INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

SOBRE A INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS NOS NÍVEIS DE RADÔNIO EM CAVERNAS DOS PARQUES ESTADUAIS DO VALE DO RIBEIRA, SP E AVALIAÇÃO DO EQUILÍBRIO RADIOATIVO E FATOR DE EQUILÍBRIO ENTRE RADÔNIO E SEUS DESCENDENTES

SIMONE ALBERIGI

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações.

Orientadora:

Dra. Brigitte Roxana Sorenau Pecequilo

SÃO PAULO

2011

Dedico este trabalho aos meus amados:

esposo Caio Lucidius Naberezny Azevedo,

à minha orientadora Dra. Brigitte Roxana Soreanu Pecequilo,

à D. Benedita Elias e Sr. José Rufino Elias “Juca” (*in memoriam*),

e aos meus sobrinhos.

Caio:

"Melhor é serem dois do que um, porque tem melhor paga do seu trabalho. Porque, se um cair, o outro levanta o seu companheiro, mas ai do que estiver só; pois caindo, não haverá outro que o levante. Também se dois dormirem juntos, eles se aquentarão, mas um só como se aquentará? E se alguém quiser prevalecer contra um, os dois lhe resistirão; e o cordão de três dobras não se quebrará tão facilmente."
(Eclesiastes 4: 9-12)

"Um verdadeiro amigo é alguém que pega a sua mão e toca o seu coração."
(Gabriel Garcia Marquez)

Dra. Brigitte:

"O valor das coisas não está no tempo em que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e **pessoas incomparáveis**."
(Fernando Pessoa)

Beto:

"A amizade é um meio de nos isolarmos da humanidade cultivando algumas pessoas."
(Carlos Drummond de Andrade)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo amor infinito, por suprir todas as minhas necessidades e por me colocar exatamente onde eu deveria estar, mesmo que por muitas vezes eu relute e não entenda o seu trabalhar em minha vida.

Agradeço à minha mãe pelo amor, dedicação e apoio sempre.

Agradeço ao meu esposo Caio pela paciência, amizade, cumplicidade e bom humor cultivados durante esses anos. Por seu amor, apoio e exaustivo incentivo para que eu não desistisse desta etapa de minha vida. Sem você este momento não aconteceria! Obrigada por trazer paz e felicidade aos meus dias.

Agradeço à minha orientadora Dra. Brigitte pela acolhida quando cheguei ao IPEN em 2003 e por me orientar. Sou uma afortunada por ter tido a oportunidade de conhecer e trabalhar com uma pessoa tão íntegra e rica como à senhora. Muito obrigada por sempre ter tentado me ajudar, sei que passou por cima de muitas coisas preocupando-se com meu bem estar e procurando sempre a melhor forma de me ajudar. Mais que uma orientadora, foi uma mãe para mim aqui no IPEN. Muitas e agradáveis serão as lembranças que levarei comigo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de doutorado e taxa de bancada que proporcionou a compra de equipamentos e todo material de laboratório necessário para a execução deste trabalho, bem como financiamento de algumas viagens de coletas (CNPq processo nº 142165/2006-9).

Agradeço à Dra. Joselene Oliveira por todo apoio e incentivo. Por ter propiciado a viagem ao PETAR para colocação dos monitores de radônio e coletas de água. Por me incluir no plano de manejo relacionado ao tema recursos hídricos, pela ajuda durante as coletas e supervisão com a análise das amostras de água. Muito obrigada pelas palavras de incentivo tentando me motivar sempre.

Agradeço ao Dr. José Antonio Ferrari e ao Dr. Gustavo Armani do Instituto Geológico de São Paulo por toda a ajuda com as trocas dos detectores e fornecimento de dados de chuva na caverna Santana.

Agradeço ao MSc. Heros Lobo por fornecer dados sobre temperatura no interior da caverna Santana e pela colocação dos detectores nas galerias mais profundas desta caverna.

Agradeço a banca examinadora deste trabalho composta pelos professores doutores Ivo Karmann, José Antonio Ferrari, Almy Anacleto da Silva e Reinaldo Pugliesi que contribuíram muito com as discussões, correções e sugestões.

À Dra. Marina Koskinas pela conversa que tivemos no laboratório de traços me incentivando com o trabalho.

Agradeço às minhas amigas Rosa Chura, Elaine Wirney, Lilian Caccuri e ao amigo Zildete Rocha pelo apoio e palavras de incentivo.

Ao amigo José Alberto da Silva (Beto) pela bela amizade. Além dos meus irmãos de sangue tenho certeza que você foi um irmão mandado por Deus. Sei que posso confiar em você em todas as horas. Sinto muito orgulho de poder chamá-lo de amigo.

Ao Instituto Florestal por autorizar a realização das coletas no PETAR.

Ao Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas do Instituto Agronômico de Campinas por disponibilizar dados de precipitação e temperaturas da região.

Ao Vandir Andrade Junior gerente da Pousada da Diva pela atenção e por prontificar-se em esclarecer todas as dúvidas sobre tempo gasto nas visitas.

Ao IPEN e a USP por permitirem a utilização de toda estrutura física necessária para a realização do trabalho e por dispor de excelente corpo docente que muito contribuiu para minha formação.

À Coordenadoria de Assistência Social (COSEAS) pela concessão da bolsa moradia.

Aos funcionários e colegas bolsistas da Gerência de Metrologia das Radiações.

“Todo o meu patrimônio são os meus amigos.”
(Emily Dickinson)

“Nossas dúvidas são traidoras e nos fazem perder, o quê com freqüência poderíamos ganhar, por simples medo de arriscar.”
(William Shakespeare)

“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como o sino que retine. E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes,
e não tivesse amor, nada seria.”
(1 Coríntios 13:1-2)

SOBRE A INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS NOS NÍVEIS DE RADÔNIO EM CAVERNAS DOS PARQUES ESTADUAIS DO VALE DO RIBEIRA, SP E AVALIAÇÃO DO EQUILÍBRIO RADIOATIVO E DO FATOR DE EQUILÍBRIO ENTRE RADÔNIO E SEUS DESCENDENTES

Simone Alberigi

RESUMO

No presente estudo foi realizado monitoramento de radônio em cavernas distribuídas em três parques estaduais de São Paulo. As concentrações de radônio foram determinadas nas cavernas Morro Preto e Santana pertencentes ao Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), na caverna do Diabo pertencente ao Parque Estadual de Jacupiranga (PEJ) e na caverna Colorida localizada no Parque Estadual Intervales (PEI).

O monitoramento abrangeu medidas entre Abril de 2009 e Junho de 2010. As concentrações de radônio foram determinadas utilizando a técnica de detecção passiva com detectores de traços nucleares do estado sólido tipo CR-39 e câmaras de difusão NRPB. Os detectores foram expostos em períodos variando desde 30 até 150 dias.

As concentrações de radônio variaram de 132 Bq/m^3 a 9456 Bq/m^3. Os resultados das concentrações de radônio foram analisados juntamente com informações sobre quantidade de chuvas no local monitorado, valores de temperatura interna e externa ao ambiente da caverna Santana e informações da literatura de chuva e temperatura na região para uma possível relação entre as variações nos níveis de radônio e informações climáticas.

A determinação de ^{226}Ra em amostras de água coletadas em algumas cavernas e rios da região e de radônio emanado da estalactite coletada na caverna Santana permitiu verificar que o radônio nas cavernas é proveniente das rochas das paredes.

A verificação do equilíbrio radioativo entre ^{222}Rn, ^{218}Po e ^{214}Po nos detectores expostos foi prejudicada pelas altas densidades de traços, comprometendo a eficácia da metodologia empregada.

A dose efetiva anual foi calculada adotando três valores obtidos da literatura para o fator de equilíbrio. Para o cenário mais realista com fator de equilíbrio igual a 0,5 e considerando 52 semanas de trabalho, a dose efetiva anual foi de 5,1 mSv/a.

Para o pior cenário que simula uma situação extrema adotando fator de equilíbrio igual a 1 e 52 semanas de trabalho, a dose efetiva anual é 10,2 mSv/a.

Também com informações recebidas de uma empresa de monitoria da região sobre as horas que seus guias turísticos gastam mensalmente no interior das cavernas, foi feita estimativa de dose que resultou em uma dose efetiva anual total de 8,5 mSv/a para fator de equilíbrio 0,5 e, para a pior situação o resultado foi de 17,0 mSv/a para fator de equilíbrio 1.

Todas as estimativas de doses mantiveram-se abaixo do limite para dose efetiva anual para exposição ocupacional de 20 mSv/a recomendado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica.

ON THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON RADON LEVELS IN CAVES OF RIBEIRA VALLEY STATE PARKS, SP AND EVALUATION OF RADIOACTIVE EQUILIBRIUM AND EQUILIBRIUM FACTOR BETWEEN RADON AND ITS PROGENY

Simone Alberigi

ABSTRACT

In the present study it was carried out the monitoring of radon in caves distributed among three state parks of Sao Paulo. The radon concentration were determinate in Morro Preto and Santana caves, located at PETAR – Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (High Ribeira River Tourist State Park), Diabo cave, situated in PEJ – Parque Estadual de Jacupiranga (Jacupiranga State Park) and Colorida cave located in PEI – Parque Estadual Intervales (Intervales State Park PEI).

The monitoring covered measurements between April 2009 and June 2010. Radon concentrations were carried out by using the technique of passive detection with CR-39 solid state nuclear track detectors and NRPB diffusion chambers. The detectors were exposed in periods ranging from 30 to 150 days.

Radon concentrations varied from 132 Bq/m^3 to 9456 Bq/m^3. The values of radon concentrations were analyzed together with information about rainfall and internal and external temperature values of the Santana cave environment and regional literature values for a possible relationship between radon variations and weather information.

Both the determinations of ^{226}Ra in water samples collected in some caves and rivers and radon emanation from a stalactite collected at Santana cave allowed to verify that the radon in the caves comes from the walls rocks.

The verification of the radioactive equilibrium between ^{222}Rn, ^{218}Po and ^{214}Po in the exposed detectors was prejudiced by the high tracks densities, committing the methodology effectiveness.

The annual effective dose was calculated for three values obtained from the literature for the equilibrium factor. Considering the most realistic scenario, with equilibrium factor of 0.5 and 52 working weeks, the annual effective dose was 5.1 mSv/y.

Concerning the worst scenario, which simulates an extreme case, adopting an equilibrium factor equal to 1 and 52 weeks of work per year, the annual effective dose is 10.2 mSv/y.

Also with information received from a monitoring company in the region about the hours their touristic guides spent monthly inside the caves, it was estimated the received dose that resulted in a total annual effective dose of 8.5 mSv/y, considering an equilibrium factor 0.5 and, for the worst scenario of an equilibrium factor of 1, the result was 17.0 mSv/y.

