes; Liñán *et al.* (2008), para análises de concentração de CO₂ no ar; e Lobo (2011) para a compreensão da dinâmica atmosférica em cavernas.

Outro procedimento de análise utilizado foi a correlação cruzada (Equações 7 e 8):

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (8)$$

Onde $C_{xy}(k)$ é o correlograma cruzado, os desvios das séries temporais são dados por σ_x e σ_y e o índice k determina o deslocamento entre as séries para calcular a correlação (FERRARI; KARMANN, 2008).

Os procedimentos estatísticos variados e multivariados foram executados por meio do pacote estatístico do *XLStat*[®], um aplicativo que funciona como suplemento do *Excel*[®] for *Windows*[®].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério

Para o Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério foram consideradas cinco estações de monitoramento higrotérmico: Externa Regional; Externa I; Externa II; Interna I e Lago do Cruzeiro. Os resultados gerais obtidos no monitoramento são exibidos nas Figuras 6 e 7.

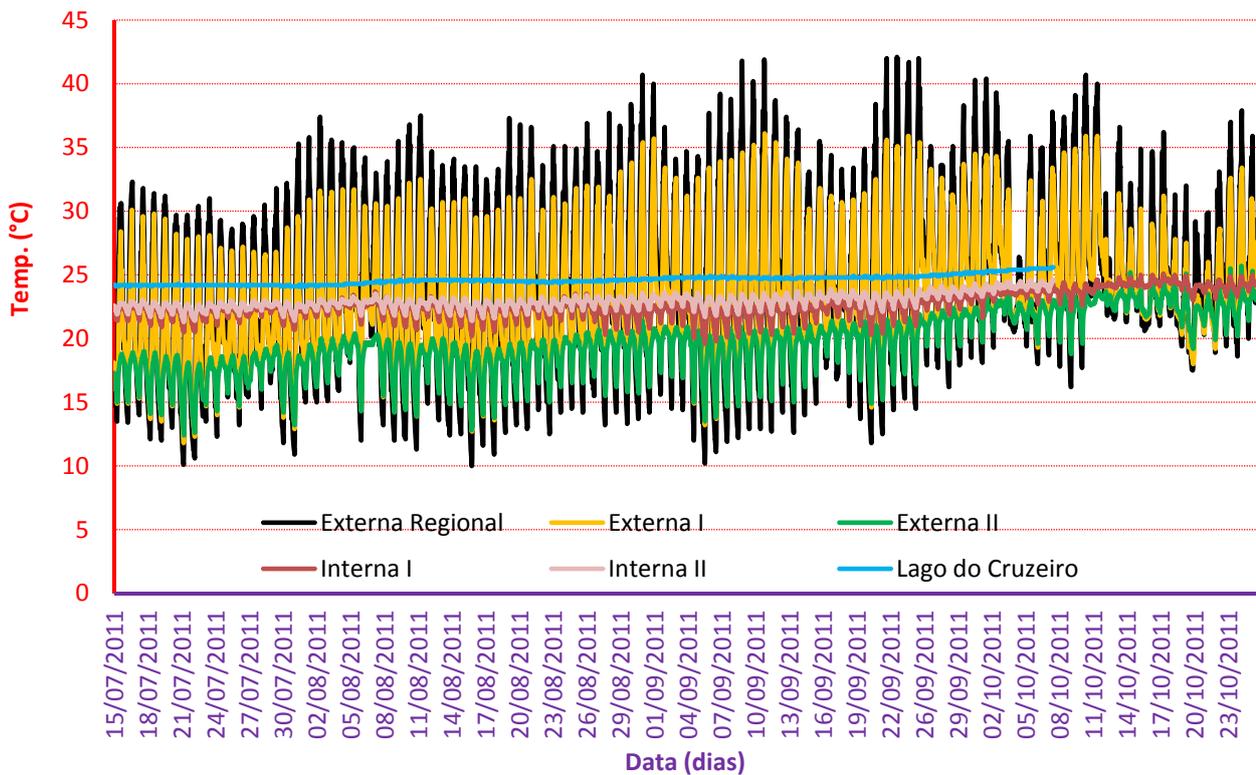


Figura 6: Resultados do monitoramento da temperatura do ar e da água na região do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério.

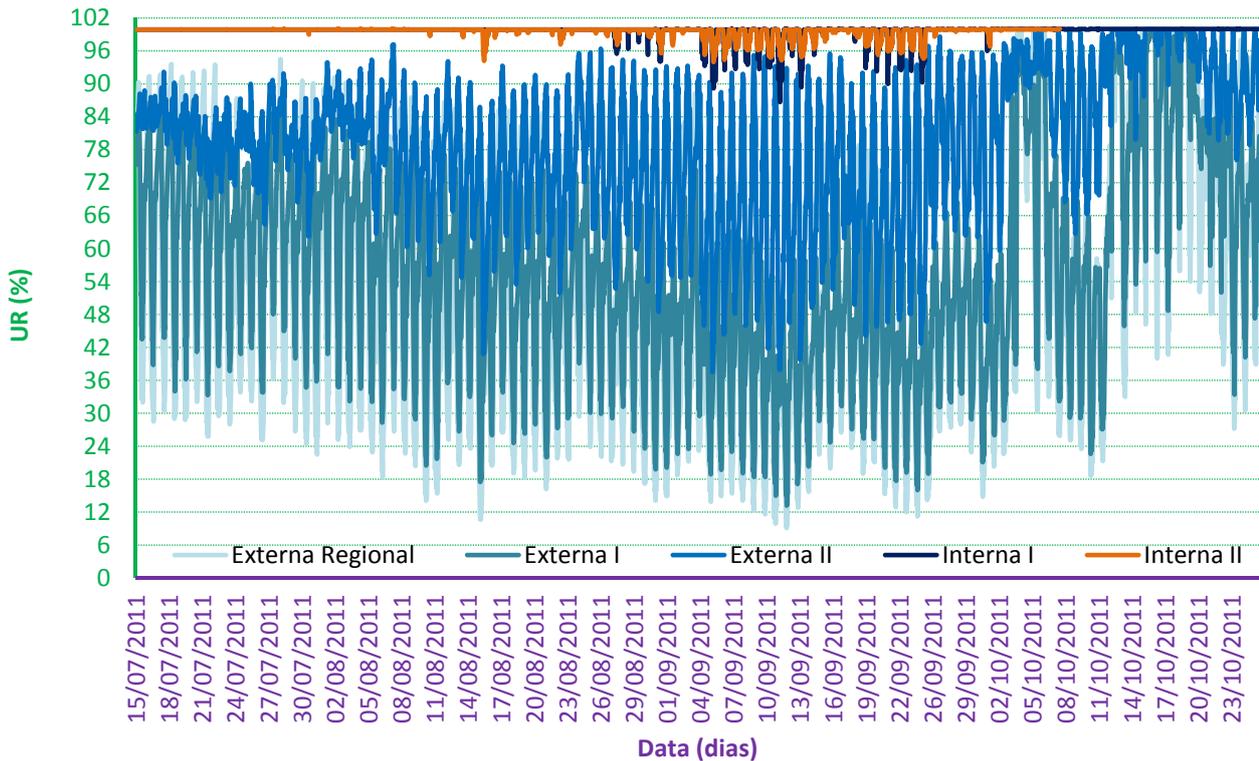


Figura 7: Resultados do monitoramento da umidade relativa do ar na região do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério.

Tomando por base a estação Externa Regional, a temperatura do ar (Figura 6) no período aferido variou entre 10 °C (16 de agosto de 2011, às 5h 30min) e 42,1 °C (23 de setembro de 2011, às 13h 30min), com amplitudes diárias da ordem de 20-25 °C no ciclo diuturno. A média da temperatura do ar foi de 24,3 °C. A umidade relativa do ar (Figura 7) variou em proporção inversa à temperatura (válido para todas as estações monitoradas), com mínima de 9,1% (12 de setembro de 2011, às 15h00min), média de 51,8% e máxima de 100% (diversos períodos entre 15 e 19 de outubro de 2011).

Sobre a temperatura do ar (Figura 6), os valores extremos vão sendo atenuados à medida que se avança para o fundo da dolina, em direção à caverna. A amplitude vai diminuindo principalmente nas temperaturas mais elevadas, mas também nas temperaturas mais baixas. Por outro lado, a umidade relativa do ar (Figura 7) apresenta comportamento inverso, com valores mais estáveis próximos aos níveis de saturação (100%) nas estações internas, permitindo maior dilatação dos valores nas zonas mais externas, onde a insolação é maior. Para efeitos de comparação, a Tabela 3 apresenta a estatística descritiva das estações monitoradas na região do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério.

Tabela 3: Estatística descritiva da temperatura e umidade relativa do ar na região do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério.

Medida estatística	Externa Regional		Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério								
	UR (%)	T. (°C)	Externa I		Externa II		Interna I		Interna II		
			UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. ar (°C)	T. ág. (°C)
Máxima	100	42,1	100	36,1	99,9	25,7	100	25,1	100	24,6	25,6
Média	51,86	24,33	56,26	23,20	79,19	19,53	99,71	22,61	99,56	22,90	24,61
Moda	99,9	21,3	48,3	22,4	99,9	19,7	99,9	22,4	99,9	22,9	24,8
Mínima	9,1	10	13,2	11,8	37,5	12,4	86,7	19,6	94	21,3	24,1
Amplitude	90,9	32,1	86,8	24,3	62,4	13,3	13,3	5,5	6	3,3	1,5
Desvio padrão	23,21	6,94	19,06	4,97	13,76	2,36	1,08	0,97	0,96	0,58	0,34

Analisando o conjunto de dados da Tabela 3, percebe-se uma variação nas medidas de tendência central da estação Externa II, localizada no fundo da dolina, em abrigo natural ventilado, próximo ao acesso para a caverna. Sua média e moda (19,53 °C e 19,7 °C, respectivamente) são inferiores às estações subjacentes acima (Externa I; média: 23,2 °C; moda: 22,4 °C) e abaixo (Interna I; média: 22,61 °C; moda: 22,4 °C), denotando comportamento atmosférico de baixo padrão cumulativo e elevada circulação de ar. É possível que a temperatura da rocha – que não foi aferida – possa influenciar neste comportamento, tal como já concluído em trabalhos anteriores (e.g. LUETSCHER; JEANNIN, 2004). Sobre a umidade relativa do ar, ela tende aos níveis de saturação máxima (100%) à medida que se avança às zonas mais profundas da dolina e do interior da caverna. Todavia, chama a atenção os valores mínimos atingidos na estação Externa Regional (9,1%) e Externa I (13,2%), por serem padrões típicos de umidade de regiões semi-áridas, sobretudo quando associadas às temperaturas mais elevadas, como é o caso.

