

# NÍVEIS DE RADÔNIO EM CAVERNAS DO PARQUE ESTADUAL TURÍSTICO DO ALTO RIBEIRA (PETAR)

## RADON LEVELS IN CAVES OF PARQUE ESTADUAL TURÍSTICO DO ALTO RIBEIRA (PETAR)

Simone Alberigi<sup>1</sup> & Brigitte R. S. Pecequilo<sup>2</sup>

Centro de Metrologia das Radiações – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/USP  
[salberigi@usp.br](mailto:salberigi@usp.br)

### Resumo

No presente trabalho são apresentados resultados de medidas das concentrações de radônio em cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) que recebe cerca de 40 mil visitantes por ano. As cavernas escolhidas foram Couto, Água Suja, Laje Branca, Morro Preto, Santana e Alambari de Baixo, por receberem o maior número de turistas. Os níveis de radônio foram determinados entre Outubro de 2003 e Novembro de 2005 e estão numa faixa de 153 Bq.m<sup>-3</sup> a 6607 Bq.m<sup>-3</sup>, sendo observado que, de uma maneira geral, as variações estão associadas às condições climáticas.

**Palavras-Chave:** Radônio; Cavernas; Detectores Sólidos de Traços Nucleares (SSNTD).

### Abstract

*In the present work are show the radon concentrations in caves of Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) with 40,000 visitors annually. The caves evaluated were Couto, Água Suja, Laje Branca, Morro Preto, Santana e Alambari de Baixo, due to be the most frequently visited caves. The radon levels were measured over a period of 26 months, from October 2003 to November 2005 and <sup>222</sup>Rn concentrations founded are in a range from 153 Bq.m<sup>-3</sup> to 6607 Bq.m<sup>-3</sup> and we observed that, in general, the variation could be related to climatic conditions.*

**Key-Words:** Radon; Caves; Solid State Nuclear Tracks (SSNTD).

### Introdução

O radônio (<sup>222</sup>Rn) é um gás nobre que se origina da desintegração radioativa do <sup>226</sup>Ra por decaimento alfa, na série radioativa do <sup>238</sup>U, sendo o único elemento gasoso desta longa série de decaimentos radioativos. Por ser um elemento da família dos gases nobres, dificilmente interage com outros elementos e por ser gasoso, possui a capacidade de emanar do solo ou rocha com extrema facilidade e de se concentrar em ambientes fechados (Eisenbud, 1987). Como urânio e rádio estão sempre presentes no solo, rochas e água, é natural a existência de radônio no ar, que, presente em ambientes a céu aberto, apresenta baixa concentração devido à sua contínua dispersão na atmosfera. Contudo, em ambientes fechados e de pouca ventilação, as concentrações podem atingir valores elevados. Isto fica evidente em minas e cavernas onde a taxa de ventilação é reduzida devido à configuração das mesmas (Binns et al., 1996, Jovanović, 1996, Solomon et al., 1996, Sajó-Bohus et al., 1997, Binns et al., 1998, Pinza-Molina et al., 1999, Przylibski, 1999, Sperrin et al., 2000, Gilmore et al., 2001, Gilmore et al., 2002,

Papachristodoulou et al., 2004, Veiga et al., 2004, Lario et al., 2005).

O interesse em determinar as concentrações de radônio deve-se ao fato de sua inalação estar associada à incidência de doenças respiratórias. Os primeiros relatos datam do século XVI, quando regiões de mineração na Alemanha tornaram-se conhecidas por incidência de uma doença que ficou conhecida como doença da montanha, reconhecida atualmente como câncer no pulmão (Khan et al., 1993). O aumento da mineração de urânio nos anos 40 ocasionou um aumento nos casos de câncer de pulmão em mineiros, o que conseqüentemente conduziu à associação entre exposição ao radônio e câncer de pulmão (Khan et al., 1993). Atualmente, de acordo com relatório da Organização Mundial da Saúde sabe-se que o radônio é a segunda maior causa de câncer no pulmão no mundo, perdendo apenas para o tabaco (Estado de São Paulo, 2006).

Estudos realizados em várias partes do mundo têm demonstrado que as concentrações de radônio no interior de cavernas variam na faixa de 186 a 80000 Bq.m<sup>-3</sup> (Pinza-Molina et al., 1999, Przylibski, 1999, Sajó-Bohus et al., 1997, Sperrin et al., 2000, Gilmore et al., 2002, Papachristodoulou et al., 2004,

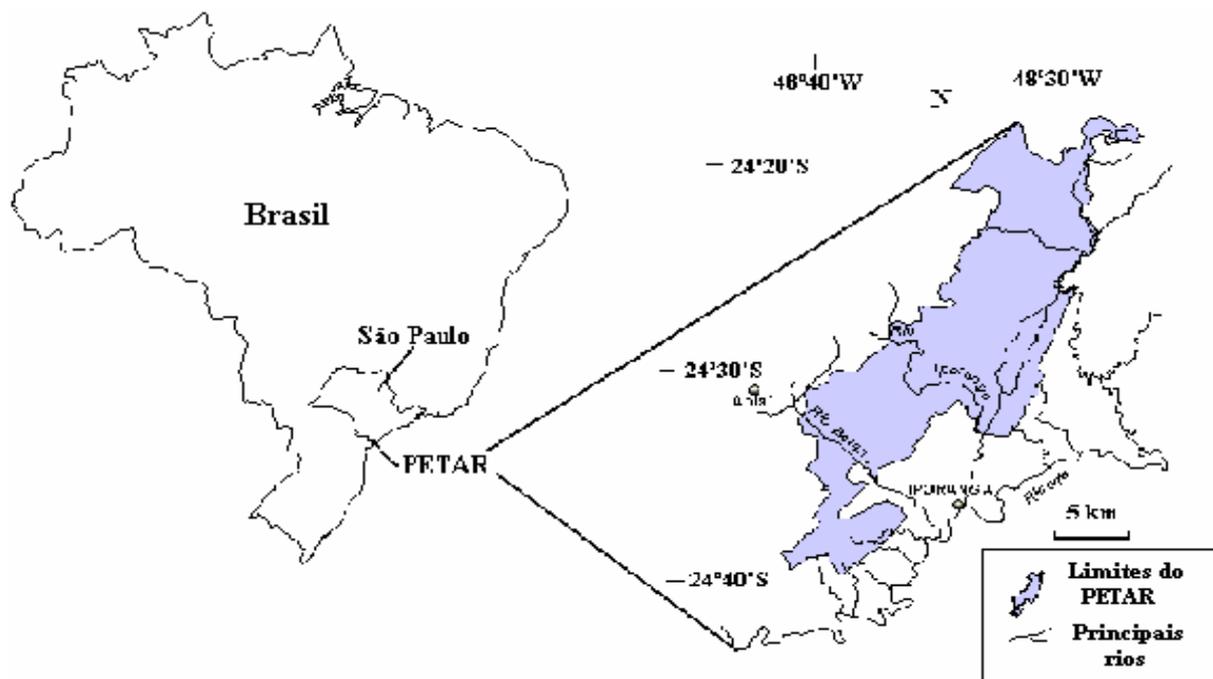
Lario et al., 2005), ultrapassando em muitos casos o limite de concentração de  $^{222}\text{Rn}$ , proposto para nível de intervenção de  $1000 \text{ Bq.m}^{-3}$  (ICRP 65, 1993) e as doses de radiação recebidas pelos indivíduos expostos (guias turísticos, visitantes e pesquisadores).

Face a ocorrência de níveis elevados torna-se necessário o conhecimento dos valores de concentração de radônio em cavernas, bem como a avaliação dos riscos causados pela exposição nestes ambientes, principalmente nas cavernas turísticas.

No Brasil, cerca de 4000 cavernas estão cadastradas no banco de dados da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), (Auler et al., 2001, SBE, 2005). Estudos realizados em Minas Gerais, Bahia e Mato Grosso apresentaram avaliação preliminar dos níveis de radônio em algumas cavernas, resultando em valor médio de  $473 \text{ Bq.m}^{-3}$  (Gouvea et al., 1996). Contudo, não existia em nosso país nenhuma avaliação por tempo prolongado sobre os níveis de radônio e as doses de radiação recebidas pelos freqüentadores destes locais, sejam eles turistas ou guias.