All estimated doses values are below 20 mSv/y, which is the upper limit of annual effective dose for occupational exposure recommended by the International Commission on Radiological Protection.

SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO.....14

1.1 Fontes naturais de radiação.....14

1.2 O Radônio e equilíbrio radioativo entre seus descendentes.....15

1.2.1 Fator de Equilíbrio.....17

1.3 Breve histórico dos Detectores de Traços Nucleares do Estado Sólido.....19

1.3.1 O CR-39.....20

1.4 Monitoramento de Radônio em Cavernas.....21

1.5 Rádio em água.....25

2. OBJETIVOS.....29

3. CAVERNAS.....30

3.1 Regiões Cársticas do Brasil.....30

3.2 Localização da área de estudo e escolha das cavernas monitoradas.....31

3.2.1 O Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR).....32

3.2.1.1 Caverna Morro Preto.....33

3.2.1.2 Caverna Santana.....34

3.2.2 O Parque Estadual de Jacupiranga (PEJ).....35

3.2.2.1 Caverna do Diabo.....36

3.2.3 O Parque Estadual Intervales (PEI).....37

3.2.3.1 Caverna Colorida.....38

4. METODOLOGIA.....40

4.1 Detecção passiva para determinar a concentração de ^{222}Rn no ar.....40

4.2 Radiação de Fundo em Detectores de Traços Nucleares.....40

4.3 O monitor NRPB.....41

4.4 O Ataque Químico.....43

4.5 Contagem de traços.....43

4.6 Determinação da concentração de ^{222}Rn.....45

4.7 Estudo do equilíbrio radioativo entre ^{222}Rn e seus descendentes dentro do monitor NRPB.....46

4.8 Determinação das concentrações dos isótopos de rádio de meias-vidas longas, ^{226}Ra e ^{228}Ra em amostras de água subterrânea e água de superfície.....48

4.9 Determinação da dose efetiva devido à inalação de ^{222}Rn.....49

4.10 Dados Ambientais.....52

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....55

5.1 Instalação dos monitores de ^{222}Rn nas cavernas.....55

5.2 Revelação dos detectores expostos nas cavernas.....56

5.3 Visualização dos traços.....56

5.4 Verificação do equilíbrio radioativo entre ^{222}Rn e seus descendentes no monitor NRPB.....58

5.5 Pontos de coletas das amostras de água subterrânea e de superfície.....62

5.6 Coleta de estalactite da caverna Santana para medida de concentração de ^{222}Rn.....64

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....66

6.1 Fator de leitura de traços.....66

6.2 Concentração de ^{222}Rn no ar das cavernas.....66

6.3 Concentrações dos isótopos de rádio de meias-vidas longas, ^{226}Ra e ^{228}Ra em amostras de água subterrânea e água de superfície.....80

6.4 Concentração de ^{222}Rn na amostra da estalactite da caverna Santana.....83

6.5 Equilíbrio Radioativo entre ^{222}Rn e seus descendentes no monitor NRPB.....84

6.6 Estimativas de dose efetiva anual devida à inalação de ^{222}Rn.....86

7. CONCLUSÕES.....91

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....96

REFERÊNCIAS BIBIOGRÁFICAS.....97

1. INTRODUÇÃO

1.1 Fontes naturais de radiação

O homem está continuamente exposto a fontes de radiação de origem natural e artificial, das quais as fontes de origem natural representam a maior contribuição na dose recebida. As fontes de origem natural podem ser oriundas do espaço (radiação cósmica) e de radionuclídeos que estão presentes no solo, materiais de construção, água e ar (radiação terrestre ou radionuclídeos primordiais, que são assim chamados por apresentar meia-vida comparável à idade do planeta Terra) ou em alimentos.

A irradiação do corpo humano por fontes externas deve-se principalmente à radiação gama de radionuclídeos das séries naturais do ^{238}U, ^{232}Th e do ^{40}K e seus produtos de decaimento existentes em quantidades significativas. Alguns desses radionuclídeos estão também presentes no corpo e irradiam os vários órgãos com partículas alfa e beta, bem como radiação gama. Outros radionuclídeos terrestres como ^{176}Lu ^{87}Rb, ^{138}La, ^{147}Sm e a série do ^{235}U, existem na natureza, mas em níveis tão baixos que sua contribuição para a dose em humanos pode ser desprezada. Estima-se que a dose efetiva anual média resultante de fontes naturais seja de 2,4 mSv (UNSCEAR, 2000).

Dos dois tipos de radiação natural, a radiação terrestre é a maior fonte de irradiação natural, contribuindo com cerca de 85% para dose anual média recebida pela população, com 14% decorrente do ^{40}K, 17% resultante das séries do ^{238}U e do ^{232}Th e 54% devido ao radônio (Eisenbud, 1987).

Existem naturalmente três isótopos do radônio (NCRP-97, 1998), o ^{222}Rn, mais conhecido como radônio, membro da série do ^{238}U, o ^{220}Rn, mais conhecido como torônio, por ser originado da série do ^{232}Th, e o ^{219}Rn, também chamado de actinônio, por descender da série do actínio ou ^{235}U, todos radioativos e emissores de partículas alfa. Devido às curtas meias-vidas do ^{220}Rn (55,6 s) e ^{219}Rn (3,96 s) e pelo fato do ^{235}U representar apenas 0,71% do urânio natural, a maior preocupação concentra-se na determinação do ^{222}Rn que apresenta maior meia-vida (3,8 dias), embora a contribuição devida ao ^{220}Rn não seja totalmente desprezível (Steinhausler et al., 1994), principalmente

em lugares com alta concentração de minerais ricos em tório. Para fins deste trabalho, “radônio” ou Rn-222 ou ^{222}Rn representam, indistintamente, o radionuclídeo ^{222}Rn.

A maior parte da dose de radiação devido a fontes naturais é atribuída ao radônio e seus descendentes de meia-vida curta (^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi e ^{214}Po). Esta contribuição é aproximadamente 1,1 mSv/a e representa aproximadamente metade da dose total (UNSCEAR, 2000).

1.2 O Radônio e equilíbrio radioativo entre seus descendentes

O ^{222}Rn é um gás nobre que se origina da desintegração radioativa do ^{226}Ra por decaimento alfa, que por sua vez é membro da série radioativa do ^{238}U (FIG. 1), sendo o único elemento gasoso desta série. Como urânio está presente no solo e rochas, é natural a existência de rádio e radônio no ar. Por ser um elemento da família dos gases nobres, dificilmente interage com outros elementos e possui a capacidade de emanar do solo ou rocha com extrema facilidade e de se concentrar em ambientes fechados (Eisenbud, 1987).

O principal motivo para 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. 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). Em relatório publicado pela Organização Mundial da Saúde o radônio foi apontado como o segundo maior responsável por causar câncer de pulmão na população mundial, perdendo apenas para o tabaco (WHO, 2009).

Em ambientes abertos ou ventilados o radônio não representa risco à saúde humana devido a sua contínua dispersão na atmosfera, porém em locais fechados e com pouca ventilação os níveis podem atingir valores elevados (Eisenbud, 1987). Isto fica evidente em minas e cavernas onde a taxa de ventilação é reduzida devido à configuração das mesmas (Binns et al., 1996, Jovanovič, 1996, Solomon et al., 1996, Solomon et al., 1996a, 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, Tsvetkova et al., 2005, Veiga et al., 2004, Lario et al., 2005, Papastefanou et al., 2005, Amin et al., 2008, Bahtijari et al., 2008, Misdaq & Ouguidi, 2008), podendo representar riscos aos indivíduos expostos (mineiros, guias turísticos, visitantes, pesquisadores etc.) dependendo do tempo de exposição.

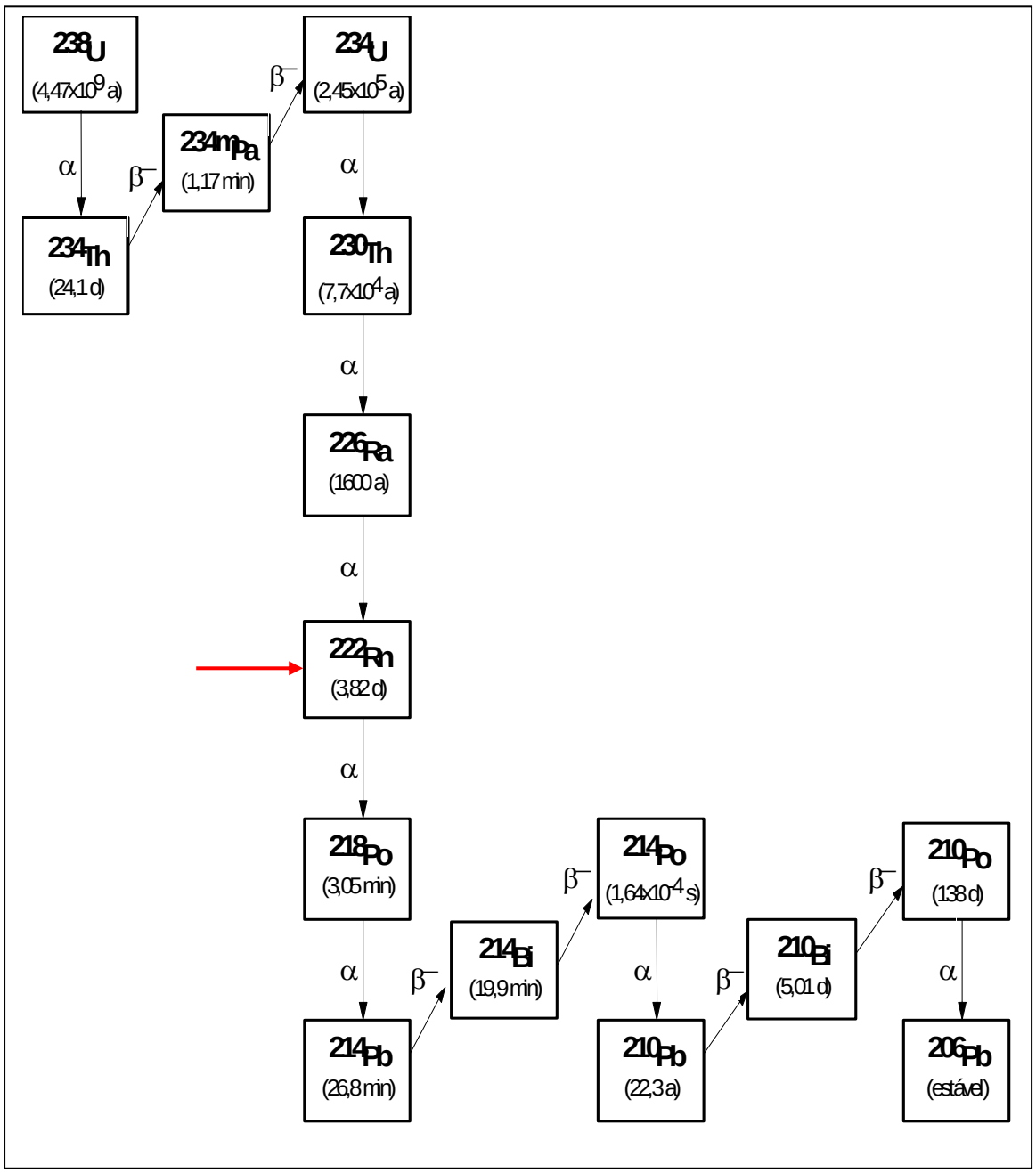

FIGURA 1 – Série de Decaimento do ^{238}U [UNSCEAR, 1977].