A correlação visual entre as variações da temperatura e umidade relativa do ar nas estações monitoradas é evidente, tal como se observa nas Figuras 8 à 12. Os coeficientes de correlação *r* de Pearson apresentados na Tabela 4 corroboram esta correlação.

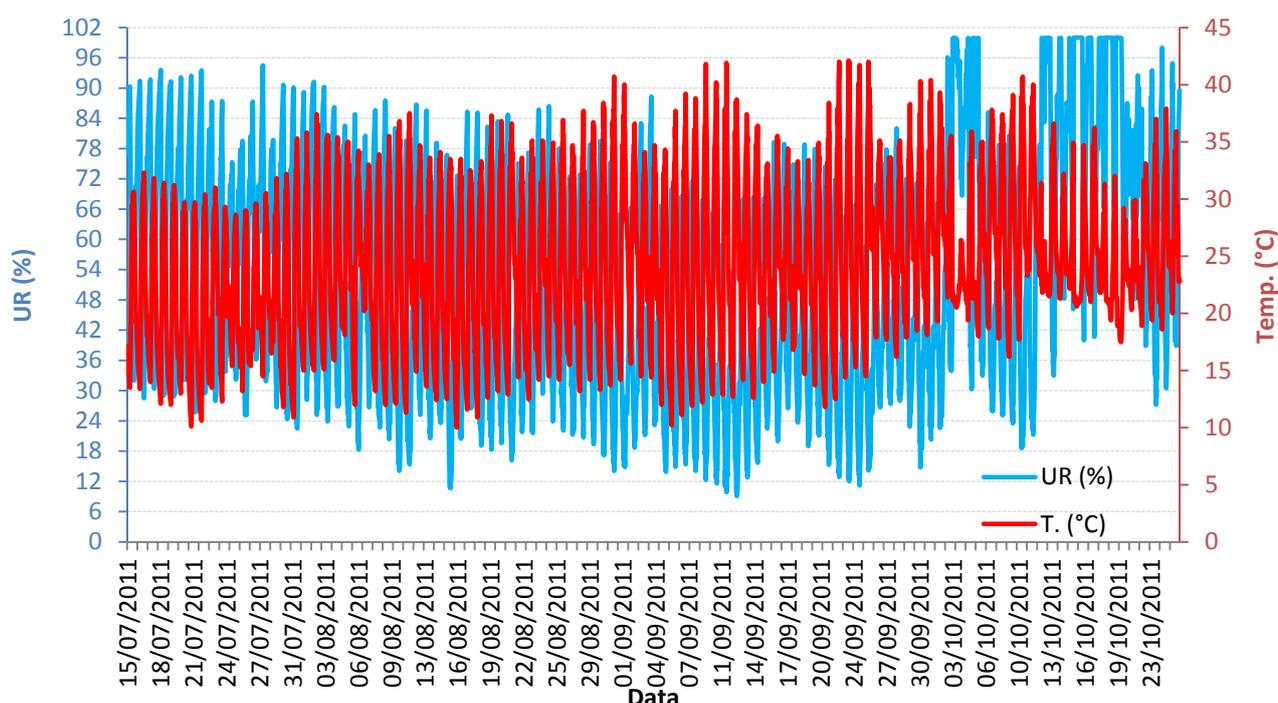


Figura 8: Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Externa Regional, no período entre 15 de julho e 25 de outubro de 2011.

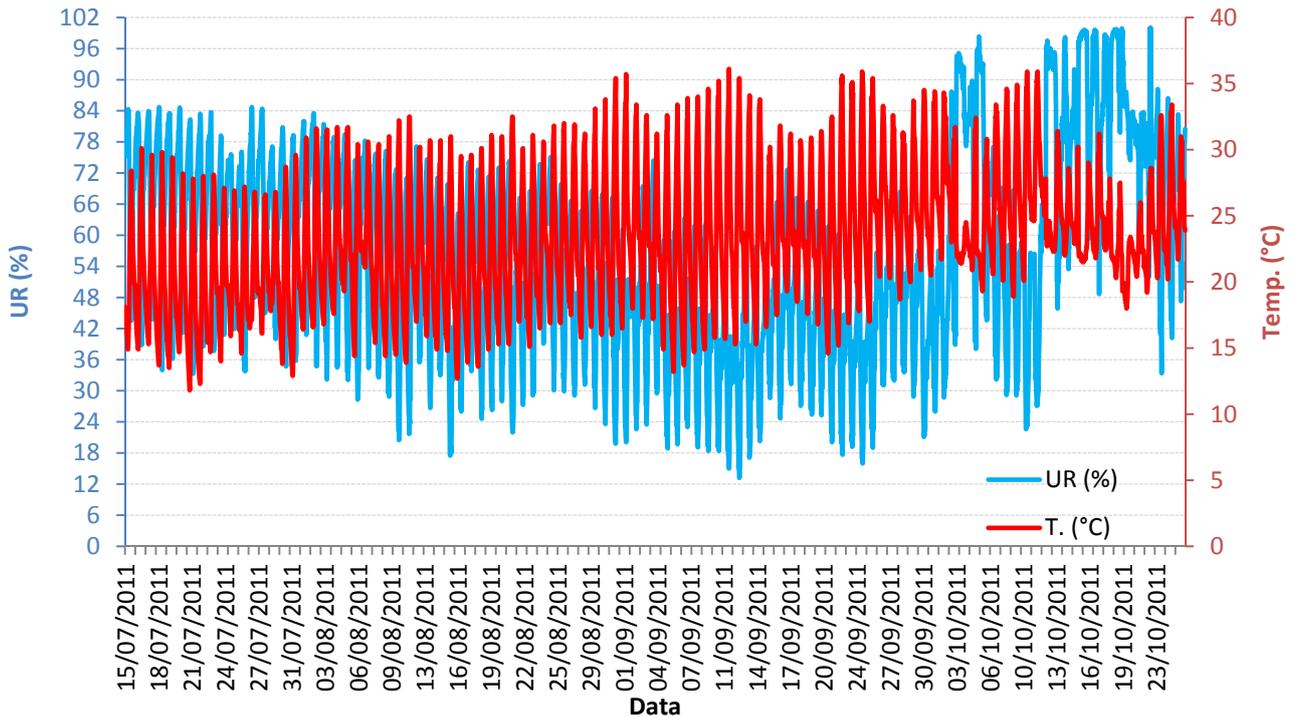


Figura 9: Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Externa I, no período entre 15 de julho e 25 de outubro de 2011.

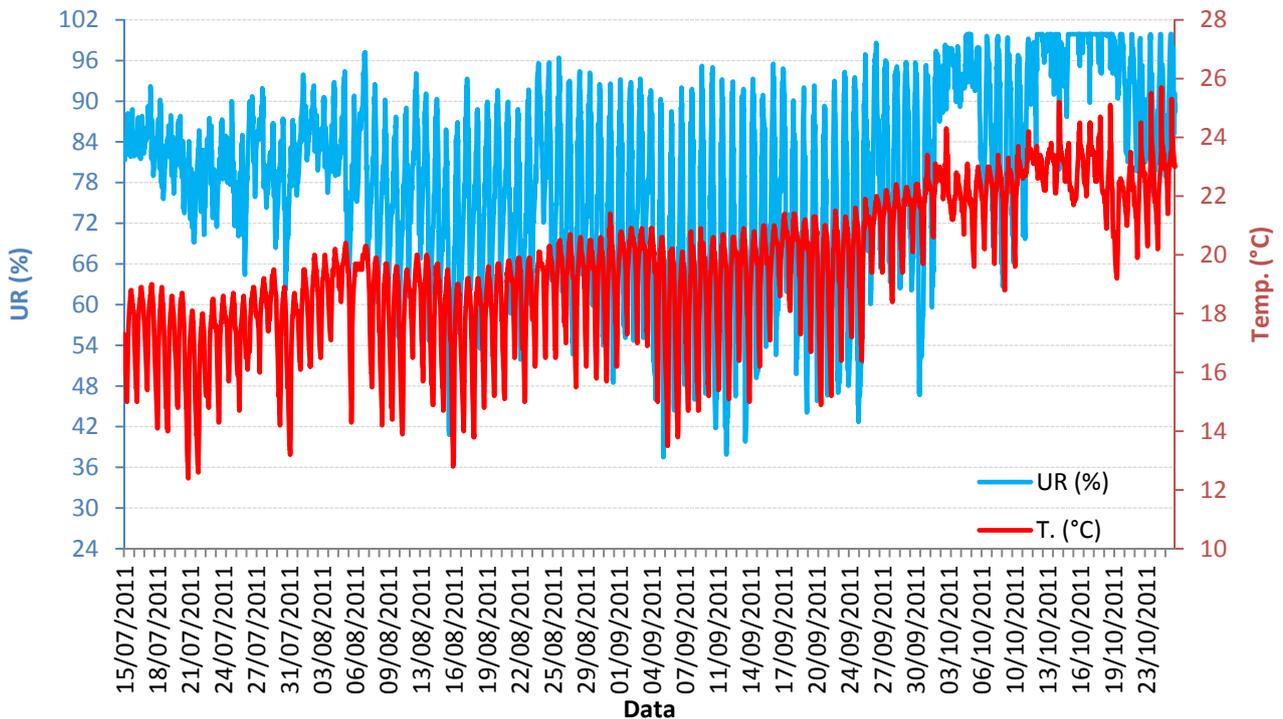


Figura 10: Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Externa II, no período entre 15 de julho e 25 de outubro de 2011.