No sul do estado de São Paulo, a região do Vale do Ribeira possui a maioria das cavernas paulistas (Auler et al., 2001, SBE, 2005). O Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), situado entre os municípios de Iporanga e Apiaí (Figura 1), possui mais de 200 cavernas cadastradas representando grande atrativo turístico e recebe cerca de 40.000 visitantes por ano (SBE, 2005). Em estudo preliminar, as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  nas cavernas do núcleo Santana no PETAR variaram entre 500 e  $1000 \text{ Bq.m}^{-3}$ , mostrando a necessidade de levantamento detalhado dos níveis de radônio nesta região (Maduar, 2001)<sup>3</sup>.

O presente trabalho apresenta o levantamento realizado entre Outubro de 2003 a Novembro de 2005, sobre as concentrações de radônio em algumas cavernas do PETAR. Também durante o período de estudo foram consultados bancos de dados sobre medidas de temperatura, umidade relativa do ar e chuvas na região para verificar possível relação entre variações nos resultados e estas variáveis.



**Figura 1** – Localização do PETAR.

### Metodologia e Procedimento Experimental

As concentrações de radônio no interior das cavernas foram determinadas por meio da técnica de detecção passiva. A opção pelo uso de detectores de traços nucleares do estado sólido para medida de radônio neste trabalho deve-se ao baixo custo, ao fato de não ser necessário dispositivo eletrônico associado à medida, necessidade de um procedimento de medida integrada (exposição em

longo prazo dos detectores), e por ser uma técnica de amplo domínio do Laboratório de Radiometria Ambiental do Centro de Metrologia das Radiações do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

Conhecidos pela sigla SSNTD (originada do inglês *Solid State Nuclear Track Detectors*), os Detectores de Traços Nucleares do Estado Sólido são materiais que têm a propriedade de registrar

permanentemente danos causados por radiações nucleares de partículas carregadas pesadas (alfa, prótons e fragmentos de fissão) (Enge, 1980). Estas radiações, ao interagir com estes materiais, depositam energia ao longo de suas trajetórias no material, provocando um desarranjo na estrutura do material, criando cilindros (traços) de dimensões da ordem de ângstrons. Estes traços, invisíveis a olho nú, tornam-se observáveis quando os detectores passam por tratamento químico com soluções adequadas, capazes de ampliar as dimensões dos traços, com um aumento no diâmetro dos traços da ordem de ângstrons para alguns micra, tornando possível sua visualização em microscópio óptico comum (Paulo, 1991). Na técnica de detecção passiva, os detectores são simplesmente expostos ao ar ambiente, não havendo coleta de ar. O princípio básico de funcionamento da detecção passiva está baseado na adsorção e permeabilidade do  $^{222}\text{Rn}$  em diferentes materiais, não sendo necessário o emprego de aparato eletrônico durante as coletas, tornando-se vantajoso quando a medida deve ser realizada em locais de difícil acesso, como no caso de minas e grutas, onde muitas vezes não há ao menos um lugar apropriado para colocação de equipamento (detecção ativa), o trânsito de pessoas é freqüente e o monitoramento por longos períodos completos de trabalho dos guias é mais interessante.

O detector utilizado neste trabalho é o policarbonato Makrofol E (espessura de 100  $\mu\text{m}$ ) de composição química  $\text{C}_{16}\text{O}_3\text{H}_{14}$  produzido pela empresa alemã Bayer. O Makrofol é muito utilizado para revestimento de diversos tipos de materiais, por sua transparência e alta resistência a aquecimento (Bayer, 2004). Ao mesmo tempo, tem se mostrado também um excelente detector de radiação, pois é capaz de registrar partículas carregadas pesadas (alfa, prótons e fragmentos de fissão). Este detector plástico com área de 1  $\text{cm}^2$  é então posicionado no interior de uma câmara de difusão do tipo KFK, que possui pequenas aberturas para entrada do gás.

Foram montadas 33 câmaras de difusão. Em cada uma das câmaras foi colocado na entrada um filtro de fibra de vidro, para retenção de isótopos que poderiam prejudicar as medidas ( $^{220}\text{Rn}$  e filhos do  $^{222}\text{Rn}$ ).

As cavernas do PETAR estão distribuídas em quatro núcleos de visitação: Ouro Grosso, Caboclos, Santana e Casa da Pedra.

Para o estudo em questão foram selecionadas seis cavernas. Embora este número pareça pequeno se comparado ao grande número de cavernas cadastradas atualmente no parque, o critério de escolha foi feito de acordo com o número significativo de visitantes que estas cavernas

recebem, e considerando a viabilidade para acesso e coletas. As cavernas escolhidas pertencem ao núcleo Santana (cavernas Couto,  gua Suja, Laje Branca, Morro Preto e Santana, que d  nome ao núcleo, e recebem cerca de 85% dos visitantes do parque) e ao núcleo Ouro Grosso (caverna Alambari de Baixo). As 33 câmaras de difusão KFK foram distribuídas entre as seis cavernas. Como a caverna Santana é a mais rica em galerias, apresentando uma única entrada, foram escolhidos cinco pontos de monitoramento com três monitores em cada ponto: três pontos de monitoramento foram distribuídos em três galerias abertas ao público (Torres, Cristo e Descanso) e dois pontos de monitoramento posicionados em duas galerias do salão das Flores com visita es proibidas ao público (totalizando 15 monitores).

Para a caverna Morro Preto foram escolhidos dois pontos, o salão conhecido como Plataforma ou Camarote, próximo à entrada e o salão Chocolate ao final da gruta, com coloca o de três monitores em cada salão (total de 6 monitores).

O monitoramento da caverna  gua Suja foi feito no salão do golfinho (com três monitores contendo um detector plástico cada).

A caverna Couto é uma cavidade com um único conduto e duas entradas, uma em cada lado do morro e também esta ligada à caverna Morro Preto (Karmann et al, 1988), também houve coloca o de três monitores posicionados na metade do percurso turístico.

Na caverna Laje Branca o monitoramento foi feito em uma única galeria (com três monitores).

A caverna Alambari de Baixo (núcleo Ouro Grosso) constituída basicamente de duas grandes galerias: a f ssil, cujo nível varia de 30m a 6 m acima do atual curso do rio, e a galeria ativa do rio (IRCN, 2005). O monitoramento foi feito em uma única galeria com coloca o de três câmaras nesta galeria.

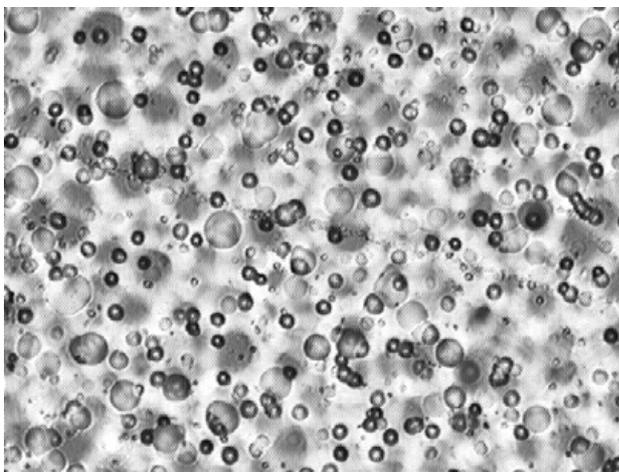
As câmaras de difusão foram penduradas em estalactites no centro dos salões (distantes do teto) como mostrado na Figura 2, ficando expostos por um período mínimo de três meses, procurando estabelecer uma rotina com trocas sazonais entre as mudanças de esta o (Alberigi et al., 2005). O período de avalia o no PETAR teve início em Outubro de 2003 e foi finalizado em Novembro de 2005.