Para efeito de contribuição na exposição à radiação, a maior importância concentra-se nos quatro primeiros descendentes de meias-vidas curtas, ^{218}Po (3,05 min), ^{214}Pb (26,8 min), ^{214}Bi (19,9 min) e ^{214}Po (1,64x10^{-4} s), sendo que o ^{218}Po e ^{214}Po são emissores alfa e, portanto, são mais prejudiciais e responsáveis para o aumento da incidência de câncer no pulmão (UNSCEAR, 2000), pois a transferência linear de energia para partículas alfa é 20 vezes maior do que para radiação de referência (elétrons). Os filhos do radônio, diferentemente do pai, podem se associar facilmente a partículas de aerossóis, ou qualquer outro tipo de superfície, fenômeno conhecido como *plate-out*. Associados ou não a aerossóis, os filhos podem ser inalados, se acumulando no trato respiratório, depositando toda sua energia (Safety Reports Series 33, 2003).

O monitoramento de radônio vem sendo amplamente realizado em todo o mundo com a utilização de SSNTD (detectores de traços nucleares do estado sólido), que se tornou uma opção simples e vantajosa por possibilitar a obtenção de dados de medidas em longo prazo. Entretanto, medidas diretas das concentrações de todos os produtos de meias-vidas curtas do ^{222}Rn são difíceis e limitadas, uma vez que a dinâmica dos filhos não é a mesmo do pai radônio. Estas medidas são estimadas de considerações de equilíbrio (ou desequilíbrio) entre os radionuclídeos e os produtos de decaimento (Safety Reports Series 33, 2003).

1.2.1 Fator de Equilíbrio

A concentração dos filhos, ou o fator de equilíbrio F é definido como a razão entre a concentração em equilíbrio equivalente de radônio (representada por *Ceq*) e a concentração atual de radônio, ou a razão entre a atividade dos descendentes e atividade do radônio e pode ser utilizado para estimativa da dose de radiação (UNSCEAR, 2000). Estudos para monitoramento a longo prazo e determinação das concentrações dos filhos de radônio com a utilização de SSNTD ainda estão sendo explorados. Para estimar a dose de radiação tem sido adotado o valor 0,4 para fator de equilíbrio, o que pode dar uma estimativa grosseira da concentração em equilíbrio equivalente (ICRP-60, 1990). Porém, devido a flutuações locais e temporais dos processos (ventilação, concentração e distribuição dos aerossóis, deposição em superfície etc.) que afetam as concentrações dos descendentes de radônio, a utilização de um único fator de equilíbrio para qualquer

situação de exposição (residências, minas, cavernas etc.) pode resultar em interpretações incorretas para a dose acumulada de inalação.

Estudos mostram que o fator de equilíbrio é praticamente constante em casas (Lario et al., 2005, 2006). Como resultado, a dose devida aos descendentes é freqüentemente descrita ou estimada de medidas de concentrações de radônio em ambiente residencial. Entretanto, o fator de equilíbrio *F* pode variar em ambientes subterrâneos, tais como minas e cavernas (Gilmore et al., 2000, Gilmore et al., 2001, Lario et al., 2005), pois o processo físico de liberação do radônio a partir dos minerais e rochas depende da magnitude da superfície interna dos minerais, uma vez que, uma pequena parte do radônio penetra as capilaridades, micro-fraturas e poros da rocha. Alguns estudos sobre a investigação do equilíbrio entre concentrações de ^{222}Rn e seus descendentes em ambientes de cavernas indicam que o fator de equilíbrio pode variar de 0,04 a 0,95 com um valor médio de 0,5, que vem sendo empregado em alguns trabalhos (Pinza-Molina et al., 1999, Przylibski, 1999, Gilmore et al., 2002, Papachristodoulou et al., 2004). Solomon e colaboradores (1996) relatam valores de fator de equilíbrio em cavernas da Austrália entre 0,36 e 0,52 com um valor médio de 0,4. Outro trabalho encontrou valores que variam entre 0,12 e 0,71 para cavernas da Irlanda (Duffy et al., 1996), e avaliações preliminares sugerem valores entre 0,17 e 0,4 para minas do sudoeste da Inglaterra (Gilmore et al., 2002). Em uma avaliação dos níveis de radônio em uma mina de carvão no nordeste do Paraná também foram feitas medidas para se determinar o fator de equilíbrio e os resultados apresentaram uma variação entre 0,28 e 1,05 (Veiga et al., 2004).

A existência de dados sobre concentrações dos filhos de radônio e conseqüentemente concentrações em equilíbrio equivalente, corresponde principalmente de resultados obtidos com monitores ativos. A utilização deste tipo de medidor é muito útil quando o objetivo é obter valores sobre os produtos de decaimento em um tempo específico ou analisar sua evolução temporal. Por causa dos custos, tamanho do equipamento e modos de alimentação e operação, os monitores ativos são inadequados para medidas a longo prazo (ICRP-65, 1993, UNSCEAR, 2000).

Detectores passivos como os detectores de traços nucleares do estado sólido já são utilizados para medir concentrações de radônio em longo prazo e podem também ser utilizados para determinar as concentrações dos descendentes em longo período de tempo. Muitos métodos para determinação do fator de equilíbrio com a utilização de detectores de traços foram desenvolvidos, porém, todos apresentam algum tipo de deficiência (Frank & Benton, 1977, Planinic & Faj, 1989, Amgarou et al., 2001, Leung et al., 2006).

Recentemente, Amgarou e colaboradores (2003) propuseram um método chamado de fator de equilíbrio reduzido que obteve certo êxito em relação aos métodos anteriormente propostos, todavia não é recomendável quando se trata de medidas em ambientes que apresentam concentrações elevadas, mostrando-se ineficiente.

1.3 Breve histórico dos Detectores de Traços Nucleares do Estado Sólido

Desde que os primeiros resultados sobre fragmentos de fissão observados em fluoreto de lítio por Young em 1958 e a observação feita por Silk e Barnes em 1959, sobre traços de ^{235}U em mica, foram descritos, iniciou-se o desenvolvimento de uma nova técnica de detecção na física nuclear (Enge, 1980).

A simplicidade da técnica de detecção e seu baixo custo despertaram o interesse de um grande número de pesquisadores nesta nova área, produzindo em pouquíssimo tempo grande quantidade de trabalhos sobre o assunto (Enge, 1980, Durrani, 2001).

Conhecidos pela sigla SSNTD (originada do inglês *Solid State Nuclear Track Detectors*), os Detectores de Traços Nucleares do Estado Sólido são materiais que tem a propriedade de registrar permanentemente danos causados por radiações nucleares de partículas carregadas pesadas (alfa, prótons e fragmentos de fissão) e são insensíveis a outro tipo de radiação (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 angstroms. 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 angstroms para alguns micra, tornando possível sua visualização em microscópio óptico comum (Paulo, 1991).

O detector é exposto por um período de tempo que pode variar de dias a meses, e após a exposição é submetido, em geral, a um ataque químico, para ampliação, visualização e contagem dos traços.

As concentrações de radônio neste tipo de detector são relacionadas com a quantidade de traços visualizadas na superfície do mesmo, o tempo de exposição e a eficiência de medida do detector.

1.3.1 O CR-39

Em meados do início da Segunda Guerra Mundial com a escassez de matéria prima e necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias, a revolução dos plásticos já estava em pleno desenvolvimento.

Com o interesse intensificado em plásticos, as indústrias PPG (conhecida como Pittisburgh Plate Glass Corporation até 1965) deram início a pesquisas para criar uma resina allyl com baixa pressão e propriedades de dureza e infusível. A Rom & Has já havia desenvolvido a resina Plexigas e químicos da DuPont inventaram a resina Lucite, ambos termoplásticos. Um grupo de pesquisas da Columbia Southern Chemical Company, uma subsidiária da PPG, ficou responsável pela investigação da resina. O termo "Columbia Resin" foi escolhido para nomear o projeto. Cada composto era isolado e trabalhado pelo grupo identificado por um número código. Em maio de 1940, um dos compostos se mostrou realmente promissor. Esta resina particular foi o monômero di allil carbonato dietileno glicol ($C_{12}H_{18}O_7$) que a Pittisburgh Plate Glass registrou como CR-39. Nos anos seguintes mais de 180 monômeros diferentes deste foram investigados (Bruneni, 2010).

O 39º composto mostrou ser o mais promissor devido as suas características únicas, entre elas o fato de que a resina pode ser combinada com várias camadas de tecido, papel e outros materiais para a produção de produtos laminados excepcionalmente forte, capazes de serem moldados em uma variedade de formas reforçadas (Bruneni, 2010).

O primeiro uso comercial para o novo monômero envolvia sua combinação com fibra de vidro (outro produto PPG) para formar um tanque de combustível para o bombardeiro B-17, um famoso avião da força aérea que operou durante a Segunda Guerra. O tanque moldado de materiais revestidos com CR-39 e com uma borracha especial tornava-se auto selante quando era atingido por balas ou fragmentos de bombas. A substituição dos tanques convencionais de combustível por tanques revestidos com CR-39 permitiu reduzir significativamente o peso de aeronaves, aumentando as opções de bombardeiros e contribuindo substancialmente aos esforços de guerra (Bruneni, 2010).

Com o final da Segunda Guerra, outras aplicações foram atribuídas ao CR-39, entre elas a produção de lentes. Contudo, devido a sua boa resposta, alta sensibilidade e ótimas qualidades ópticas tornou-se o detector de traço mais utilizado atualmente (Cartwright et al., 1978). O CR-39 é sensível a partículas com energia na faixa entre alguns keV até dezenas de MeV (Abu-Jarad et al., 1981).

Neste trabalho foi utilizado para a detecção de radônio no ar das cavernas o detector plástico transparente CR-39 da marca Lantrack.

1.4 Monitoramento de Radônio em Cavernas

Estudos realizados em várias partes do mundo têm apresentado concentrações de radônio no interior de cavernas com valores na faixa de 20 Bq/m^3 a 80000 Bq/m^3 conforme TAB. 1.