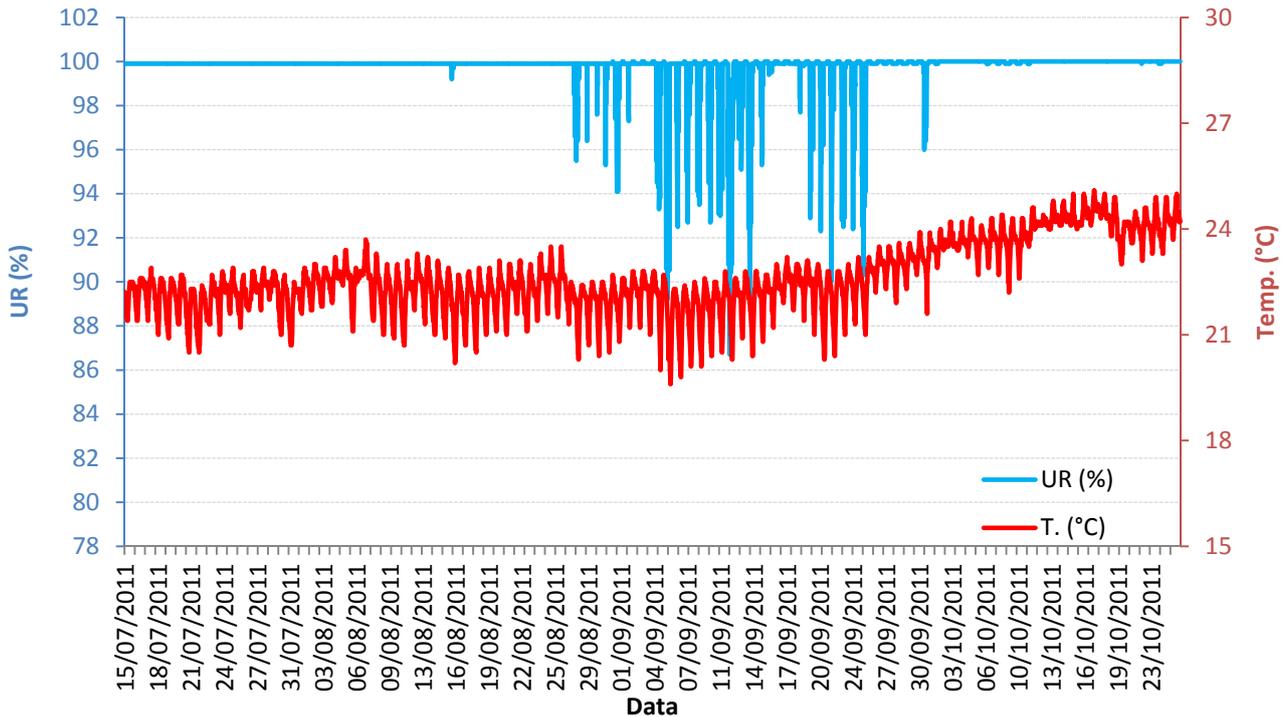


Figura 11: Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Interna I, no período entre 15 de julho e 25 de outubro de 2011.

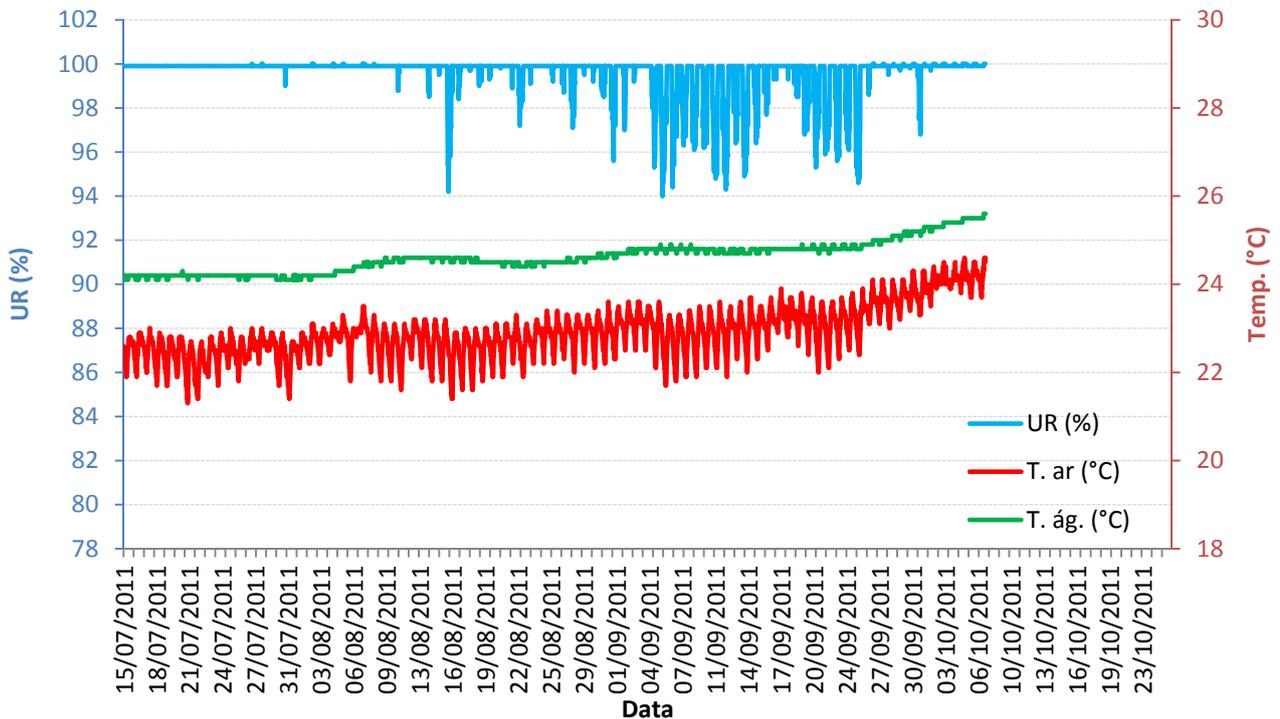


Figura 12: Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Lago do Cruzeiro, no período entre 15 de julho e 7 de outubro de 2011.

Tabela 4: Coeficientes de correlação r de Pearson entre as séries de dados das estações de monitoramento da região do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério

	Ext.Reg.	Ext.I	Ext.II	Int.I	Int.II_Ar	Int.II_Lago
Ext.Reg.	1	0,935	0,662	0,644	0,619	0,229
Ext.I	0,935	1	0,781	0,732	0,737	0,348
Ext.II	0,662	0,781	1	0,881	0,962	0,669
Int.I	0,644	0,732	0,881	1	0,874	0,452
Int.II_Ar	0,619	0,737	0,962	0,874	1	0,773
Int.II_Lago	0,229	0,348	0,669	0,452	0,773	1

Embora os coeficientes de correlação não sejam suficientes para explicar relações de causa e efeito na análise entre distintas variáveis (LANDIM, 2003), eles permitem a confirmação ou no mínimo o reforço de hipóteses pré-estabelecidas. No caso em questão, foram elaboradas duas hipóteses de trabalho, relativas à origem do comportamento dos fluxos atmosféricos para o micro-sistema da dolina do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério: a) o limite da influência originada no meio externo, sob influência direta do sol; e b) o limite da influência do expressivo corpo d'água do lago do Cruzeiro – o maior lago subterrâneo do Brasil.

Sobre a primeira hipótese, percebe-se pelos coeficientes de correlação da Tabela 4 que as influências da temperatura do ar na estação Externa Regional se estendem de forma mais substancial até a estação Externa I (0,935), e apresentam correlações menos expressivas com as demais estações. Isto fica muito evidente quando se analisa o coeficiente de correlação da Tabela 4 em conjunto com os gráficos das Figuras 8 a 12, de onde podem ser subtraídos dois padrões gerais de variabilidade: a variação cíclica diuturna e a tendência de acréscimo. Uma interpretação preliminar permitiria inferir se tratarem efetivamente de padrões distintos, mas é preciso cautela nesta primeira conclusão, dado que mesmo a série de dados da estação Externa Regional apresenta tendência de aumento da temperatura no período aferido. Outro dado importante é a correlação elevada entre as estações Externa I e Interna I (0,962), evidenciando a expressiva troca atmosférica que ocorre na região de entrada da caverna, recebendo influências cruzadas do meio externo e interno.

Entretanto, a Tabela 4 evidencia a baixa correlação entre a temperatura do ar na estação Externa Regional e a temperatura da água no lago do Cruzeiro. Por outro lado, a temperatura da água apresenta uma correlação mais significativa com as estações Lago do Cruzeiro Ar (0,773) e Externa II (0,669). Curiosamente, a correlação com a estação Interna I é menor (0,452), o que demonstra que as massas de ar originadas no ambiente externo prevalecem nesta zona de troca gasosa, sobretudo nos extremos menores (mínimas diárias), com a invasão do ar frio no interior da cavidade, o que pode ser observado na Figura 11. Este padrão também se observa na temperatura do ar nas estações Externa II (Figura 10) e Lago do Cruzeiro (Figura 12). Todavia, o gráfico da Figura 12 e os coeficientes de correlação da Tabela 4 demonstram que a entrada de massas de ar frio no interior da caverna não é suficiente para esfriar a água do lago do Cruzeiro.