Os detectores, após expostos, foram levados ao IPEN para tratamento químico. O processo de revela o adotado neste trabalho utiliza a soluço alcalina PEW<sup>40</sup> (15% KOH, 40%  lcool etílico e

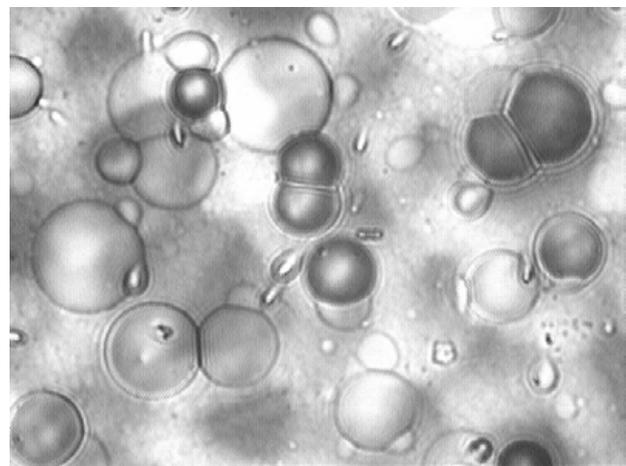
45% de água), em banho-maria a 70°C sob agitação constante, durante um período de 2 horas (César & Franco, 1986). Terminada a revelação, os detectores, após lavagem, são secos e a contagem dos traços é feita com auxílio de um microscópio óptico ZEISS modelo Axiolab com aumento 5x, 10x, 40x e 100x, ligado a uma câmara de vídeo marca JVC TK-600U, e acoplado a um microcomputador PENTIUM MMX de 32 MB de memória RAM. O “software” KS100 versão 3.0 da ZEISS (Zeiss, 1997) permite a visualização dos traços para contagem na tela de um monitor de 17”.



**Figura 2** – Monitor KFK pendurado em estalactite em caverna do PETAR.



(a)



(b)

**Figura 3:** Detector Makrofol E exposto ao ambiente de cavernas  
 (a) aumento 10x no microscópio (b) aumento 40x no microscópio.

A concentração de radônio é determinada por meio da equação 1 (Mayya et al., 1998, Eappen & Mayya, 2004):

$$C_{Rn} = \frac{D}{K \cdot t} \quad (1)$$

Onde:

$C_{Rn}$  = concentração de Rn-222 ( $Bq.m^{-3}$ )

D = densidade (quantidade) de traços ( $traços.cm^{-2}$ )

t = tempo de exposição (dias)

K = eficiência do detector de traços ( $traços.cm^{-2}/Bq.m^{-3}.dias$ ), determinado experimentalmente.

Em todas as coletas, durante a troca das câmaras de difusão KFK, eram feitas medidas de temperatura com termômetro de mercúrio posicionado em uma rocha e umidade relativa do ar com higrômetro posicionado na extremidade de um bastão no interior das cavernas nos pontos de monitoramento citados anteriormente. Também foram coletados dados sobre temperatura externa (Alberigi & Pecequilo, 2007) e chuvas no município de Iporanga em três postos de medidas, afim de observar se os resultados de concentrações de radônio poderiam estar associados também a variações climáticas. A Tabela 1 apresenta as informações e coordenadas dos postos de medidas (IAC, 2005).

**Tabela 1** – Características dos postos de coletas de chuva na cidade de Iporanga.

|                       | <b>Posto 1</b> | <b>Posto 2</b>  | <b>Posto 3</b>    |
|-----------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| <b>Prefixo:</b>       | F5 – 032       | F5 – 042        | F5 – 046          |
| <b>Nome do Posto:</b> | Caboclos       | Serra dos Motas | Intervales        |
| <b>Município:</b>     | Iporanga       | Iporanga        | Iporanga          |
| <b>Bacia:</b>         | Iporanga       | Betari          | Ribeira de Iguape |
| <b>Altitude (m):</b>  | 580            | 240             | 790               |
| <b>Latitude:</b>      | 24°26'         | 24°33'          | 24°16'            |
| <b>Longitude:</b>     | 48°35'         | 48°41'          | 48°25'            |

## Resultados

A Tabela 2 apresenta os resultados de concentrações de radônio e as incertezas associadas obtidas para o período de estudo. A concentração de  $^{222}\text{Rn}$  foi obtida por meio da equação 1. Verificou-se que os resultados obtidos para as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  nas cavernas do PETAR (Tabela 2), embora apresentem em alguns períodos níveis elevados, estão dentro da faixa de variação dos valores da literatura para concentração de radônio em estudos realizados em cavernas de diversos países (Tabela 3). O menor e o maior valor para concentração estão destacados na Tabela 2 e correspondem à monitoração das cavernas Couto e Santana, respectivamente.

Os resultados de temperatura e umidade relativa do ar medidas no interior das cavernas (galerias monitoradas) mostraram-se praticamente constantes sendo constatada pouca variação durante o período (temperatura entre 17°C e 19°C e umidade interna entre 96% e 100%).

Os resultados obtidos para medidas de umidade relativa no interior das cavernas foram comparados com valores obtidos de pesquisas sobre variações climáticas na região do parque, e apresentaram valores similares (entre 90% e 100%) (IAC, 2005).

Também foram comparados os resultados entre temperaturas internas das cavernas e temperaturas externas (temperatura na região do PETAR (Alberigi e Brigitte, 2007).

**Tabela 2** – Concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  no ar das cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) durante período de estudo.

| Caverna/Núcleo                                     | Galerias          | 13/10/03–07/03/04<br>(Prim/Verão) <sup>(a)</sup> | 07/03–07/07/04<br>(Outono) <sup>(a)</sup> | 07/07–11/10/04<br>(Inverno) <sup>(a)</sup> | 11/10/04–3/01/05<br>(Primavera) <sup>(a)</sup> | 13/01–25/03/05<br>(Verão) <sup>(a)</sup> | 25/03–23/07/05<br>(Outono) <sup>(b)</sup> | 23/06–14/11/05<br>(inver/prim) <sup>(c)</sup> |
|--|-------------------|--|---|--|--|--|---|---|
| <b>Concentrações de radônio (Bq/m<sup>3</sup>)</b> |                   |  |   |  |  |  |   |   |
| Alambari de Baixo<br>Ouro Grosso                   | Alambari de Baixo | 516 ± 137  | 1327 ± 432                                | 970 ± 291                                  | 610 ± 179                                      | 382 ± 174                                | 342 ± 89                                  | 370 ± 96                                      |
| Água Suja/Santana                                  | Golfinho          | ..... <sup>(a)</sup>                             | 1674 ± 433                                | 406 ± 124                                  | 1308 ± 346                                     | 834 ± 222                                | 595 ± 184                                 | 255 ± 79                                      |
| Couto/Santana                                      | 1                 | ..... <sup>(a)</sup>                             | 1110 ± 348                                | 611 ± 196                                  | 704 ± 254                                      | 342 ± 161                                | <b>153 ± 44</b>                           | 230 ± 66                                      |
| Morro Preto/Santana                                | Plataforma        | 512 ± 135  | 1223 ± 362                                | 363 ± 128                                  | 677 ± 190                                      | 492 ± 183                                | 354 ± 99                                  | ..... <sup>(b)</sup>                          |
| Laje Branca Santana                                | Chocolate         | 1957 ± 508                                       | 2177 ± 634                                | 417 ± 111                                  | 805 ± 230                                      | 1252 ± 339                               | 652 ± 248                                 | 441 ± 168                                     |
|  | Laje Branca       | 1009 ± 287                                       | 2568 ± 688                                | 1015 ± 291                                 | 2414 ± 272                                     | 3386 ± 884                               | 1325 ± 358                                | 1217 ± 326                                    |
|  | Flores 1          | 2373 ± 609                                       | 2359 ± 631                                | 1488 ± 392                                 | 2481 ± 640                                     | 3160 ± 837                               | 1732 ± 450                                | 2160 ± 552                                    |
| Santana/Santana                                    | Flores 2          | 3972 ± 1088                                      | 3452 ± 912                                | 1952 ± 514                                 | 2135 ± 549                                     | 3583 ± 920                               | 1709 ± 427                                | 1684 ± 429                                    |
|  | Torres            | 4950 ± 1256                                      | 4649 ± 1183                               | 1532 ± 396                                 | 4158 ± 1169                                    | 5065 ± 1266                              | 2754 ± 744                                | 1464 ± 392                                    |
|  | Cristo            | 5811 ± 1453                                      | 3435 ± 889                                | 1841 ± 478                                 | 4438 ± 1133                                    | 5337 ± 1370                              | 2634 ± 658                                | 1684 ± 429                                    |
|  | Descanso          | 6607 ± 1672                                      | <b>6358 ± 1619</b>                        | 1312 ± 381                                 | 4080 ± 1050                                    | 6107 ± 1547                              | 2706 ± 731                                | 1543 ± 418                                    |

<sup>(a)</sup> – Período não monitorado.