TABELA 1 – Concentrações de ^{222}Rn no ar de cavernas encontrados na literatura.

		Concentração de Radônio (Bq/m^3)			
País	**Uso da Caverna**	**Mínimo**	**Máximo**	**Média**	**Referência**
Arábia Saudita	**Turismo e pesquisa**	74	451	-	Hanan Al-Mustafa et al., 2005
Argentina	**Turismo**	1800	6000	4800	Anjos et al., 2010
Austrália	**Turismo**	-	6330 (anual)	500(inverno); 795(primavera)	Solomon et al., 1996
Brasil	**MG, MT e BA (Turismo e mineração)**	-	-	473	Gouvea et al., 1996
	PETAR (Turismo)	153	6607	-	Alberigi, 2006
Eslovênia	**Turismo e pesquisa**	-	-	2350 – 27000 (verão–inverno)	Jovanovic, 1996
Espanha	**Turismo**	-	-	300 - 8000	Pinza-Molina et al., 1999
	Turismo e arqueologia	186	7120	3562 (anual)	Lario et al., 2005
	Turismo	17000	50000	32000 (anual)	Lario et al., 2006
	Turismo	43	1461	-	Sainz et al., 2007
	Turismo	28	578	-	Dueñas et al., 2005
Grécia	**Turismo**	197	1929	1311(inverno); 925(verão)	Papachristodoulou et al.,2004
Hungria	**Turismo**	-	-	7227(2005); 8591(2006)	Somlai et al., 2009
	Pesquisa	46	19291	-	Kávási et al., 2010
Kosovo	**Turismo**	400	1700	-	Bahtijari et al., 2008
Malásia	**Pesquisa**	608	3075	-	Gilmore et al., 2005
Marrocos	**Turismo**	236	527	-	Misdaq & Ouguidi, 2008
Polônia	**Turismo**	100 (inverno)	3600 (verão)	-	Przylibski, 1999
Reino Unido	**Turismo**	32	12552	-	Sperrin et al., 2000
	Pesquisa	27	7800	-	Gilmore et al., 2002
	Turismo e pesquisa	40	4440	-	Langridge et al., 2010
Turquia	**Turismo**	20	5883	1919	Aytekin et al., 2006
Venezuela	**Turismo e mineração**	100	80000	-	Sajó-Bohus et al., 1997

Entretanto, até bem pouco tempo, no que diz respeito ao levantamento de níveis de radônio em cavernas do Brasil, muito pouco havia sido feito. Alguns estudos realizados em Minas Gerais, Bahia e Mato Grosso apresentaram avaliação preliminar dos níveis de radônio em algumas cavernas (Gouvea et al., 1996, Binns et al., 1996, Binns et al., 1998).

O levantamento dos níveis de radônio foi realizado por período mais extenso entre outubro de 2003 e novembro de 2005 na região do Vale do Ribeira localizada ao sul do estado de São Paulo (Alberigi et al., 2005, Alberigi, 2006, Alberigi & Pecequilo, 2008) que possui a maioria das cavernas paulistas (Auler et al., 2001, SBE, 2010). O local é o

Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) situado entre os municípios de Iporanga e Apiaí e possui mais de 200 cavernas cadastradas representando grande atrativo turístico para a região (SBE, 2010). O estudo realizado no âmbito do projeto de pesquisa FAPESP "Avaliação dos níveis de radônio nas cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR)" (Relatório FAPESP, 2006) resultou em dissertação de mestrado intitulada: "Avaliação da exposição ao ^{222}Rn nas cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira" (Alberigi, 2006). As concentrações de radônio foram medidas em algumas das cavernas mais visitadas do PETAR por meio da técnica de detecção passiva utilizando detectores de traços nucleares Makrofol E expostos por período mínimo de 3 meses, procurando seguir as variações sazonais durante os 2 anos. Os resultados variaram numa faixa entre 153 a 6607 Bq/m^3 (TAB. 2), apresentando alteração nos níveis de radônio entre as cavernas monitoradas e também entre as estações do ano, com diminuição acentuada em especial em períodos frios (Alberigi, 2006, Alberigi & Pecequilo, 2007, Alberigi & Pecequilo, 2008).

TABELA 2 – ^{222}Rn no ar das cavernas do PETAR obtidos com detectores Makrofol E.

		Períodos de Monitoramento						
Caverna/Núcleo	**Galerias**	**13/10/03–07/03/04 (Prim/Verão)[c]**	**07/03–07/07/04 (Outono)[d]**	**07/07–11/10/04 (Inverno)[e]**	**11/10/04–03/01/05 (Primavera)[f]**	**13/01–25/03/05 (Verão)[g]**	**25/03–23/07/05 (Outono)[h]**	**23/07–14/11/05 (inver/prim)[i]**
		Concentrações de radônio (Bq/m^3)						
Alambari de Baixo Ouro Grosso	**Alambari de Baixo**	516 ± 137	1327 ± 432	970 ± 291	610 ± 179	382 ± 174	342 ± 89	370 ± 96
Água Suja/Santana	**Golfinho**	----------[a]	1674 ± 433	406 ± 124	1308 ± 346	834 ± 222	595 ± 184	255 ± 79
Couto/Santana	**1**	----------[a]	1110 ± 348	611 ± 196	704 ± 254	342± 161	**153 ± 44**	230 ± 66
Morro Preto/Santana	**Plataforma**	512 ± 135	1223 ± 362	363 ± 128	677 ± 190	492 ± 183	354 ± 99	.....[b]
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
Santana/Santana	**Flores 1**	2373 ± 609	2359 ± 631	1488 ± 392	2481 ± 640	3160 ± 837	1732 ± 450	2160 ± 552
	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**	6358 ± 1619	1312 ± 381	4080 ± 1050	6107 ± 1547	2706 ± 731	1543 ± 418

[a] – Período não monitorado.
[b] – Monitor extraviado.
[c] – Primavera (23/Set/03 – 22/Dez/03) Verão (22/Dez/03 – 20/Mar/04). (USNO, 2000).
[d] – Outono (20/03/04 – 21/Jun/04). [e] – Inverno (21/Jun/04 – 22/Set/04). (USNO, 2000).
[f] – Primavera (22/Set/04 – 21/Dez/04). [g] – Verão (21/Dez/04 – 20/Mar/05). (USNO, 2000).
[h] – Outono (20/Mar/05 – 21/Jun/05). (USNO, 2000).
[i] – Inverno (21/Jun/05 – 22/Set/05), Primavera (22/Set/05 – 21/Dez/05). (USNO, 2000).

Embora haja grande quantidade de avaliações de radônio em cavernas, pouco se sabe sobre a influência climática nas variações de radônio nesses ambientes (Jovanovič, 1996, Przylibski, 1999, Kulwant et al., 2005, Alberigi & Pecequilo, 2007, Batiot-Guile et al., 2007, Alberigi & Pecequilo, 2008a, Espinosa et al., 2008).

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 interno e externo, umidade, geomorfologia cárstica, porosidade das rochas, quantidade de rádio presente nos sedimentos e rochas são alguns dos fatores que podem contribuir para elevação das concentrações de radônio (Batiot-Guile et al., 2007, Espinosa et al., 2008).

O processo físico de liberação do radônio a partir dos minerais e rochas não é totalmente conhecido. Basicamente, cada átomo de rádio decai ejetando uma partícula alfa composta de dois prótons e dois nêutrons (FIG. 2). Quando a partícula alfa é ejetada, o átomo de radônio que se formou recua em direção oposta; este recuo é um fator muito importante na liberação de radônio dos grãos do mineral, pois se um átomo de rádio está localizado numa região mais profunda de um grande grão, então, indiferentemente da direção de recuo, o radônio não sairá do grão e o átomo de radônio permanecerá incrustado no mineral. Caso um átomo de rádio esteja próximo à superfície do grão, o recuo poderá enviar o átomo de radônio para o interior do grão ou em direção externa a superfície do grão. No segundo caso, o radônio recém formado poderá deixar o mineral e entrar em espaços porosos entre os grãos e as fraturas das rochas. O recuo do átomo de radônio é muito forte e freqüentemente o radônio formado penetra entre os poros, atravessa o espaço através dos poros e torna a incrustar-se no próximo grão mineral (Otton et al., 1995, UNSCEAR, 2000). Sabe-se que só uma pequena parte dos átomos de radônio produzidos é liberada para o meio circundante (ar e água) (FIG. 3). A fração que é liberada é definida como “poder de emanação” do material. O aumento da umidade também pode aumentar o poder de emanação (Carvalho et al., 2005, Misdaq & Amghar, 2005).

Por ser um elemento da família dos gases nobres, o radônio dificilmente interage com outros elementos sob condições normais de temperatura e pressão, e por sua natureza gasosa, sua mobilidade é muito maior do que o urânio e o rádio que estão fixos em material sólido das rochas e solo. A velocidade de movimento do radônio através do solo será controlada pela quantidade água presente nos poros (contida no solo), a porcentagem de espaços vazios do solo (porosidade), e a habilidade do solo de transmitir água e ar (permeabilidade do solo) (UNSCEAR, 2000).

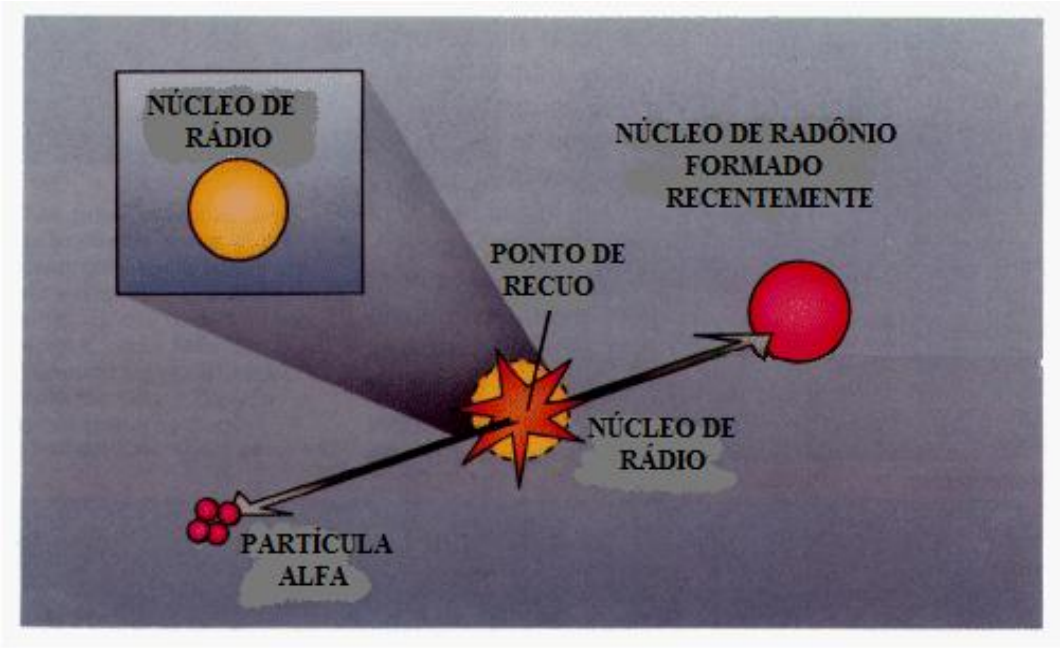

FIGURA 2 – Formação de radônio esquematizada (Otton et al., 1995).