A análise dos padrões de variabilidade se complementa com a função de autocorrelação das séries, apresentada na Figura 13.

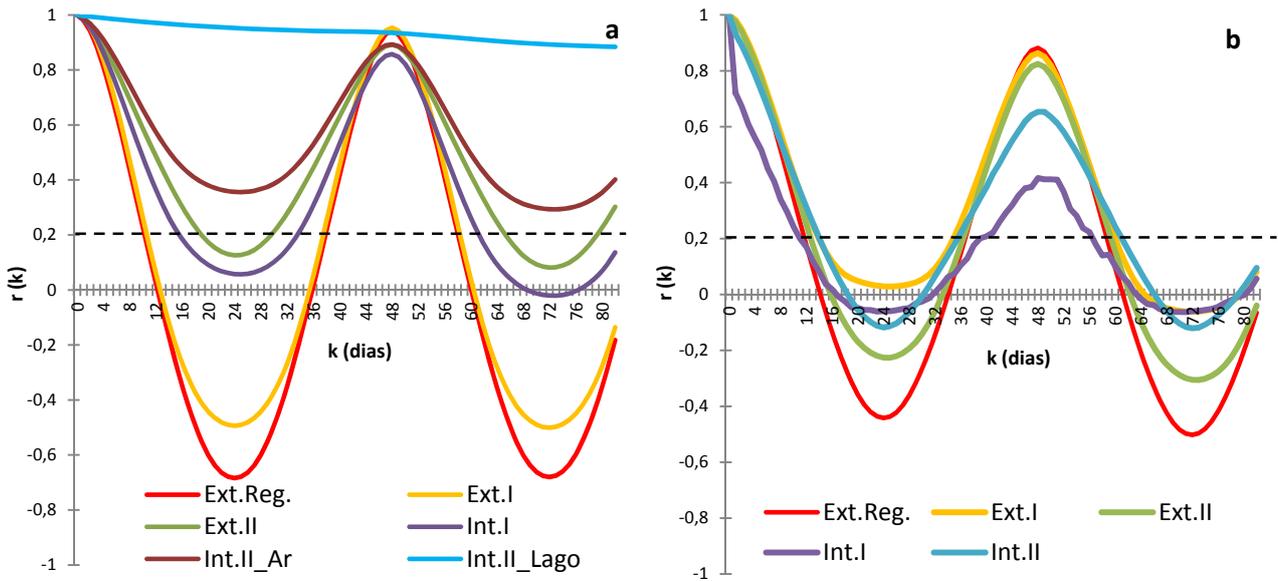


Figura 13: Gráfico comparativo dos correlogramas das estações de monitoramento da região do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério: a) de temperatura; b) de umidade relativa do ar.

Os correlogramas da Figura 13a demonstram a existência de dois padrões distintos de variabilidade nos dados de temperatura, sendo um deles governado pela estação Externa Regional e outro pelo lago do Cruzeiro. As demais estações representam estágios transitórios entre estes extremos, tendendo a se afastar do padrão de variabilidade do meio externo à medida que se aprofundam na dolina e adentram na caverna. As estações que atingem o efeito de memória são a Externa Regional (0,233 em 10 dias), Externa I (0,266 em 10 dias), Externa II (0,199 em 19 dias) e Interna I (0,221 em 15 dias). Mais uma vez se observa uma relação de maior proximidade da estação Interna I com as externas e da estação Externa II com o lago do Cruzeiro. As séries da estação Lago do Cruzeiro não atingem o índice mínimo de 0,2, impossibilitando o conhecimento de seu efeito de memória. No entanto, para a umidade relativa do ar (Figura 13b), todas as estações atingem o efeito de memória no índice 0,2, demonstrando que a variável que melhor permite a classificação do sistema em partes distintas é a temperatura. Concentrando-se apenas nas séries extremas (Externa Regional e Lago do Cruzeiro), realizou-se uma análise por meio de sua densidade espectral (Figura 14).

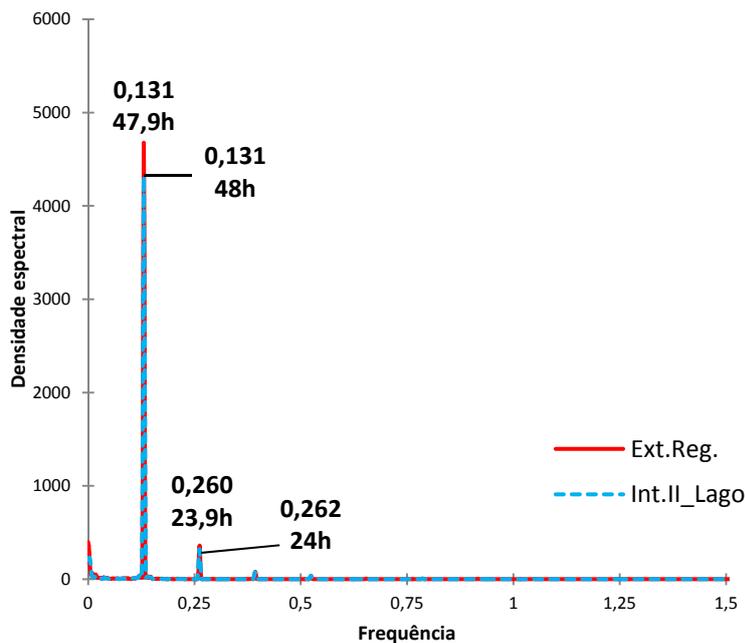


Figura 14: Função de densidade espectral das séries Externa Regional e Lago do Cruzeiro (água)

A análise da densidade espectral evidencia que, embora existam fenômenos cíclicos sazonais mais amplos que a série não pôde exprimir (evidenciados pelo pico de menor frequência, próximo de zero e abaixo dos picos próximos à 48h), foi possível identificar padrões de variabilidade sazonal em escalas próximas de 48h e 24h com picos de alta densidade, para ambas as séries. Assim, admite-se que os dados são suficientes para os limites de interpretação ora pretendidos, para este trecho do sistema atmosférico do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério.

Com isso, pode-se interpretar parcialmente o modelo de circulação do ar para o Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério como uma armadilha para a captura do ar frio (cf. ERASO, 1969; CIGNA, 2004), onde a circulação de ar é mais ampla e efetiva no inverno, período em que a presente pesquisa foi realizada. A confirmação final desta interpretação se faz possível com um futuro monitoramento no verão, quando a entrada de ar externo dependerá do gradiente térmico diuturno na região: se as noites forem mais quentes, haverá pouca circulação; se forem frias, a entrada de massas de ar continuará a ser expressiva.

4.2. Dolina e Gruta do João Baio

Na região da dolina e gruta do João Baio, foram também consideradas cinco estações de monitoramento: Externa Regional; Externa I; Externa II; Abrigo; e Gruta do João Baio II. Os resultados brutos do monitoramento nestas estações são apresentados nas Figuras 15 e 16.

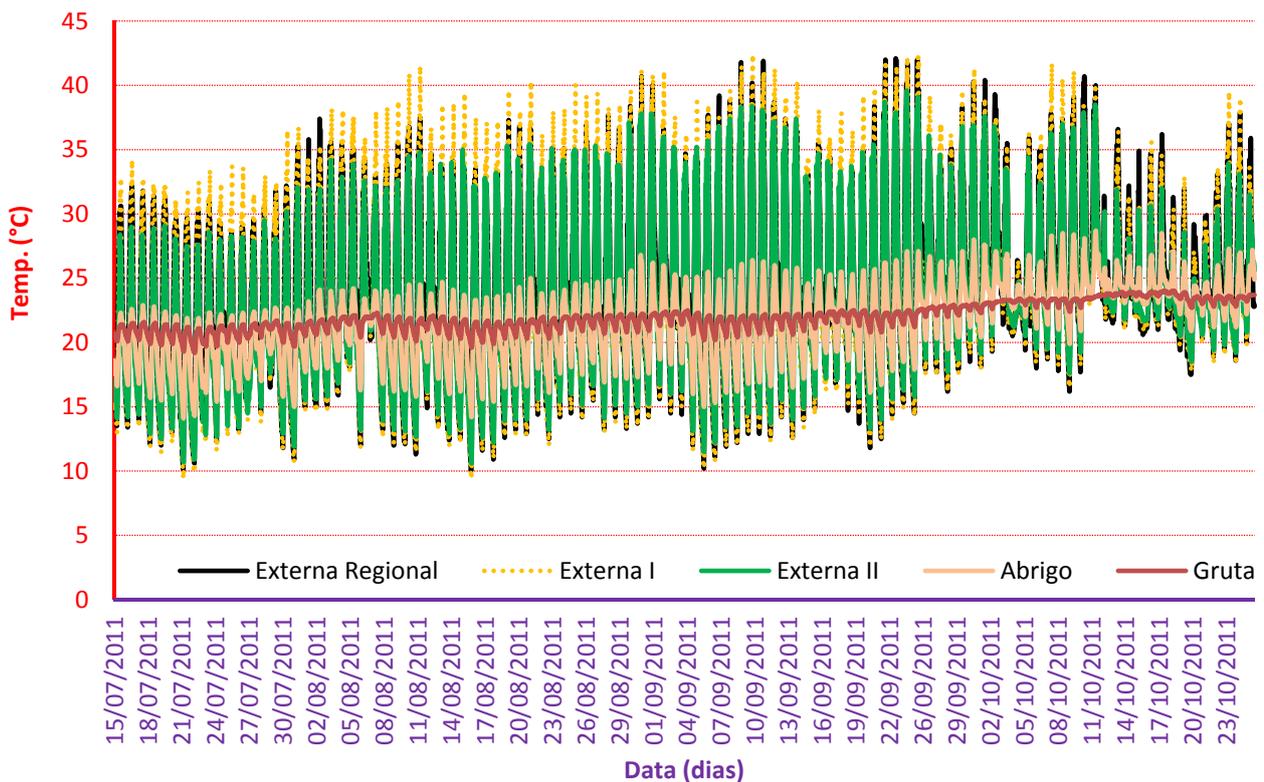


Figura 15: Resultados do monitoramento da temperatura do ar na região da dolina e gruta do João Baio II.