<sup>(b)</sup> – Monitor extraviado.

<sup>(c)</sup> – Primavera (23/Set/03 – 21/Dez/03) Verão (22/Dez/03 – 19/Mar/04).

<sup>(d)</sup> – Outono (20/03/04 – 19/Jun/04). <sup>(e)</sup> – Inverno (20/Jun/04 – 21/Set/04).

<sup>(f)</sup> – Primavera (22/Set/04 – 21/Dez/04). <sup>(g)</sup> – Verão (22/Dez/04 – 19/Mar/05).

<sup>(h)</sup> – Outono (20/Mar/05 – 20/Jun/05).

<sup>(i)</sup> – Inverno (21/Jun/05 – 21/Set/05), Primavera (22/Set/05 – 21/Dez/05). (U.S.A. Naval Observatory, 1992).

**Tabela 3** – Resultados sobre níveis de  $^{222}\text{Rn}$  de outras cavernas do Brasil e do Mundo (dados da literatura).

| País        | Tipo de Caverna                     | Concentração de Radônio ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |              |                              | Referência                             |
|-------------|-------------------------------------|---|--------------|------------------------------|--|
|             |                                     | Mínimo  | Máximo       | Média                        |  |
| Brasil      | Cavernas localizadas em MG, MT e BA | -   | -            | 473                          | Gouvea et al., 1996                    |
|             | Cavernas do PETAR                   | 153   | 6607         | -                            | Este trabalho                          |
| Austrália   | 57 turísticas                       | -   | 6330 (anual) | 500(inverno); 795(primavera) | Solomon et al., 1996                   |
| Eslovênia   | Inacessíveis e turísticas           | -   | -            | 2350 – 27000 (ver/inver)     | Jovanovic, 1996 <sup>1</sup>           |
| Polônia     | 2 turísticas                        | 100 (inverno)   | 3600 (verão) | -                            | Przylibski, 1999                       |
| Venezuela   | Turismo e exploração                | 100   | 80000        | -                            | Sajó-Bohus et al., 1997                |
| Reino Unido | 3 turísticas                        | 32  | 12552        | -                            | Sperrin et al., 2000                   |
|             | 1 turística                         | 27  | 7800         | -                            | Gilmore et al., 2002                   |
| Grécia      | Turística                           | 197   | 1929         | 1311(inverno); 925(verão)    | Papachristodoulou et al., 2004         |
| Espanha     | Cavernas Turísticas                 | -   | -            | 300 – 8000                   | Pinza-Molina et al., 1999 <sup>1</sup> |
|             | Turismo e arqueologia               | 186   | 7120         | 3562 (anual)                 | Lario et al., 2005 <sup>2</sup>        |
| Turquia     | 2 turísticas                        | 20  | 5883         | 1919                         | Aytekin et al., 2006                   |

<sup>1</sup>Detecção Passiva, <sup>2</sup>Detecção ativa e passiva.

As informações obtidas sobre as chuvas na cidade de Iporanga dos três postos de coletas (Tabela 1) associadas aos resultados de

concentrações de radônio são apresentadas nas figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9.

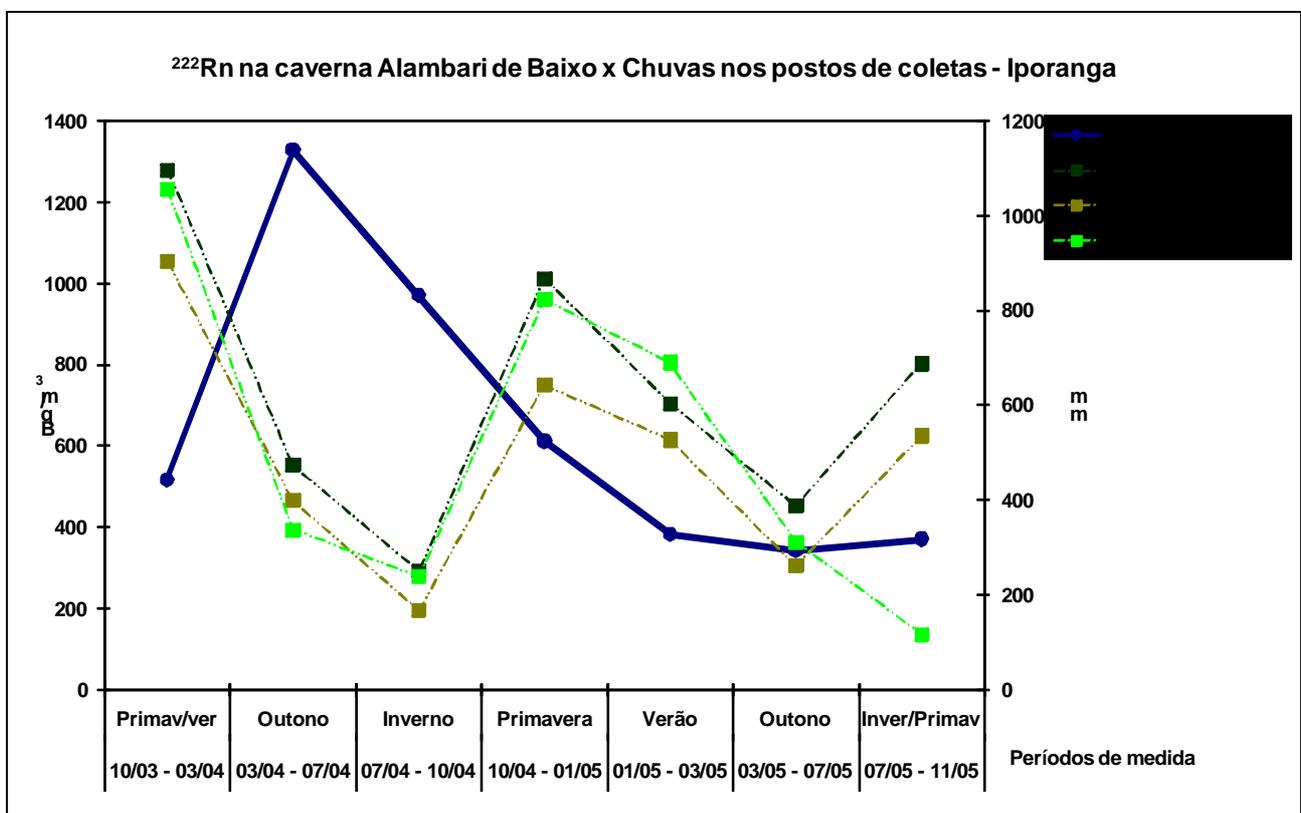


Figura 4 – Relação entre níveis de  $^{222}\text{Rn}$  na caverna A. de Baixo e chuvas na região.