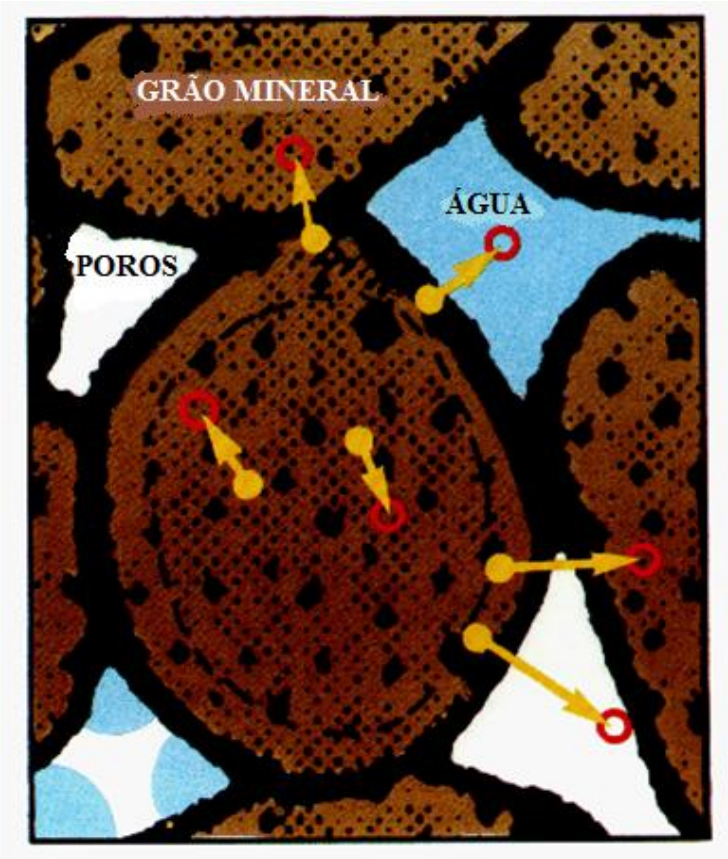

FIGURA 3 – Esquema de liberação de radônio dos minerais (Otton et al., 1995).

1.5 Rádio em água

A água representa um recurso natural de valor econômico, estratégico e social, além de ser um dos elementos fundamentais para existência e bem estar do homem e componente importantíssimo na manutenção dos ecossistemas do planeta.

Apesar de aparentemente a Terra dispor de uma enorme quantidade de água, quase 97% estão represadas nos mares e oceanos e cerca de 2% congeladas nas regiões polares. Apenas 1% da água doce está efetivamente disponível para o consumo humano, uso agrícola e industrial. Ela se encontra em córregos, rios e lagos constituindo os recursos hídricos superficiais, assim como nos interstícios do solo e subsolo, formando os recursos hídricos subterrâneos. Estes últimos representam cerca de 97% do total de água doce existente no planeta Terra (Águas Paraná, 2010).

A movimentação constante da água na Terra passando pelos estados líquido, sólido e gasoso, dos oceanos para a atmosfera, desta para a terra, sobre a superfície terrestre ou no subsolo, e o retorno para os oceanos, recebe a denominação de Ciclo Hidrológico (Águas Paraná, 2010).

O ciclo se inicia quando o sol aquece e evapora a água dos oceanos, rios, lagos e solos. O vapor d'água sobe e se junta formando as nuvens. Estas, por determinadas condições atmosféricas, condensam-se e precipitam-se em forma de chuva, granizo ou neve. Quando chove sobre os continentes, parte da água é retida pela vegetação e acaba evaporando novamente para a atmosfera. Outra parte escoa diretamente para os rios e lagos, retornando assim aos oceanos ou infiltra-se no solo (Águas Paraná, 2010).

A parte da água infiltrada é retida pelas raízes das plantas e acaba evaporando através da capilaridade do solo ou através da transpiração desses vegetais; outra parte da água move-se para as camadas mais profundas, por efeito da gravidade, até chegar à chamada zona de saturação. Nessa região do subsolo todos os poros da formação sedimentar, as fissuras das rochas, enfim os espaços vazios são preenchidos com água, constituindo aquilo que se denomina de Água Subterrânea (Águas Paraná, 2010).

O rádio pode migrar para a água subterrânea a partir de fontes naturais, resultado da interação deste fluido com rochas, solos, entre outros. O rádio também pode ser incorporado à água subterrânea indiretamente, em virtude de atividades tecnológicas tais como a exploração de minerais radioativos de urânio e de tório no ciclo do combustível nuclear. Há uma considerável quantidade de radioatividade em outros minerais convencionais de importância comercial, por exemplo, os minerais fosfáticos

apatita ($Ca_5(PO_4)_3F$, Cl, OH), cobre, ouro e carvão mineral, que contém urânio e seus filhos de meias-vidas longas ^{226}Ra, ^{230}Th, ^{210}Pb e ^{210}Po. Os processos de mineração destes recursos ocasionam um conseqüente aumento nos níveis ambientais de rádio acima das concentrações de radiação de fundo. As nascentes geotérmicas constituem outra fonte de radioatividade natural para o meio ambiente aquático, principalmente ^{226}Ra e ^{222}Rn (Oliveira, 1998).

As concentrações de rádio na água subterrânea dependem das vias de entrada para a água, da quantidade de rádio na fonte, dos mecanismos de remoção e de processos mecânicos. Além disso, como o rádio é membro das séries de decaimento do ^{238}U e do ^{232}Th e não forma minerais próprios, ele sofrerá influência dos processos que mobilizam seus precursores, como urânio e tório (Oliveira, 1998).

Nas últimas décadas, a distribuição e o comportamento dos isótopos naturais de rádio na água subterrânea tem sido tema de vários estudos conduzidos nas áreas de radioproteção ambiental, radioecologia e aplicações de radioisótopos. A importância prática destes estudos provém dos riscos à saúde humana associados tanto com a ingestão do rádio, quanto à inalação do ^{222}Rn e seus produtos de decaimento (WHO, 2003). Estes riscos levaram ao estabelecimento de recomendações internacionais pelos organismos de fiscalização e vigilância sanitária quanto às concentrações máximas permissíveis de rádio em águas destinadas ao abastecimento público (atividade total combinada de ^{226}Ra e ^{228}Ra não deve exceder 0,185 Bq/L ou 5,5 pC/L), além de limites máximos permissíveis para as concentrações de ^{222}Rn e seus produtos de decaimento em residências.

A importância científica deriva das aplicações potenciais destes isótopos naturais de rádio como traçadores dos mecanismos de transferência rocha-água e do transporte de vários constituintes em aqüíferos. Geralmente, as razões de atividade $^{228}Ra/^{226}Ra$ na água subterrânea estão relacionadas às razões de atividade Th/U presentes na rocha hospedeira. Este parâmetro é um indicador das características do aqüífero e das reações físicas e químicas que ocorrem no sistema rocha-água (Oliveira, 1998).

À medida que se infiltra no solo a partir da superfície e escoa através dos aqüíferos, a água subterrânea progressivamente se torna enriquecida em elementos pertencentes às séries radioativas naturais do ^{238}U e do ^{232}Th, que se encontram distribuídos nos solos, nos sedimentos e nas rochas.

Os radionuclídeos naturais encontram-se freqüentemente presentes na água destinada ao consumo humano (WHO, 2003). Destes radionuclídeos, os elementos de maior interesse do ponto de vista de risco à saúde são o rádio, o radônio e o urânio.

Os isótopos pertencentes à série do urânio que podem ocasionar um risco à saúde devido a sua presença na água destinada ao consumo humano são o ^{238}U, o ^{234}U, o ^{226}Ra e o ^{222}Rn. Além destes radionuclídeos, o ^{228}Ra, que ocorre na série do tório, também pode ser encontrado na água potável e é considerado muito importante do ponto de vista radiológico. Os demais radionuclídeos presentes nas séries radioativas naturais tem sido detectados em concentrações desprezíveis na água potável.

A água é uma das vias pela qual os radionuclídeos naturais, principalmente ^{226}Ra e ^{222}Rn, são transferidos ao homem. Isto se deve ao fato destes radionuclídeos serem os elementos das séries radioativas naturais mais comumente encontrados nas águas subterrâneas e superficiais, devido às suas propriedades físicas e químicas que lhes confere alta solubilidade em água (WHO, 2003). O ^{226}Ra (meia-vida de 1622 anos) é formado quando o ^{230}Th emite uma partícula alfa, decaindo seqüencialmente para formar o gás ^{222}Rn (meia-vida de 3,8 dias).

A água superficial desempenha um papel vital no ciclo biogeoquímico de muitos elementos essenciais, bem como de elementos tóxicos no sistema aquático aonde o rádio pode ser incorporado a partir de diversas fontes. As concentrações naturais de rádio nas águas superficiais de rios e reservatórios são decorrentes da sua concentração nas fontes que alimentam estes cursos d'água, que ocorre pela lixiviação do solo, rochas e sedimentos. Em decorrência destes processos, a radioatividade natural de fundo de um dado local pode variar consideravelmente dependendo da composição da litosfera local.

A poluição da água de superfície associada à presença de rádio está intrinsecamente relacionada ao desenvolvimento de atividades tecnológicas. Metodologias eficientes para a minimização deste tipo de poluição não são adequadamente adotadas nos processos de mineração, os rejeitos oriundos destes processos, tanto no caso da mineração de urânio, como da mineração de fosfatos e o escoamento superficial das águas de drenagem, estas vias serão as fontes antrópicas mais significativas de rádio para a água de superfície (Dubinchuk et al., 1990).

O rádio presente nas águas de superfície é transportado e pode ser depositado nos sedimentos. Em condições especiais, o rádio também pode ser incorporado por organismos vivos, entrando assim, na cadeia alimentar. A mobilidade do rádio nas águas de superfície ocorre por meio da combinação de processos naturais, freqüentemente influenciados pelo homem.