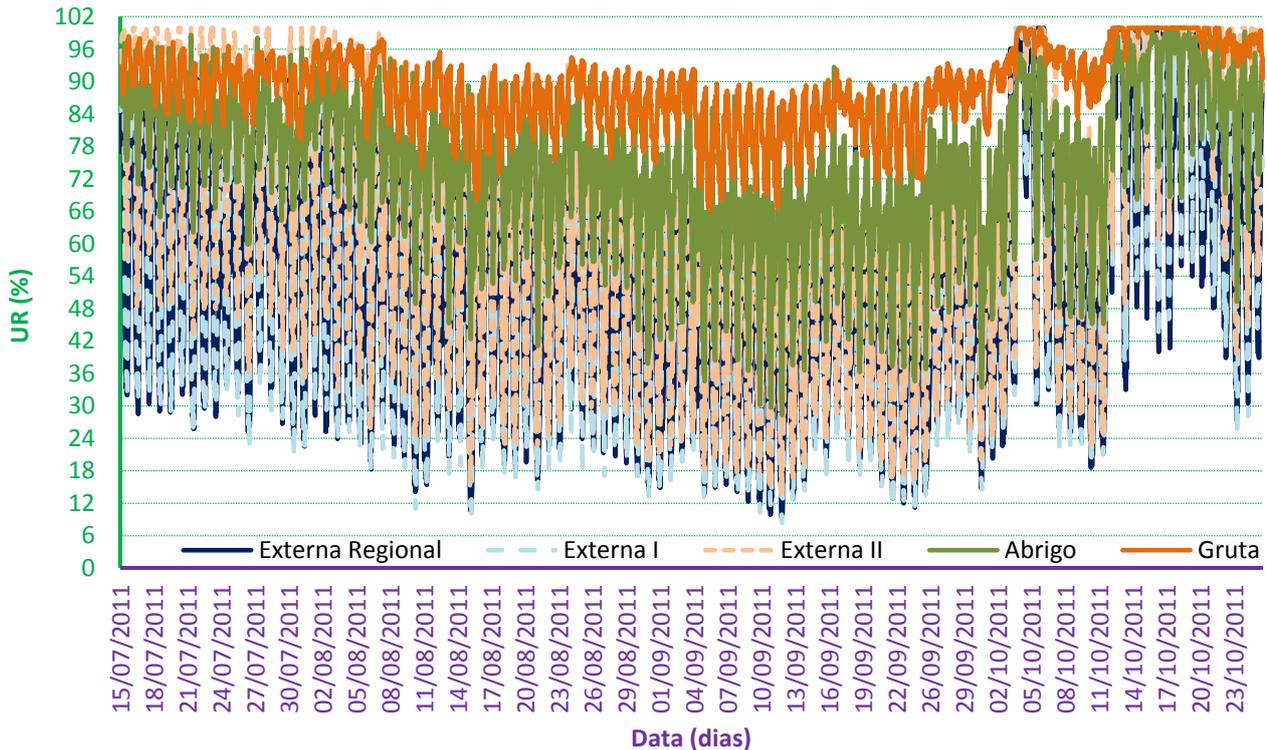


Figura 16: Resultados do monitoramento da umidade relativa do ar na região da dolina e gruta do João Baio II.

Embora o experimento de campo tenha sido dimensionado para que a estação Externa Regional captasse as variações higrotérmicas mais amplas na área de estudo, a estação Externa I, instalada na dolina do João Baio apresentou valores mais amplos. Isto pode ser explicado por diversos fatores, como: variação nos sensores de leitura; posição de instalação (a Externa Regional foi instalada em meio à cobertura vegetal da região, que é composta por espécimes de árvores do cerrado com folhagem rala e/ou inexistente, enquanto a estação Externa I estava em área um pouco mais exposta). Porém, a análise visual em gráfico demonstra que tais variações são mínimas, permitindo mesmo assim uma análise integrada.

Na estação Externa I, a máxima de temperatura (Figura 15) do período foi de 42,5 °C (25 de setembro de 2011, às 14h00min), a média e a moda foram de 23,74 °C e 21,3 °C respectivamente e a mínima foi de 9,4 °C (21 de julho de 2011, às 6h30min; e 16 de agosto de 2011, às 6h30min). A umidade relativa do ar (Figura 16) chegou à 8,4% (12 de setembro, às 15h30min) – um índice alarmante para a saúde humana –, com média de 56,79% e máxima de 99,9% em diversos momentos em outubro de 2011.

O comportamento higrotérmico é inversamente proporcional com marcado ciclo diuturno, mesmo dentro da gruta do João Baio II. Chama a atenção na Figura 16 o fato de que o ar não mantém elevada saturação hídrica, exceto em outubro quando se iniciaram as chuvas, o que difere da gruta do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério. Para uma análise estatística inicial das diversas estações, a Tabela 5 apresenta os resultados da estatística descritiva.

Tabela 5: Estatística descritiva da temperatura e umidade relativa do ar na região da dolina e gruta do João Baio II.

Medida estatística	Gruta do João Baio									
	Externa Regional		Externa I		Externa II		Abrigo		Caverna	
	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)	UR (%)	T. (°C)
Máxima	100	42,1	99,9	42,5	100	39,6	99,9	28,7	99,9	24
Média	51,86	24,33	56,79	23,74	65,23	23,33	73,91	21,63	89,01	21,96
Moda	99,9	21,3	99,9	21,3	99,9	21,8	80,7	23,5	99,9	22
Mínima	9,1	10	8,4	9,4	13,8	10,6	28,3	14,1	66,2	19,2
Amplitude	90,9	32,1	91,5	33,1	86,2	29	71,6	14,6	33,7	4,8
Desvio padrão	23,21	6,94	23,9	7,61	23,65	6,48	13,32	2,82	6,86	1,03

Conforme os dados da Tabela 5, embora a estação Externa I tenha captado variações mais extremas, a sua média de temperatura foi inferior à da estação Externa Regional (23,74 °C e 24,33 °C, respectivamente), demonstrando que a Externa Regional é mais representativa para a caracterização do microclima externo, onde a influência da insolação é maior. Estes valores vão se atenuando gradativamente, até o fundo da dolina. Na estação da caverna, os valores são atenuados, o que reflete diretamente na amplitude térmica, que não passou dos 4,6 °C. A região do Abrigo, que fica ao lado do sifão intermitente do João Baio, apresentou medidas menos amplas de temperatura, evidenciando a diminuição relativa da troca gasosa no ambiente, que pode ser atribuída pelo confinamento espacial relativo, pela ausência de insolação direta e pela proximidade aos corpos d'água. Em linhas gerais a umidade relativa apresentou padrão inversamente proporcional em cada estação, além de ser menor nas áreas mais expostas, e gradativamente maior à medida que se avança para o interior da dolina e da caverna. O padrão de variabilidade de cada estação é apresentado nas Figuras 8 (Externa Regional) e 17 a 20 (região da dolina do João Baio).

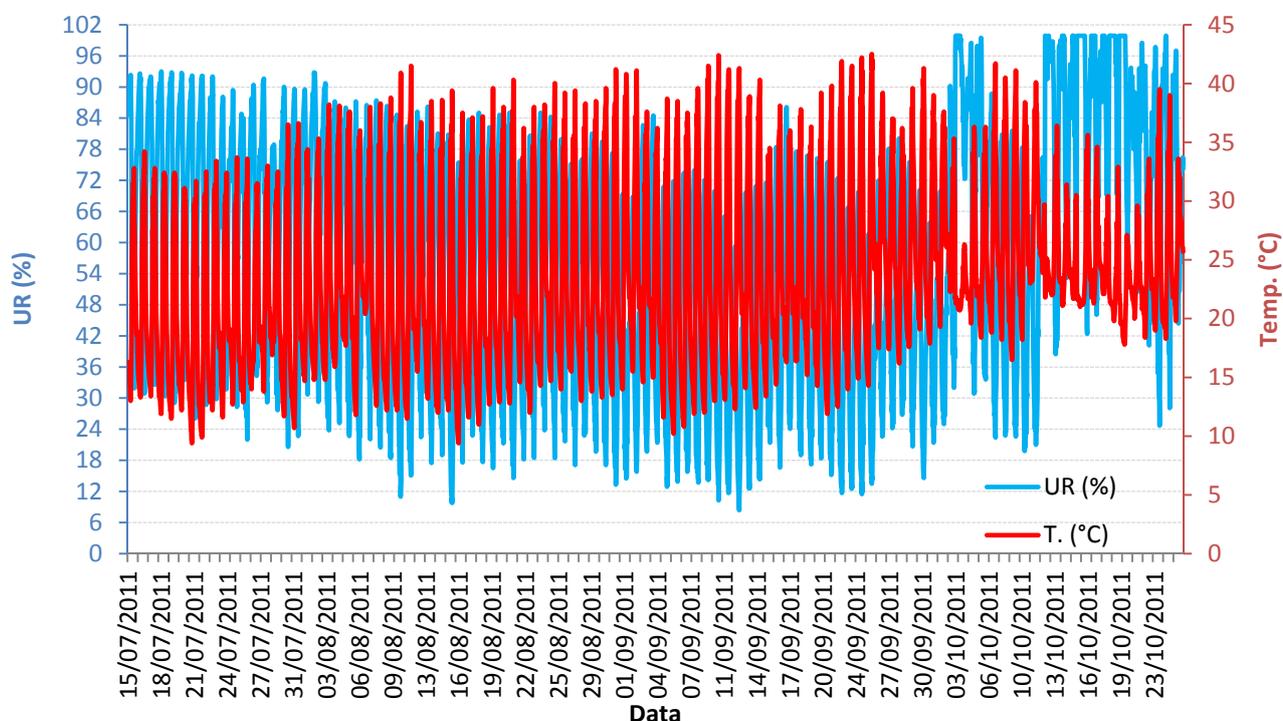


Figura 17: Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Externa I da dolina do João Baio, no período entre 15 de julho e 7 de outubro de 2011.