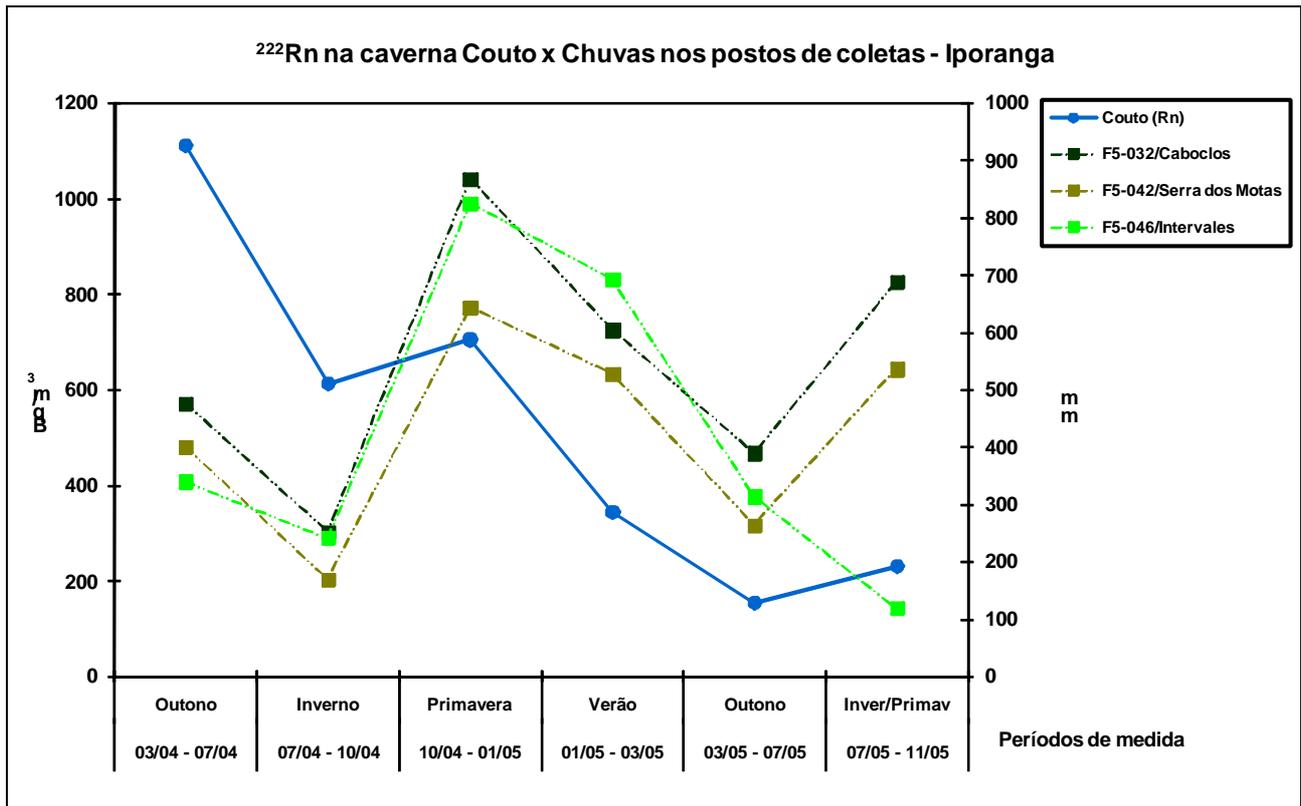


Figura 5 – Relação entre níveis <sup>222</sup>Rn na caverna Couto e chuvas na região.

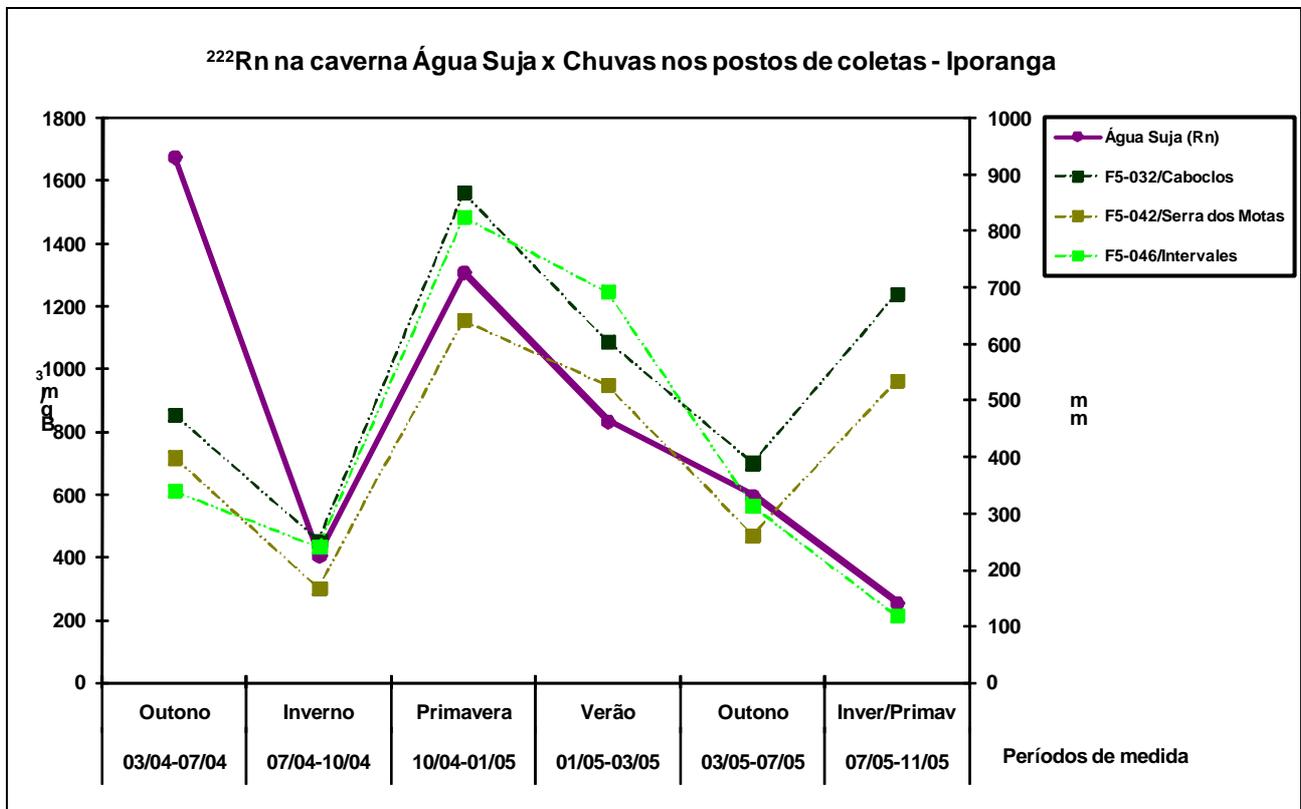


Figura 6 – Relação entre níveis <sup>222</sup>Rn na caverna A. Suja e chuvas na região.