Entre os processos mais importantes estão:

- Difusão e advecção;
- Trocas na forma físico-química (especiação) do rádio na água de superfície induzida pelas trocas na composição da água e outras condições ambientais;
- Adsorção do rádio dissolvido nos sólidos suspensos e sedimentos de fundo;
- Co-precipitação do rádio com sólidos formados na água;
- Sedimentação do rádio particulado e ressuspensão dos sedimentos de fundo;
- Dissolução e dessorção do rádio dos sólidos suspensos e sedimentos de fundo;
- Incorporação biológica e transporte.

As atividades humanas podem afetar todos os processos descritos anteriormente, na medida em que influenciam o ciclo hidrológico, contaminam as águas de superfície pelo despejo de efluentes industriais e drenagem, e pelo uso da água na agricultura.

2. OBJETIVOS

Devido a pouca informação sobre a influência de fatores climáticos nas variações das concentrações de radônio (Jovanovič, 1996, Przylibski, 1999, Kulwant et al., 2005, Alberigi & Pecequilo, 2007, Batiot-Guile et al., 2007, Alberigi & Pecequilo, 2008a, Espinosa et al., 2008) e a inexistência de correlação entre medidas de ^{222}Rn e medidas de dados climáticos no Brasil, é importante analisar as variações de radônio em conjunto com informações sobre condições climáticas, ou seja, além de monitoramento para níveis de radônio, a obtenção de dados sobre condições climáticas abrangendo a maior quantidade possível de fatores que podem influenciar as variações do gás (quantidade e período de chuvas, temperatura interna e externa das cavernas, quantidade de rádio).

Na avaliação realizada no PETAR entre outubro de 2003 e novembro de 2005 não foram relacionada às variações de radônio com fatores climáticos, pois o principal objetivo era levantar as concentrações de radônio.

Desta forma, no presente estudo, os objetivos foram:

- Utilizar detectores CR-39 por apresentarem melhor resolução.
- Estender o estudo de radônio em cavernas à cavernas de outros parques.
- Analisar as variações das concentrações de radônio em conjunto com informações climáticas (chuva e temperatura).
- Determinar as concentrações de isótopos de rádio em água das cavernas e região e verificar a existência de relação destas concentrações e as variações de radônio no ar das cavernas.
- Avaliar a possibilidade de identificação de traços de radônio e seus descendentes pelo estudo dos detectores de traços para o estudo do equilíbrio radioativo.
- Estimar as doses para os monitores (guias turísticos) de acordo com as horas gastas no interior das cavernas e diferentes fatores de equilíbrio.

3. CAVERNAS

3.1 Regiões Cársticas do Brasil

O Brasil é um país que apresenta um grande potencial espeleológico. Cerca de 4000 cavernas estão cadastradas no banco de dados da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), (Auler et al., 2001). A FIG. 4 apresenta as principais regiões cársticas do Brasil e respectivas unidades geológicas. A maioria das grutas está inserida em calcários e dolomitos, rochas facilmente dissolvidas pela água subterrânea.

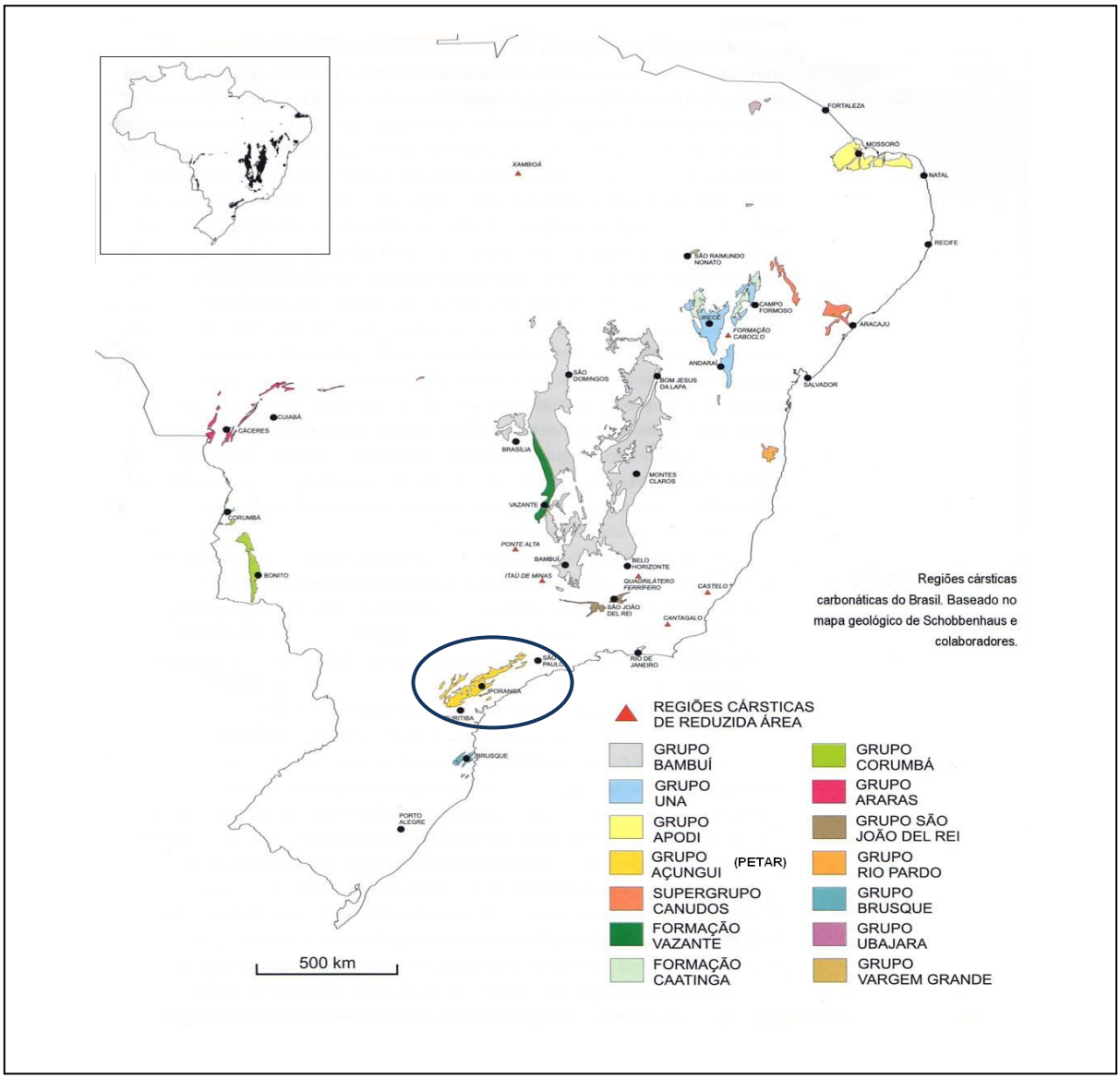

FIGURA 4 – Regiões cársticas do Brasil (Auler et al., 2001).

3.2 Localização da área de estudo e escolha das cavernas monitoradas

A área de estudo está localizada ao sul do estado de São Paulo, na região do Vale do Ribeira, e as cavernas monitoradas estão distribuídas entre o Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira, Parque Estadual de Jacupiranga e o Parque Estadual Intervales (FIG. 5).

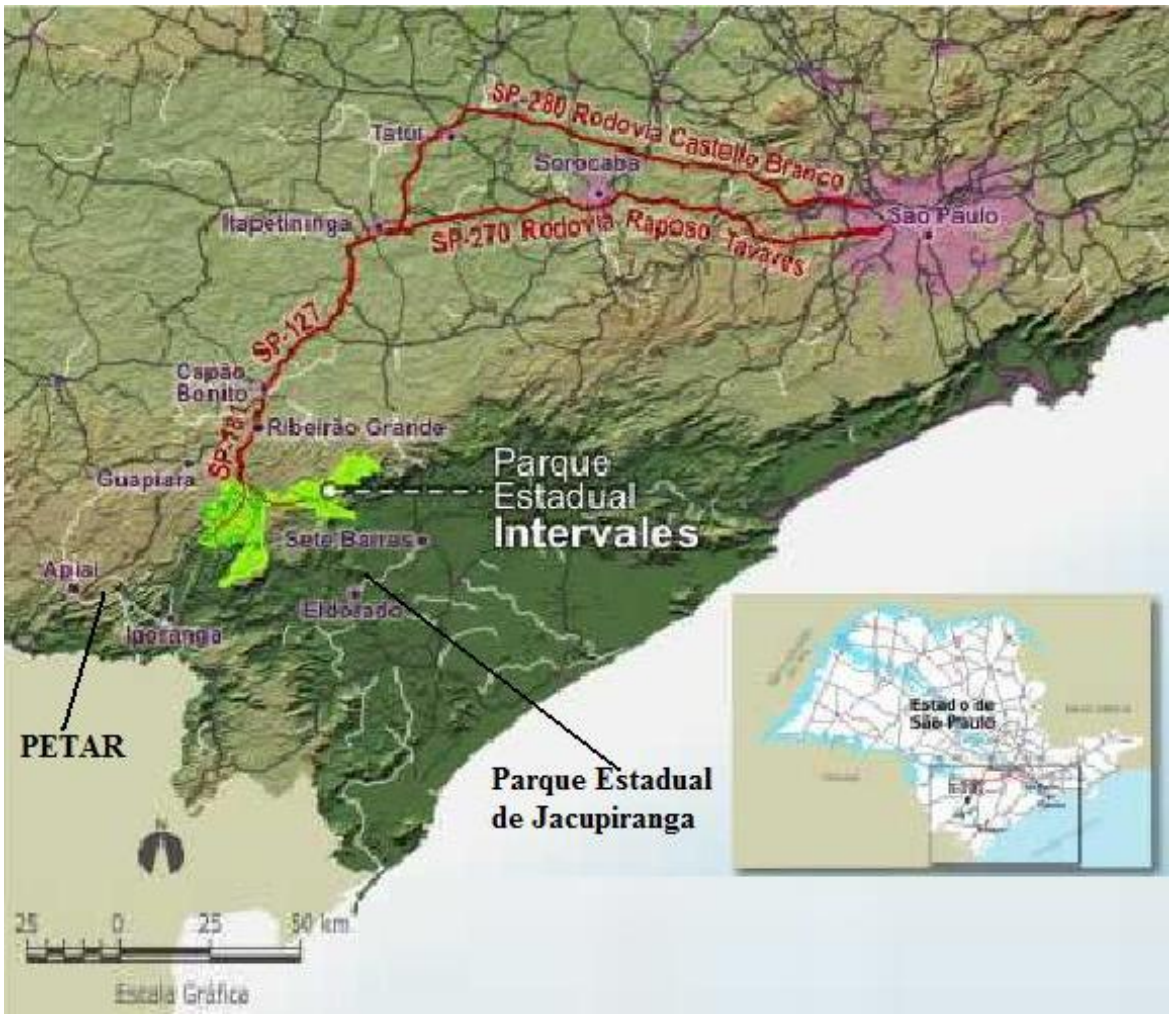

FIGURA 5 – Localização das Áreas de Estudo.