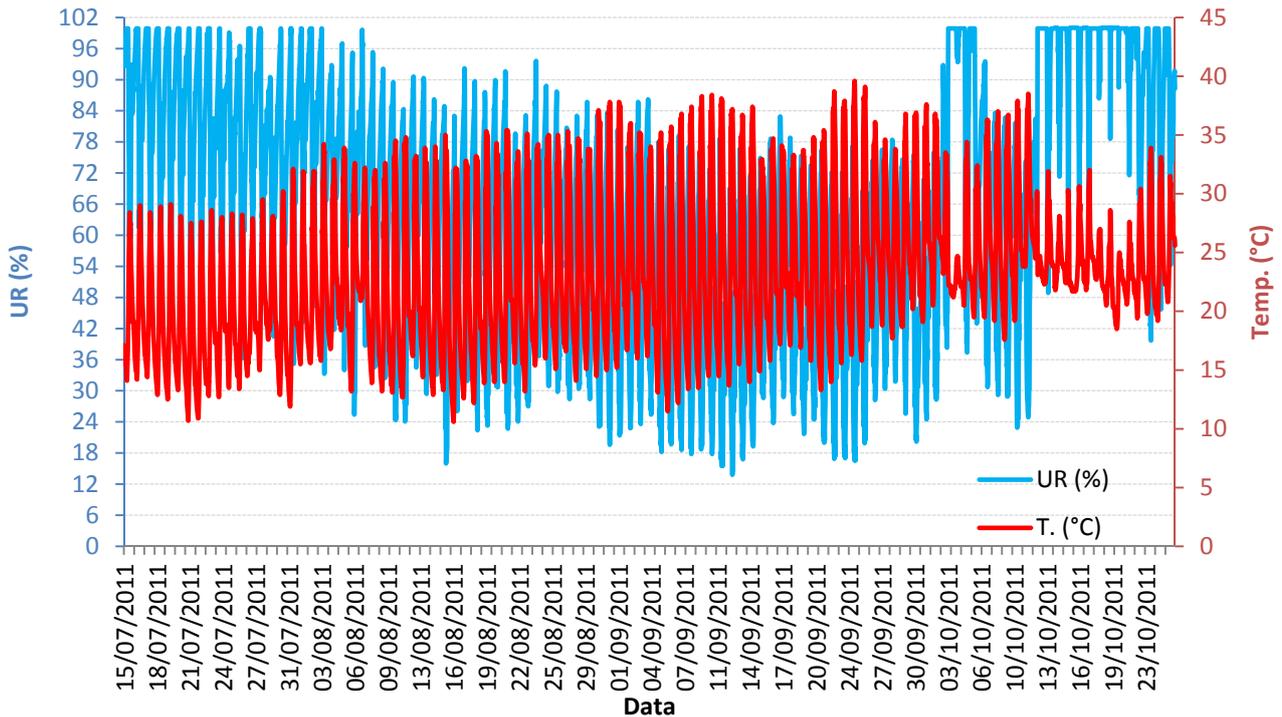


Figura 18: Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Externa II da dolina do João Baio, no período entre 15 de julho e 7 de outubro de 2011.

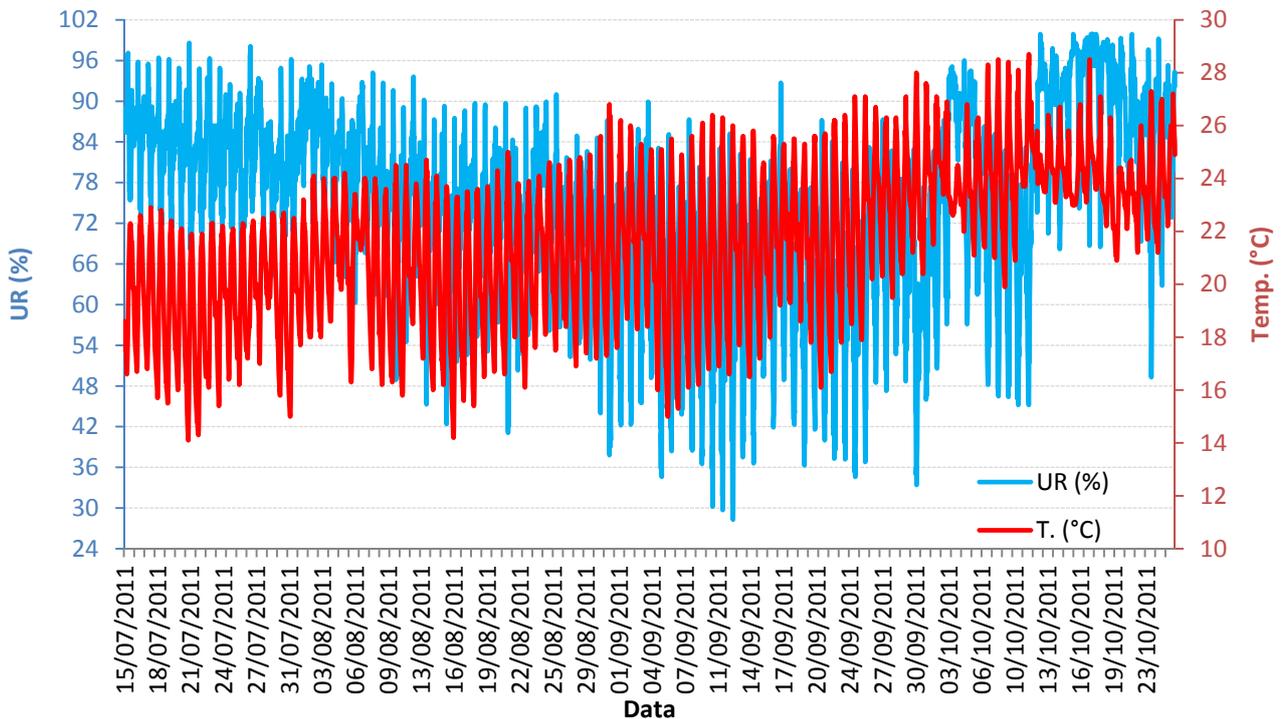


Figura 19: Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Abrigo da dolina do João Baio, no período entre 15 de julho e 7 de outubro de 2011.

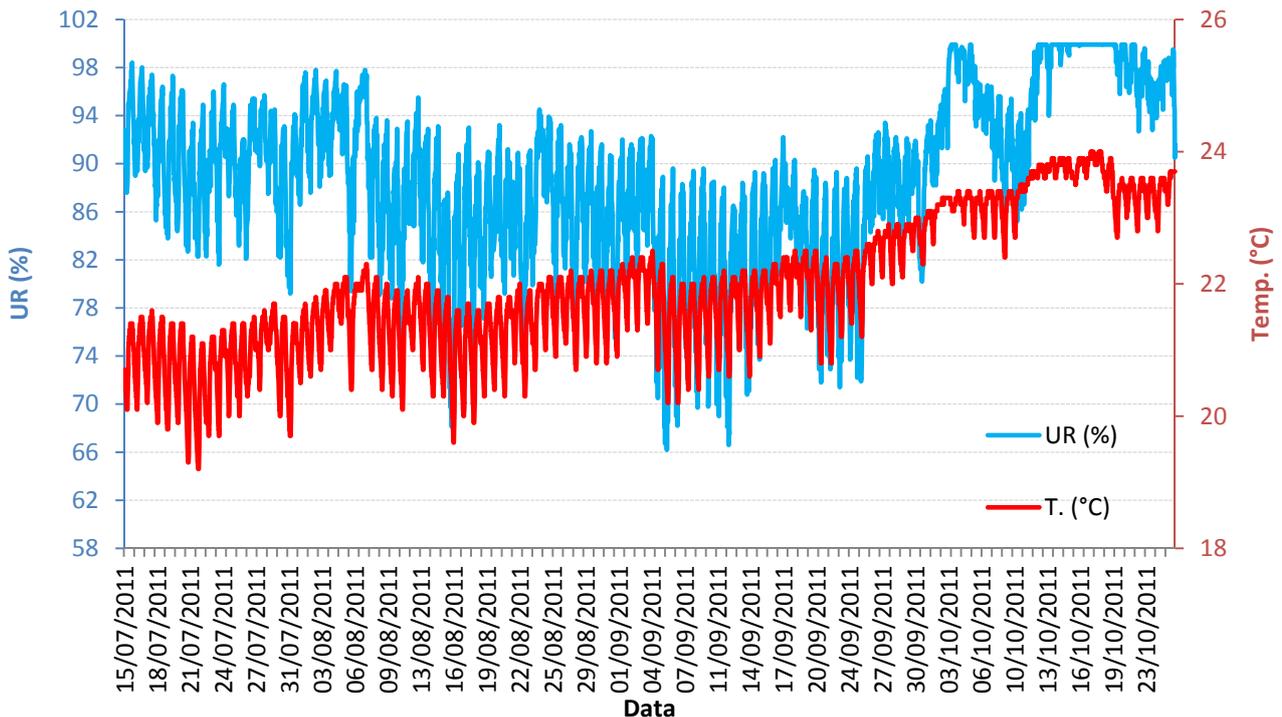


Figura 20: Variação de temperatura e umidade relativa do ar na estação Gruta do João Baio II, no período entre 15 de julho e 7 de outubro de 2011.