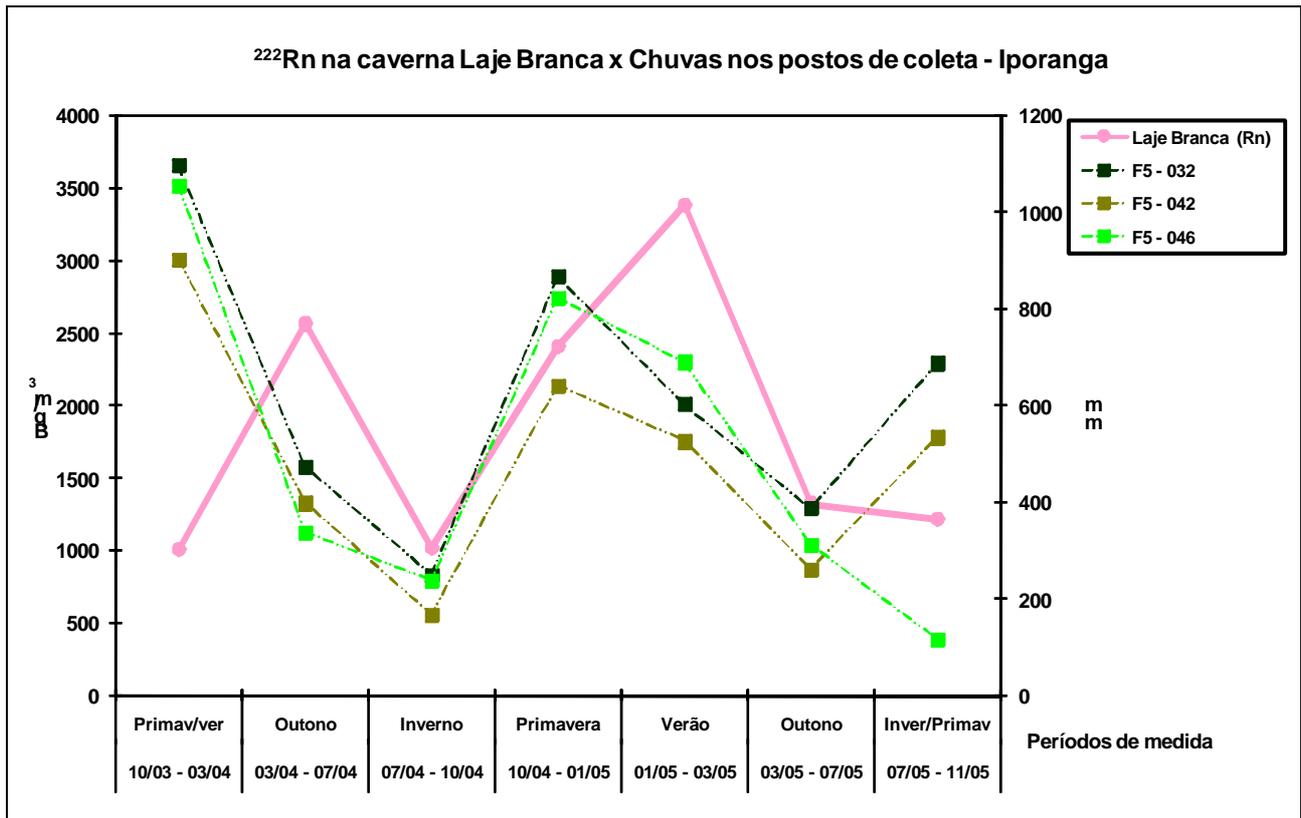


Figura 7 – Relação entre níveis <sup>222</sup>Rn na caverna L. Branca e chuvas na região.

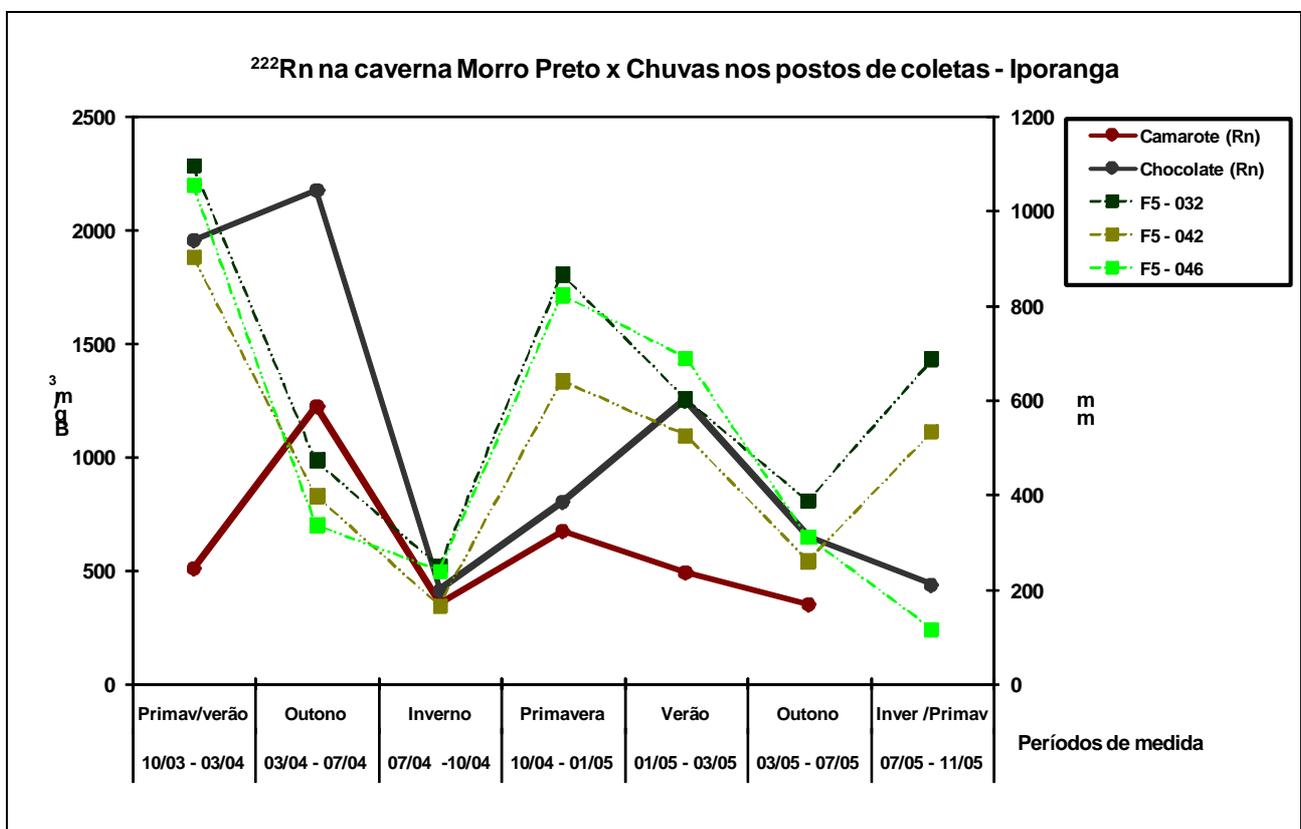


Figura 8 – Relação entre níveis <sup>222</sup>Rn na caverna Morro Preto e chuvas na região.