O Vale do Ribeira está localizado ao sul do estado de São Paulo e leste do estado do Paraná. O nome tem sua origem em função da bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape e ao Complexo estuariano-lagunar de Iguape, Cananéia e Paranaguá. Com área de 2.830.666 hectares a região é reconhecida como um dos pontos de colonização mais antigos do país e ficou caracterizada economicamente como uma região mineira e agricola. O Vale do Ribeira produz basicamente banana, feijão, milho, mandioca, chá, palmito,

eucalipto e madeira. A pesca por outro lado constitui importante fonte economica para a região.

A região destaca-se pelo alto grau de preservação de suas matas e por grande diversidade ecológica. Seus mais de 2,1 milhões de hectares de florestas equivalem a aproximadamente 21% dos remanescentes de Mata Atlântica existentes no Brasil, transformando-a na maior área contínua desse importante ecossistema em todo o País. Nesse conjunto de áreas preservadas são encontradas não apenas florestas, mas importantes remanescentes de restingas (150 mil hectares) e de manguezais (17 mil hectares).

Em contraste a este valioso patrimônio ambiental, o Vale do Ribeira é historicamente uma das regiões mais pobres dos estados de São Paulo e Paraná. Seus municípios possuem índices de desenvolvimento humano inferiores às respectivas médias estaduais, assim como os graus de escolaridade, emprego e renda de suas populações, entre outros indicadores, são tradicionalmente menores do que os de outras populações paulistas e paranaenses. A busca por empregos e oportunidades na área de educação praticamente não existem, por exemplo, opções de curso superior, o quê estimula a migração de parte da população economicamente ativa e jovem para outras regiões.

Os principais ciclos econômicos que se instalaram no Vale do Ribeira ao longo da história foram a exploração aurífera, a partir do século 17, e de outros minérios até décadas recentes, e as culturas do arroz, do café, do chá e da banana. Estes ciclos transformaram o Vale do Ribeira em fornecedor de recursos naturais de baixo custo, explorados sem qualquer respeito ao patrimônio ambiental e cultural e sem geração de benefícios para a população residente.

3.2.1 O Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR)

O Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) está localizado à margem esquerda do alto curso do Rio Ribeira, sul do estado de São Paulo, entre os municípios de Apiaí e Iporanga (FIG. 6). Os principais acessos partindo de São Paulo são pelas rodovias SP 180 (passando por Apiaí) ou BR 116 (Régis Bittencourt), passando por Jacupiranga e Iporanga. Criado em 1958, o PETAR representa uma unidade de preservação com 35.102,8 hectares, com terrenos cársticos. A importância ambiental desta área é suportada pela associação entre mata tropical, em grande parte preservada, e sistemas de cavernas que abrigam paisagens subterrâneas únicas e sítios paleontológicos (Karmann & Ferrari, 2002).

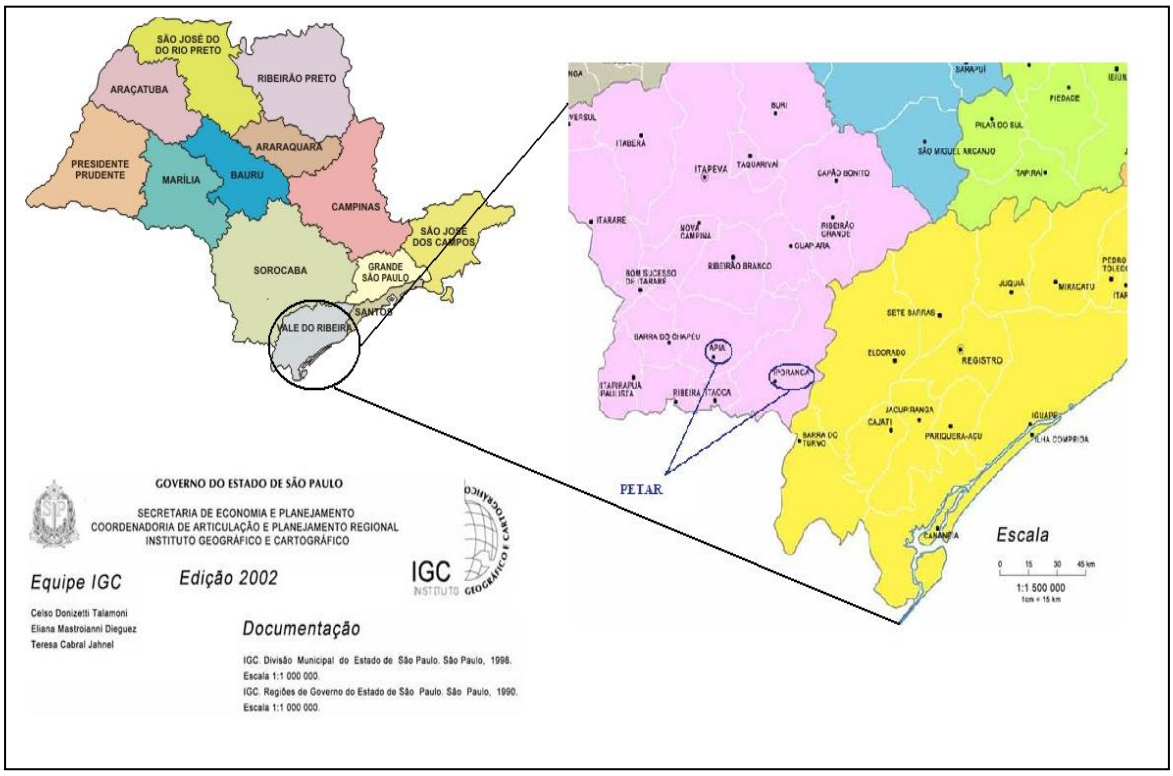

FIGURA 6 – Cidades que englobam o PETAR.

Duas cavernas do PETAR que haviam sido monitoradas anteriormente (Alberigi, 2006) foram mantidas no estudo por terem apresentado os maiores níveis de radônio, a Caverna Morro e a Caverna Santana. O Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) possui mais de 200 cavernas cadastradas representando grande atrativo turístico. As cavernas do PETAR estão distribuídas em quatro núcleos de visitação: Ouro Grosso, Caboclos, Santana e Casa da Pedra (Auler et al., 2001, SBE, 2010).

O monitoramento das cavernas do PETAR foi autorizado pelo Instituto Florestal de São Paulo (COTEC, 2009).

3.2.1.1 Caverna Morro Preto

Esta caverna situa-se em Iporanga com coordenadas de latitude 24°31’19”S e longitude 48°41’54”W, com desnível de 61 m e extensão de 832 m (Karmann et al., 1998). Esta gruta forma um conjunto com a gruta Couto. O tempo de visitação é estimado em 1 hora (Vendrame, 2006). Um detector foi posicionado na galeria Camarote (FIG. 7).

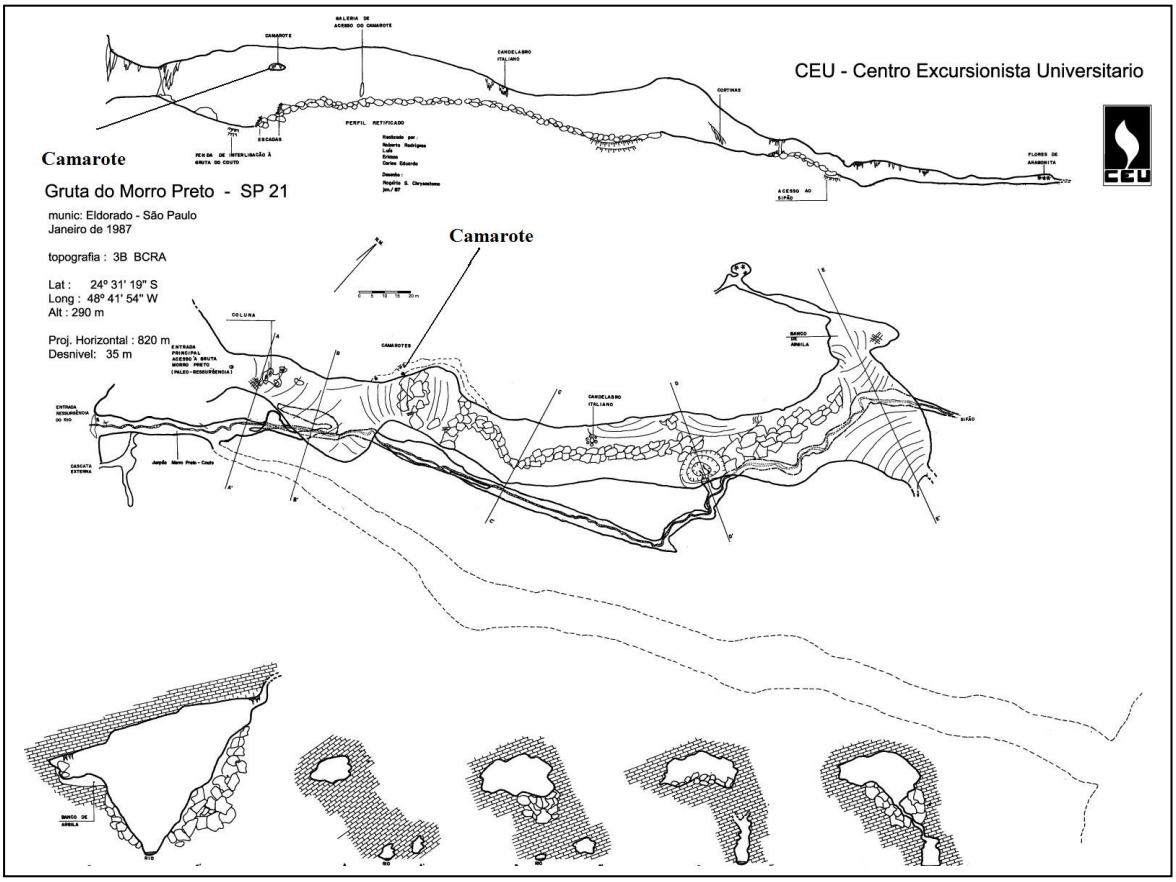

FIGURA 7 – Caverna Morro Preto (CEU, 1987).

3.2.1.2 Caverna Santana

Localizada em Iporanga, a caverna Santana dá nome ao núcleo e certamente recebe o maior número de visitantes por possuir grande variedade de galerias e melhor infra-estrutura para visitações. As coordenadas da entrada principal são: latitude 24º31’51”S e longitude 48º42’06”W, desnível de 61 m e 7200 m de extensão (SBE, 2010). Possui também um rio em seu interior, o rio Roncador, afluente do rio Betari, mas o percurso turístico pode ser feito sem entrar no rio. Como é a mais rica em galerias, foram escolhidos oito pontos de monitoramento com um monitor em cada ponto.