Os gráficos das figuras 17 a 20 chamam a atenção para alguns aspectos em uma análise conjunta, sem pormenorizar nas variações específicas de cada estação. A primeira delas é a alteração nos padrões de variabilidade da umidade relativa do ar no mês de outubro, evidenciando que os dados de chuva (Figura 3), embora provenientes de um pluviômetro de outra região do município de São Desidério, são representativos para esta região.

A segunda constatação é a existência de dois padrões de variabilidade distintos, tal como já observado para o Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério. Em um deles, das estações mais expostas à insolação, o ciclo diurno é marcado e evidente, com elevação da temperatura durante o dia e repentina queda noturna, gerando gradientes térmicos diários superiores a 30 °C em alguns casos (Figuras 17 e 18, principalmente). A região do Abrigo (Figura 19) apresenta um padrão intermediário, onde nitidamente ainda há influência da atmosfera de fora da dolina – inclusive na elevação das temperaturas –, mas com predomínio de influência nas temperaturas mínimas, o que ocorre durante a noite, quando o ar se esfria e torna-se mais pesado, dirigindo-se para as regiões mais baixas do relevo local, como as dolinas.

No caso da gruta do João Baio II, nota-se que a influência térmica se limita às temperaturas mais baixas, típico de um modelo conceitual de armadilha para a captura do ar frio (ERASO, 1969; CIGNA, 2004). Porém, chamou a atenção o padrão de variabilidade da umidade relativa do ar (Figura 20), muito diferente do padrão que normalmente se observa em cavernas, tal como no Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério (Figuras 11 e 12), onde a umidade relativa está sempre em níveis de saturação máxima (99,9% - 100%). Para a gruta do João Baio II, percebe-se que a umidade relativa do ar obedece às variações ocorridas no meio externo, atingindo níveis de saturação somente na época em que as chuvas se iniciaram. Os coeficientes de correlação r de Pearson auxiliam na interpretação destes dados (Tabelas 6 e 7).

Tabela 6: Coeficientes de correlação r de Pearson entre as séries de dados de temperatura das estações de monitoramento da região da dolina e gruta do João Baio II

	Ext.Reg.	Ext.I	Ext.II	Abrigo	Gruta
Ext.Reg.	1	0,966	0,933	0,814	0,470
Ext.I	0,966	1	0,970	0,840	0,477
Ext.II	0,933	0,970	1	0,855	0,524
Abrigo	0,814	0,840	0,855	1	0,846
Gruta	0,470	0,477	0,524	0,846	1

Tabela 7: Coeficientes de correlação r de Pearson entre as séries de dados de umidade relativa do ar das estações de monitoramento da região da dolina e gruta do João Baio II

	Ext.Reg.	Ext.I	Ext.II	Abrigo	Gruta
Ext.Reg.	1	0,962	0,853	0,748	0,185
Ext.I	0,962	1	0,912	0,798	0,152
Ext.II	0,853	0,912	1	0,896	0,345
Abrigo	0,748	0,798	0,896	1	0,445
Gruta	0,185	0,152	0,345	0,445	1

Os coeficientes da Tabela 6 evidenciam a forte influência direta da estação Externa Regional nas estações Externa I (0,966), Externa II (0,933) e Abrigo (0,814). A estação Gruta do João Baio II possui elevada correlação com a estação Abrigo (0,846) para a temperatura e um pouco menor, mas sendo a mais relevante, para a umidade relativa do ar (0,445; Tabela 7). A falta de dados sobre a temperatura da água dificulta uma análise direta da influência desta no sistema da dolina do João Baio. Todavia, a título de teste, foi feita uma análise de correlação entre a temperatura da água do Lago do Cruzeiro, que está distante alguns quilômetros à jusante do sistema. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Coeficientes de correlação r de Pearson entre as séries de dados de temperatura do Lago do Cruzeiro e das estações de monitoramento da região da dolina e gruta do João Baio II

	Int.II_Lago	Ext.Reg.	Ext.I	Ext.II	Abrigo	Gruta
Int.II_Lago	1	0,229	0,226	0,309	0,499	0,780

Apesar da distância física entre os pontos, foi possível identificar uma relação estatística entre as estações Lago do Cruzeiro (água) e gruta do João Baio II (que tem um pequeno corpo d'água no fundo), com coeficiente r igual a 0,780. Isto permite inferir que muito provavelmente a temperatura da água seja ponto fundamental no controle térmico no interior da gruta do João Baio II, o que é corroborado pela análise visual das Figuras 12 e 20. Por outro lado, a variabilidade da umidade relativa do ar é bastante diferente entre estas duas cavidades. Esta variação significativa é atribuída à diferença do volume interno destas cavidades e da lâmina d'água de seus corpos hídricos interiores: o grande volume e área do lago do Cruzeiro influenciam na manutenção da elevada umidade relativa do ar no interior da cavidade, enquanto que o pequeno lago da parte interna do sifão do João Baio, no interior da gruta do João Baio II, não é suficiente para manter a umidade constantemente elevada, que recebe, então, influências maiores do meio externo. A elevação da umidade justamente na época das chuvas corrobora esta interpretação.

Por fim, os dados da região da dolina do João Baio foram analisados por meio da densidade espectral, de forma a identificar se os fenômenos cíclicos que incidem na região foram captados pelas séries registradas (Figura 21).

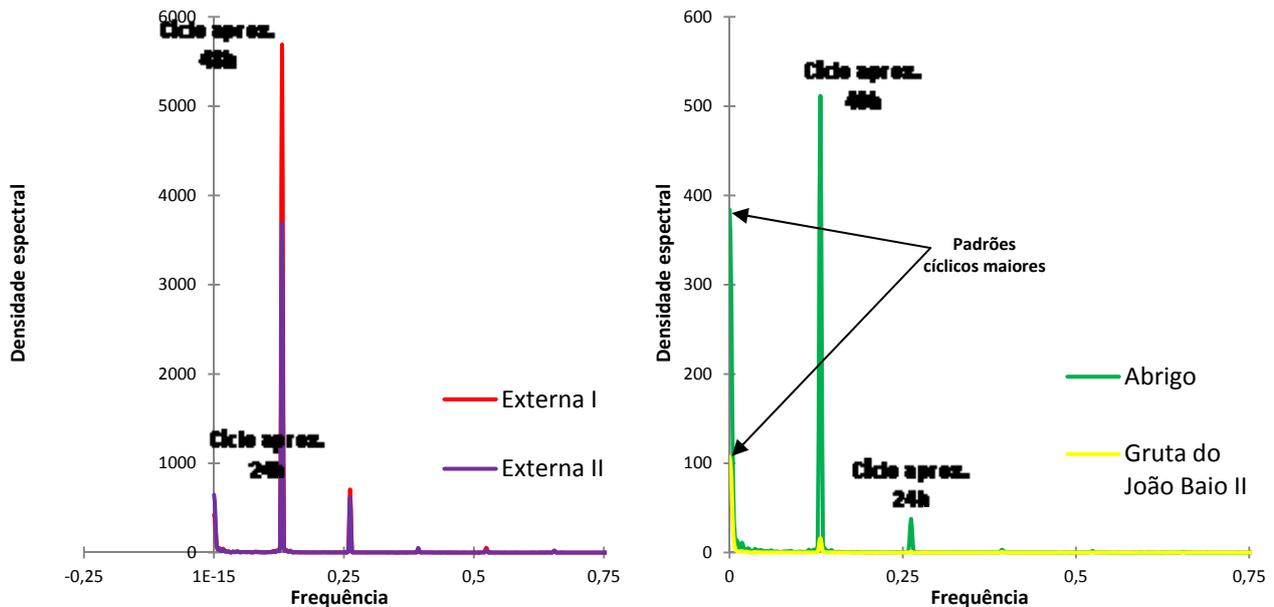


Figura 21: Função de densidade espectral das séries de temperatura da região da dolina do João Baio

Conforme apresentado na Figura 21, as séries de dados das estações Externa I e II e Abrigo apresentam fenômenos cíclicos semelhantes, com padrões aproximados de 48 e 24h, embora em distintas escalas de densidades espectral. Por sua vez, a série da estação Gruta do João Baio II apresentou apenas um ciclo evidente de aproximadamente 48h. Para as séries Abrigo e Gruta do João Baio II, percebe-se também a existência de fenômenos cíclicos maiores (especial destaque para a série da Gruta, onde o fenômeno não identificado supera o pico de aprox. 48h em densidade espectral). Com isso, nota-se que se trata de padrões distintos de variabilidade atmosférica, podendo ser caracterizados como subzonas atmosféricas espeleoclimáticas.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo preliminar do microclima e espeleoclima – conforme nomenclatura proposta em Lobo *et al.* (2012) – da região de São Desidério, nas microrregiões das dolinas do Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério e do João Baio, permitiu a sua inserção no modelo conceitual das armadilhas para a captura do ar frio (cf. ERASO, 1969; CIGNA, 2004), apesar da limitação amostral focada no período do inverno/estiagem da região. Todavia, trata-se de uma relevante contribuição, por ser o primeiro monitoramento periódico e sistemático de dados desta natureza para cavernas de regiões mais áridas e menos chuvosas no Brasil.

Os aspectos de destaque nos dados registrados são as elevadas máximas diárias, acima dos 40 °C mesmo no período de inverno e as temperaturas muito baixas no período noturno, chegando a valores abaixo dos 10 °C. De igual modo, destaca-se a baixa umidade relativa do ar atingida em alguns dias, com valores próximos dos 10%, em virtude da prolongada estiagem que afeta a região. Certamente, trata-se de um microclima de superfície e de um espeleoclima nas dolinas e cavernas muito diferente de outros padrões já identificados no Brasil, onde as variações diárias raramente ultrapassam a casa dos 15 °C de amplitude e as máximas no interior das cavernas giram em torno dos 20 °C – 21 °C (e.g. BOGGIANI *et al.*, 2007; LOBO, 2011). Na gruta do João Baio II, a média e moda ficaram em torno dos 22 °C, e no Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério, tais medidas giraram em torno dos 23 °C no ar e dos 24 °C na água. A média da temperatura da água é muito próxima da média da temperatura do ar no ambiente externo, mantendo o que estudos anteriores (e.g. LUETSCHER; JEANNIN, 2004; LUETSCHER *et al.*, 2008) mencionam sobre a tendência de equilíbrio entre a média da temperatura de águas subterrâneas em zonas menos profundas com a média da temperatura do ar em longo prazo.