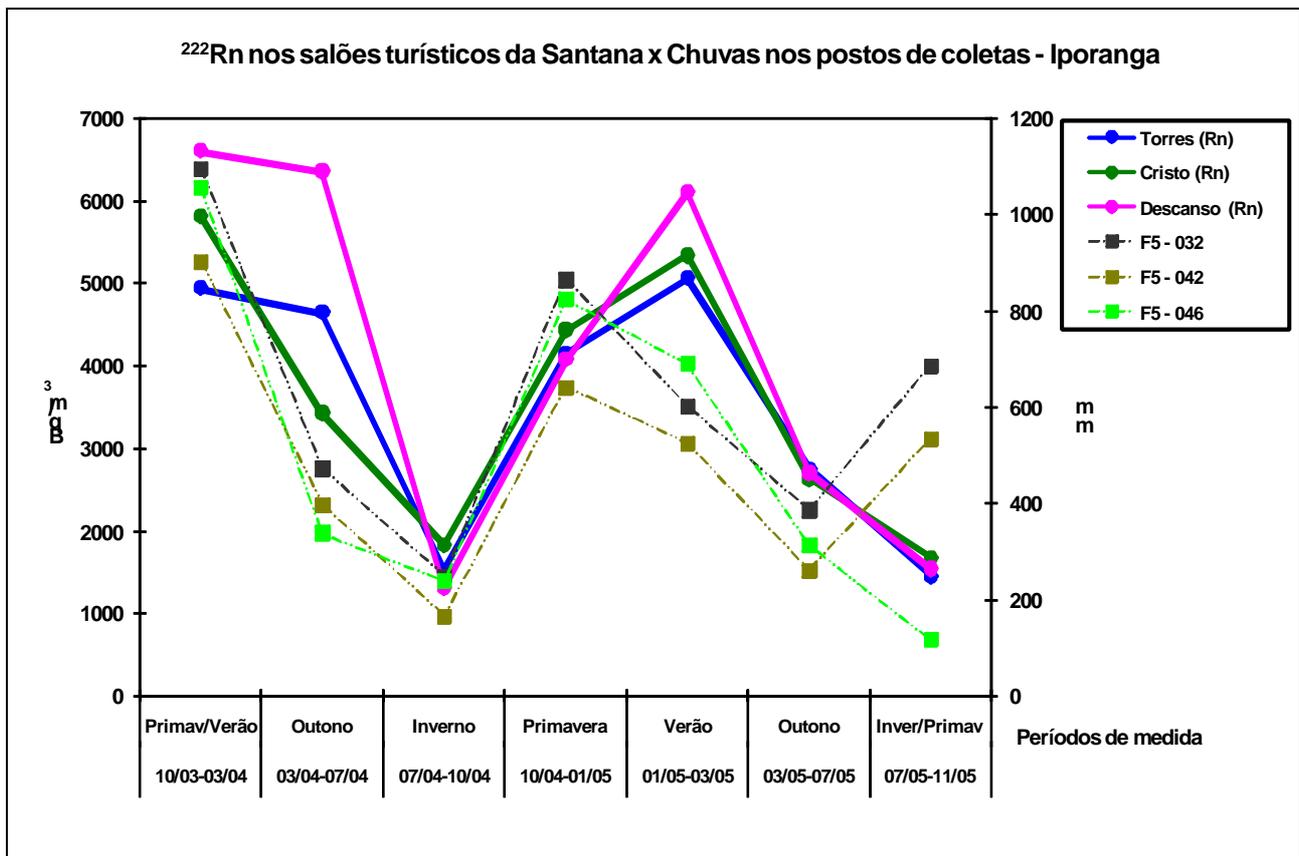


Figura 9 – Relação entre níveis  $^{222}\text{Rn}$  na caverna Santana e chuvas na região.

## Discussões

As concentrações de radônio apresentaram valores elevados, e fica evidente a diferença de valores para concentração entre as cavernas (Tabela 2). Em todas as galerias monitoradas fica claro que as concentrações diminuem em períodos frios e aumentam nas estações mais quentes.

Observa-se para a caverna Couto, que, mesmo com um valor máximo de concentração de radônio obtido no outono, nos demais períodos houve um decréscimo apresentando pouca variação, que pode também estar associado à taxa de ventilação que nesta caverna é a maior devido à pequena extensão e também às duas entradas existentes. Também é necessário relatar que a caverna Couto está ligada à caverna Morro Preto, fato que pode facilitar o escape do gás radônio.

Nos casos das cavernas Água Suja, que possui um rio que atravessa a caverna em quase todo o percurso turístico e apresenta ligação com a gruta Vargem Grande, e Alambari de Baixo que também possui um rio em parte do percurso turístico, e apresenta entrada e saída distintas, os níveis de radônio são inferiores se comparados com os outros resultados obtidos neste estudo. A caverna Alambari de Baixo que também apresentou valores mínimos e máximos para concentração nos mesmos períodos obtidos na caverna Couto, apresentou ainda

resultados que se mantiveram praticamente constantes nos últimos três períodos de medida.

A caverna Morro Preto, que teve dois pontos de monitoramento distribuídos no salão Plataforma (próximo à entrada da caverna) e no salão Chocolate (localizado no final da caverna) apresentou em todos os períodos os maiores valores de concentração de radônio para o salão Chocolate e os menores valores obtidos para o salão Plataforma (Figura 8). Também em ambos os salões houve diminuição de concentração nos períodos de inverno.

A caverna Laje Branca apresentou, tal como a caverna Santana, os maiores níveis de concentração. Observa-se pouca variação entre os períodos, apresentando um valor máximo para o período de verão.

Os maiores resultados de concentração de radônio foram obtidos na caverna Santana, a maior do núcleo, e que merece atenção maior por receber o maior número de turistas. No primeiro e segundo períodos de medida observam-se níveis altíssimos e pouca diminuição entre os mesmos, mantendo-se praticamente constantes. Já para o terceiro período (inverno) ocorre uma acentuada queda destas concentrações. Para os quatro períodos seguintes o comportamento assemelha-se com os resultados obtidos em outros estudos (Przylibski, 2002), aumento em períodos mais quentes com poucas

variações entre si e novamente diminuição em períodos mais frios.

## Conclusão

De uma maneira geral, observa-se que ocorre acentuada diminuição nas concentrações de radônio em períodos de inverno. Este comportamento foi obtido em outros estudos sobre níveis de radônio em outras partes do mundo (Pinza-Molina et al., 1999, Przylibski, 1999, Sperrin et al., 2000, Gilmore et al., 2002, Papachristodoulou et al., 2004,) e alguns pesquisadores atribuem esta diminuição ao gradiente existente entre a temperatura no interior da caverna e a temperatura externa (Gilmore et al., 2002). Nos meses de inverno, quando a temperatura externa freqüentemente toma valores mais baixos do que a temperatura interna da caverna (em torno de 19°C), a diferença de temperatura entre o ar da caverna (“quente”) e o ar do ambiente externo (“frio”) faz com que massas de ar quente “mais leve” sejam deslocadas para fora da caverna e, conseqüentemente, o radônio também é levado para fora, diminuindo assim os níveis de radônio no interior das grutas (Przylibski, 1999). No verão não há diminuição, e, conseqüentemente os níveis de radônio apresentam-se elevados.

O Brasil, como país de clima tropical e em particular, na região estudada, as quatro estações do ano não são bem diferenciadas, e os invernos não são tão rigorosos como em países de clima temperado. Assim, a inexistência de grandes gradientes de temperatura na região é insuficiente para justificar a elevação ou diminuição dos níveis de radônio apenas pelas trocas de ar interno e externo das cavernas, e fazer uma única afirmação sobre as causas dos elevados índices de concentrações.

Portanto, as variações nas concentrações de radônio podem também estar relacionadas com as características de cada caverna (configuração, taxa de ventilação, etc.) e as variações climáticas no período. Observando a Tabela 2 para cada uma das cavernas verifica-se que cada uma delas apresenta resultados particulares, resultantes de características peculiares.

Em uma primeira análise, podemos concluir que os resultados obtidos para as três cavernas (Couto, Água Suja e Alambari de Baixo) se assemelham muito e apresentam os menores níveis de radônio se comparados com as outras cavernas, fato que pode estar associada à semelhança de configuração entre as três ao menos em algum aspecto, Couto assemelha-se a caverna Água Suja, pois ambas estão ligadas a outras cavernas, Couto

assemelha-se a caverna Alambari de Baixo, pois ambas possuem entrada e saída, Água Suja assemelha-se a caverna Alambari, pois ambas têm rio em parte do percurso turístico. Também é possível associar os resultados de menores níveis de radônio obtidos a alguma fuga do gás, à maior taxa de ventilação existente nestas cavernas e conseqüentemente maior troca de ar interno com o ambiente externo.

Para a caverna Morro Preto, em todos os períodos, os maiores níveis de radônio ocorrem no salão Chocolate. Este resultado está relacionado ao fato de que, com o aumento da distância entre a entrada e o ponto de monitoramento, a ventilação é reduzida, aumentando assim os níveis do gás radônio.

As cavernas Laje Branca e Santana apresentaram os maiores níveis de radônio, conseqüência de suas configurações e taxas de ventilação reduzidas. Também é observado para caverna Santana comportamento análogo ao obtido na caverna Morro Preto, aumento das concentrações com o aumento da distância entre a entrada e os pontos de monitoramento, indicando relação direta entre aumento das concentrações e diminuição na taxa de ventilação.

Durante todo o período de estudo houve medição de temperatura e umidade relativa do ar no ambiente das cavernas; buscou-se também o levantamento de dados sobre as condições climáticas da região no período de interesse, que conduzem a formulação de hipótese que relaciona as variações nas concentrações à variação na temperatura externa (Alberigi & Pecequilo, 2007). Contudo, a complexa dinâmica do radônio em ambientes naturalmente subterrâneos sugere que seria útil e necessária a implementação de um monitoramento contínuo para medidas de radioproteção em cavernas turísticas.

De acordo com as figuras 4 a 9, aparentemente as concentrações de radônio decrescem (acentuadamente em cavernas mais fechadas).

Os altos níveis de radônio em cavernas estão associados a uma complexa inter-relação de diferentes fatores, ambos externos e internos: diferenças entre temperatura do ambiente interior e exterior, velocidade dos ventos, variações da pressão atmosférica, umidade, geomorfologia cárstica, porosidade nas rochas, quantidade de rádio presente nos sedimentos e rochas e microclima nas cavernas são alguns dos fatores que podem contribuir para elevação das concentrações de radônio.

Os presentes resultados e interpretações são preliminares face ao estágio inicial da pesquisa que segue em andamento, com a investigação dos fatores climáticos já citados, determinação experimental de fatores de equilíbrio, concentrações do radônio e tempo de exposição para uma estimativa de dose de radiação para indivíduos expostos (monitores ambientais, visitantes e pesquisadores).

### Agradecimentos

O trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2003/08146-2 e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 134087/03-8. Contou com a colaboração do Sr. Modesto (diretor do Parque) e todos os funcionários do PETAR. Contribuíram para realização do trabalho os monitores ambientais Orley e o Sr. Jurandir (administrador da Pousada Rancho da Serra).

### Referências Bibliográficas

- Alberigi, S., Pecequilo, B.R.S. & Campos, M.P. 2005. Radon concentrations in caves of Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP, Brazil: preliminary results, *International Congress Series*, Elsevier, v. 1276, p. 403–404.
- Alberigi, S. & Pecequilo, B.R.S. 2007. *Caves of Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP, Brasil: A Study of indoor radon levels and impacto of seasonal temperature and humidity* In: International Nuclear Atlantic Conference, VIII ENAN, Santos, Brasil. CD - ROM.
- Auler, A., Rubbioli & E. Brandi, R. 2001. *As grandes cavernas do Brasil*, Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, Belo Horizonte.
- BAYER MATERIAL SCIENCE. 2004. Plastic Technologic Center, disponível em: <www.bayer.com.br>. Acesso: 25/09/2004.
- Binns, D.A.C., Tolentino, J., Gouvea, V.A. & Melo, V.P. 1996. *Determinação de Radônio-222 no ambiente subterrâneo das mineradoras de ouro da região de Nova Lima – MG, Brasil*, In: VI Congresso Geral de Energia Nuclear, Poços de Caldas, Brasil, CD-ROM.
- Binns, D.A.C., Figueiredo, N., Melo, V.P. & Gouvea, V.A. 1998. Radon-222 measurements in a Uranium-prospecting area in Brazil, *Journal of Environmental Radioactivity*, 38 (2): 249–254.
- César, M.F. & Franco, M.A.R. 1986. Some studies on the registration of particles on Makrofol E, *Nuclear Tracks*, 12 (1–6): 193–196.
- Eappen, K.P. & Mayya, Y.S. 2004. Calibration factors for LR-115 (type-II) based radon thoron discriminating dosimeter, *Radiation Measurements*, 38: 5–17.
- Eisenbud, M. 1987. *Environmental Radioactivity*. 2nd ed. Academic Press, Orlando.
- Enge, W. 1980. Introduction to plastic nuclear track detectors, *Nuclear Tracks*, 4 (4): 283 – 308.
- Estado de São Paulo. 2006. *Gás radônio é a segunda maior causa de câncer de pulmão*, São Paulo, 21 Jun. 2006.
- Gilmore, G.K., Phillips, P., Denman, A., Sperrin, M. & Pearce, G. 2001. Radon levels in abandoned metalliferous mines, Devon, Southwest England, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 49: 281–292.
- Gilmore, G.K., Phillips, P.S., Denman, A.R. & Gilbertson, D.D. 2002. Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves, *Journal of Environmental Radioactivity*, 62: 165–179.
- Gouvea, V.A., Melo, V.P. & Binns, D.A.C. 1996. *Concentração de Radônio-222 em interiores de grutas, cavernas e em regiões de mineração no Brasil*, In: VI Congresso Geral de Energia Nuclear, Poços de Caldas, Brasil. CD-ROM.

- IAC – Instituto Agrônomo de Campinas. 2005. disponível em [www.iac.gov.br](http://www.iac.gov.br). Acesso em 25/11/2005.
- IRCN – Índice de Referências de Cavidades Naturais. 2005. disponível em [www.geocites.com/ircnsp](http://www.geocites.com/ircnsp). Acesso em 06/12/2005.
- Jovanovic, P. 1996. Radon measurements in karst caves in Slovenia, *Environment International*, 22: S429–S432. Supplement 1.
- Karmann, I., Batistucci, N.L.N., Philadelphi, M.A., Boggiani, P.C., Alcover Neto, Pissato, E., Barros, E.J., Silva, E.L., Mattos, A.C.Y., Shinohara, E.J. & Mihaly, P. 1988. *Grupo de Espeleologia da Geociências – USP*. Mapeamento das cavernas Água Suja e Conjunto Morro Preto Couto.
- Khan, H., A, Qureshi, I.E. & Tufail, M. 1993. Passive dosimetry of radon and its daughters using solid state nuclear track detectors (SSNTDs), *Radiation Protection Dosimetry*, 46 (3): 149-170.
- Lario, J., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Cuezva, S. & Soler, V. 2005. Radon continuous monitoring in Altamira cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose, *Journal of Environmental Radioactivity*, 80: 161–174.
- Mayya, Y. S., Eappen, K.P. & Nambi, K.S.V. 1998. Methodology for mixed field inhalation dosimetry in monazite areas using a twin-cup dosimeter with three track detectors, *Radiation Protection Dosimetry*, v77 (3): 177–184.
- Papachristodoulou, C.A., Ionnides, K.G., Stamoulis, K.C., Patiris, D.L. & Pavlides, S.B. 2004. Radon activity levels and effective doses in the Perama Cave, Greece, *Health Physics*, 86 (6): 619–624.
- Paulo, S.R. 1991. *Dosimetria ambiental de Rn-222 e filhos: Medida da eficiência absoluta do CR-39 levando-se em conta os efeitos do plate-out e fatores ambientais*. Tese (Doutorado) – Universidade de Campinas, Campinas.
- Pinza-Molina, C., Alcaide, J.M., Rodriguez-Bethencourt, R. & Hernandez-Armas, J. 1999. Radon exposures in the caves of Tenerife (Canary Islands), *Radiation Protection Dosimetry*, 82 (3): 219–224.
- Prizylibskiĭ, T.A. 1999. Radon concentration changes in the air of two caves in Poland, *Journal of Environmental Radioactivity*, 45: 81 –94.
- Sajó-Bohus, L., Greaves, E.D., Pálfavi, J., Urbani, F. & Merlo, G. Radon concentration measurements in Venezuelan caves using SSNTDS, *Radiation Measurements*, 28 (1–6): 725–728.
- SBE – Sociedade Brasileira de Espeleologia. 2005. – disponível em [www.sbe.com.br](http://www.sbe.com.br). Acesso: 15/03/2005.
- Solomon, S.B., Langroo, R., Lyons, R.G. & James, J.M. 1996. Radon exposure to tour guides in Australian show caves, *Environment International*, 22: S409–S413. Supplement 1.
- Sperrin, M., Denmam, T. & Phillips, P.S. 2000. Estimating the dose from radon to recreational cave users in the Mendips, UK, *Journal of Environmental Radioactivity*, 49: 235-240.
- Veiga, L.H.S., Melo, V., Koifman, S. & Amaral, E.C.S. 2004. High radon exposure in a Brazilian underground coal mine, *Journal of Radiological Protection*, 24: 295–305.
- Zeiss, C. 1997. KS 100 Imaging System Release 3.0. CD-ROM.

**Fluxo editorial:**

Recebido em: 12.05.2008

Enviado para avaliação em: 13.05.2008

Enviado para correção aos autores em: 16.06.2008

Aprovado em: 24.06.2008

---



A *Pesquisa em Turismo e Paisagens Cársticas* é uma publicação da Seção de Espeleoturismo da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SeTur/SBE). Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

[www.sbe.com.br/turismo.asp](http://www.sbe.com.br/turismo.asp)

---

<sup>1</sup> Licenciada em Física (UNESP), Mestre em Tecnologia Nuclear Aplicações (IPEN/USP).

<sup>2</sup> Bacharel em Física (USP), Doutora em Tecnologia Nuclear Aplicações (IEA/USP).

<sup>3</sup> Comunicação pessoal.