Sobre o modelo geral de circulação de ar nas duas dolinas, a Figura 22 apresenta um esboço preliminar, baseado nos padrões de variabilidade já conhecidos para a região.

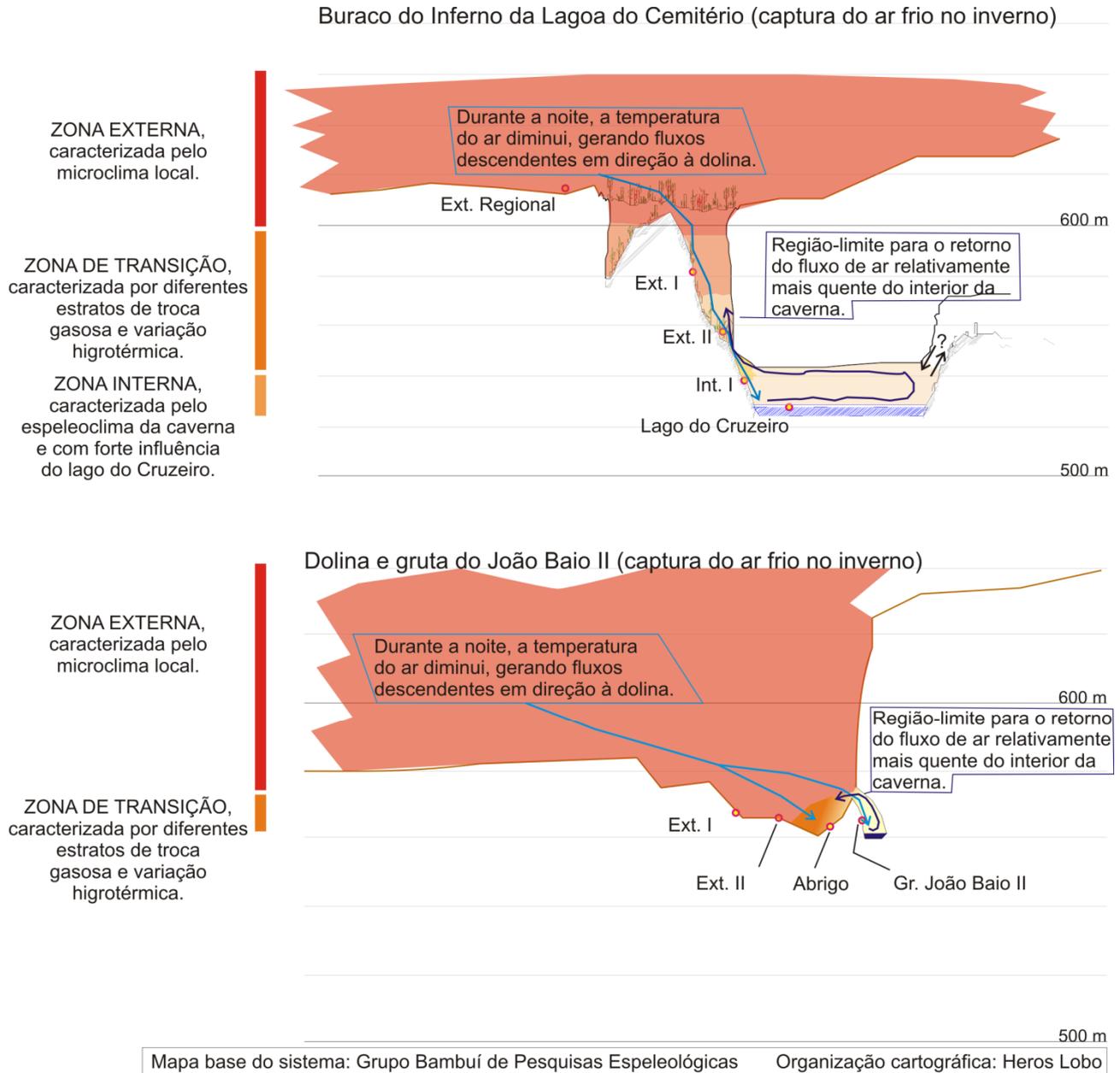


Figura 22: Modelo conceitual preliminar da armadilha para a captura de ar frio das dolinas do Buraco do Inferno e do João Baio e suas cavidades naturais associadas

De um modo geral, pode-se concluir que a existência de um corpo d'água de grandes dimensões e de uma cavidade natural de maior volume interno, são fatores que permitem a existência de um espeleoclima diferenciado do microclima externo no Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério. No caso da dolina e gruta do João Baio II, embora exista um corpo d'água associado e tenha ocorrido diferenciação nos padrões de circulação atmosférica, compreende-se que a região do Abrigo e da gruta é uma única zona, equivalente à zona de transição termoclimática das cavidades naturais, conforme proposto em Lobo *et al.* (2008).

Com base nesta configuração do modelo conceitual, recomendam-se os seguintes estudos futuros:

- Desenvolver novos estudos, com enfoque no período do verão nestas dolinas, para complementar a interpretação do modelo conceitual
- Desenvolver estudos em outras dolinas e cavidades naturais na região
- Desenvolver estudos com a presença de grupos de visitantes, para identificar limites de resposta do ambiente em função dos eventuais impactos gerados.

Acerca da gestão e manejo, pode-se concluir que:

- O padrão de circulação atmosférica da gruta do João Baio II é favorável à visitação, por não possuir padrão cumulativo. Esta constatação fornece subsídios para que se estabeleça um roteiro de visitação na cavidade, onde o visitante pode observar a oscilação do nível d'água associada ao sifão do João Baio
- Embora o enfoque deste relatório não esteja no aspecto turístico, é necessária a construção de uma escada de acesso entre o fundo da dolina (lago do sifão) e a entrada da caverna, bem como algumas escadas de apoio em seu interior, para minimizar os impactos no ambiente e fornecer mais segurança ao visitante
- Para o Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério, o fluxo dispersivo do modelo “captura do ar frio” também é propício e benéfico para a visitação, pois a tendência dos impactos térmicos gerados no interior é que sejam impelidos para a exterior. Todavia, esta observação se aplica somente no nível do lago. Estudos futuros nesta cavidade devem se estender para a região após o lago, além de realizar testes-piloto com grupos de visitantes para identificar eventuais limites de resiliência e de dispersão atmosférica do ambiente.

REFERÊNCIAS

BADINO, G. The cueva de los Cristales micrometeorology. In: WHITE, W. (Ed.) INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 15, 2009, Kerrville. **Proceedings**. Kerrville: UIS/NSS, 2009, v.3, p.1407-1412.

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.

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.

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

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, J.E.G.; DARDENNE, M.A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, Brasil. v. 27, n.3, p. 269 – 282, 1997.

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.

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.

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

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

FERRARI, J.A.; KARMANN, I. Comportamento hidrodinâmico de sistemas cársticos na bacia do rio Betari, município de Iporanga-SP. **Geologia USP Série Científica**, São Paulo, v.8, n.1, p.1-13, 2008.

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.

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.

GASPAR, M.T.P. **Sistema aquífero Urucuia: Caracterização regional e propostas de gestão**. 2006. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.

GRUPO BAMBUÍ DE PESQUISAS ESPELEOLÓGICAS (GBPE). **Mapa do sistema cárstico do rio João Rodrigues**. Belo Horizonte: s.d. 1 folha.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (INEMA). **Relatório de informações hidrológicas e meteorológicas**. Disponível em: <<http://sistemas.inga.ba.gov.br/sistemas/planilhas/plu/>>. Acesso em: 22 jan. 2012.

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.

KIRCHGÄSSNER, G.; WOLTERS, J. **Introduction to modern time series analysis**. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 274p.

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.

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. **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.

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, 2009.

LOBO, H.A.S.; PERINOTTO, J.A. de J.; BOGGIANI, P.C. Espeleoclima e suas aplicações no manejo do turismo em cavernas. **Revista do Departamento de Geografia**, no prelo. 2012.

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. Pour une meilleure connaissance des systems hydrologiques a partir des analyses corrélatoire 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.

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). **Sciences de la Terre et des Planètes**, v.328, n.5, p.295-301, 1999.

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.

RABELO, L.; ROCHA, L.F.S.; ZILLI, L.A. Monitoramento climático do ambiente cavernícola para determinação da capacidade de visitação – estudo de caso: gruta de Botuverá-SC. In: WORKSHOP MANEJO DE CAVERNAS, 1, São Paulo. **Palestra**. São Paulo: Redespeleo, 2003. Disponível em: <http://www.redespeleo.org/eventos/manejo/apre/Monitoramento_Botuvera_Luis_Rocha.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2010.

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.

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.

STORCH, H. von; ZWIERS, F.W. **Statistical analysis in climate research**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 484 p.

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.

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.

VERÍSSIMO, C.U.V.; RICARDO, J.M.; BARCELOS, A.C.; NOGUEIRA NETO, J.A.; SILVA FILHO, W.F.; NACIMENTO JÚNIOR, J.V.; PAIVA, A.O. Espeleoturismo e microclima da gruta de Ubajara, CE. **Estudos Geológicos**, Recife, v.15, p.244-253, 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.

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.

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2.ed. Burligton: Elsevier, 2006. 627 p.