Os detectores estão distribuídos entre os salões Fáfa, Cristo, Encontro, São Paulo, Discos, dois monitores em pontos intermediários a estas duas últimas galerias e um monitor na entrada da caverna (FIG. 8). O tempo de visitação é estimado em 2 horas (Vendrame, 2006). Os monitores foram pendurados em estalactites no centro dos salões (distantes do teto) (Alberigi, 2006).

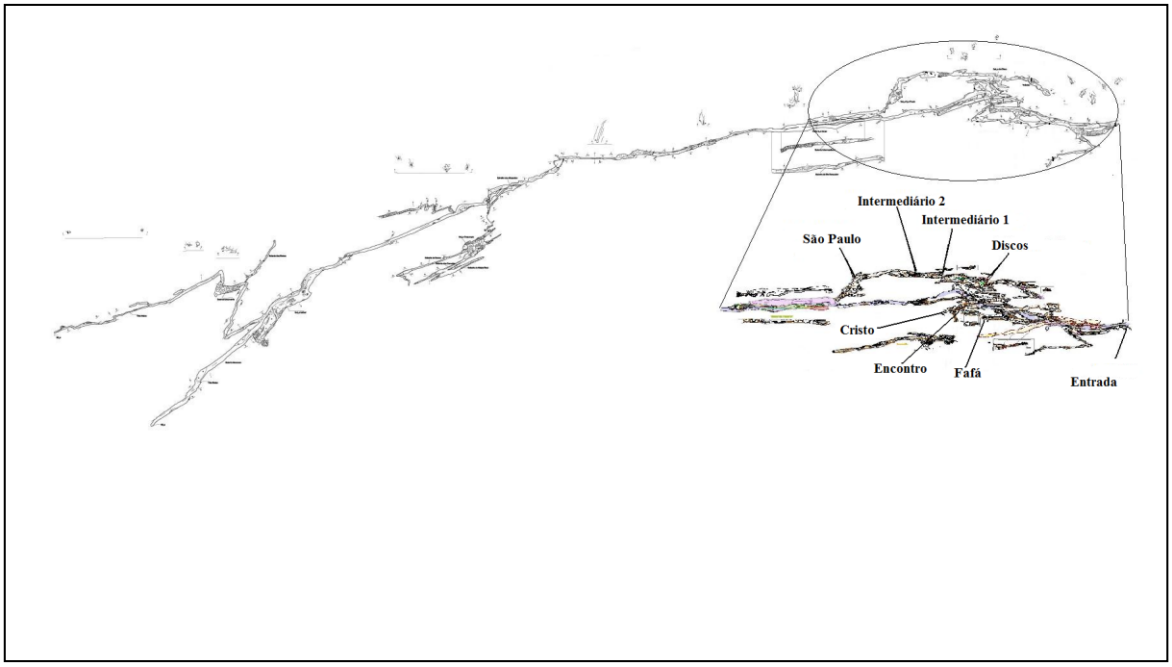

FIGURA 8 – Caverna Santana (Marques & Sagotavskas, 1972).

3.2.2 O Parque Estadual de Jacupiranga (PEJ)

Criado em 1969 o Parque Estadual de Jacupiranga é uma das maiores extensões de Mata Atlântica do Estado de São Paulo e também um dos maiores parques paulistas em extensão, com uma área aproximada de 150.000 hectares que abrangem parte dos municípios de Jacupiranga, Iporanga, Cajati, Eldorado Paulista, Barra do Turvo e Cananéia (FIG. 9). Esta unidade abriga vários conjuntos serranos como as serras do Guarau, Cadeado, Gigante, onde se localizam muitas cavernas e rios encachoeirados. Possui dois núcleos: Caverna do Diabo e Cedro, apenas o primeiro aberto à visitação (CPMR, 2010).

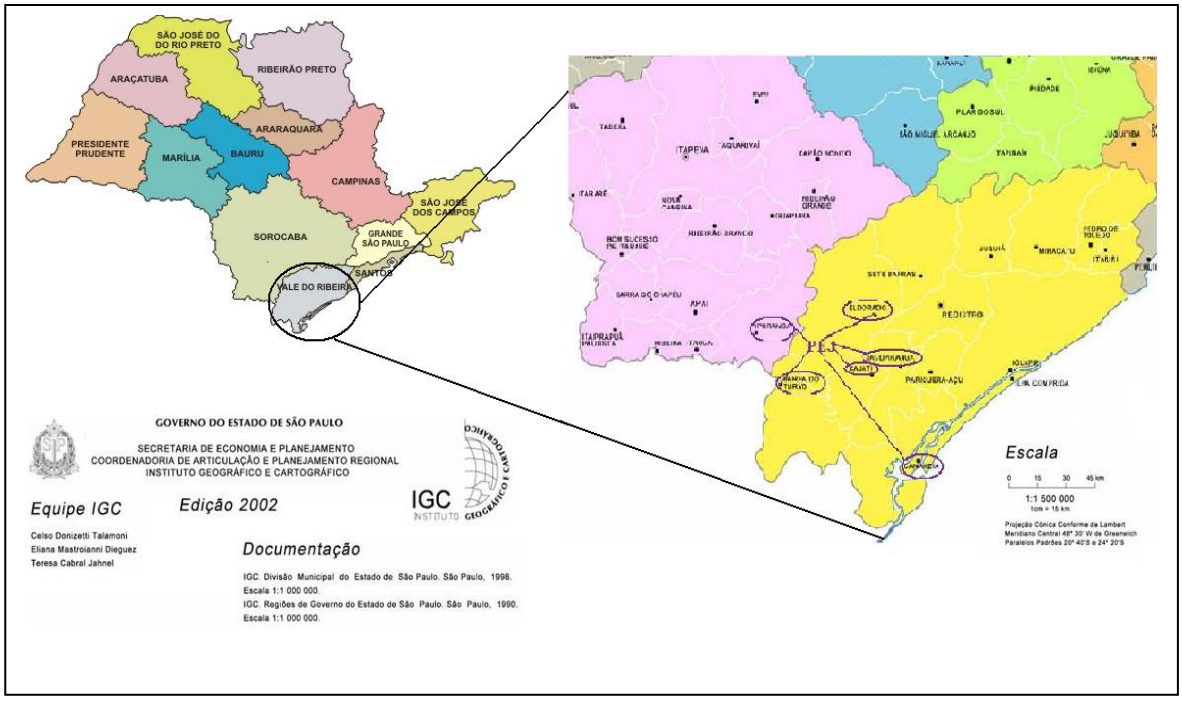

FIGURA 9 – Cidades que englobam o PEJ.

3.2.2.1 Caverna do Diabo

A Gruta da Tapagem, mais conhecida como Caverna do Diabo (FIG. 10), está localizada no município de Eldorado, a 243 km da capital paulista, no Parque Estadual de Jacupiranga, que abriga grandes extensões de Mata Atlântica e outros ecossistemas em seu interior. A caverna do Diabo possui iluminação artificial, escadas, passarelas e pontes no trecho turístico com cerca de 700 m (Caverna do Diabo, 2010) sua extensão é de 6237 m (SBE, 2010).

Um monitor de radônio foi colocado na caverna do Diabo ao final do trecho turístico.

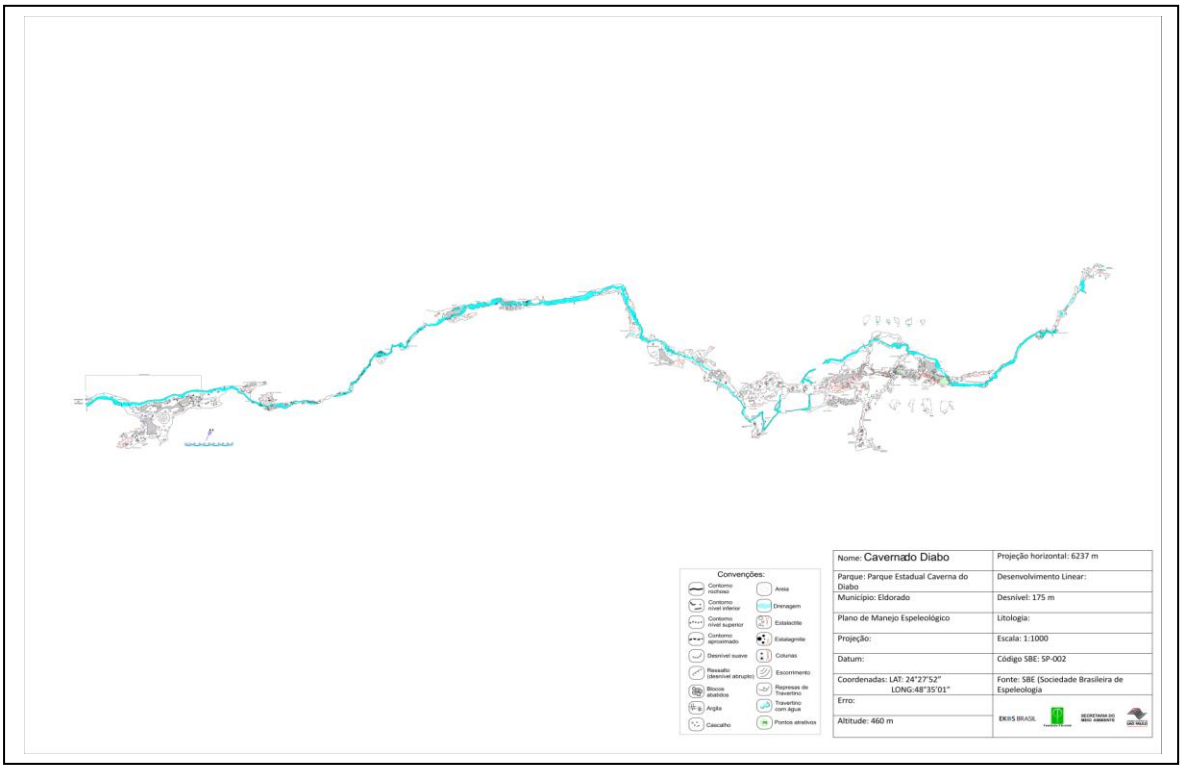

FIGURA 10 – Perfil Topográfico da Gruta da Tapagem (caverna do Diabo) (SBE, 2010).

3.2.3 O Parque Estadual Intervales (PEI)

Criado em 1995 o Parque Estadual Intervales (PEI), interliga o Parque Estadual Carlos Botelho ao PETAR inserido entre os municípios de Guapiara, Ribeirão Grande, Sete Barras, Eldorado e Iporanga (FIG. 11). Abrange a antiga fazenda do Banco do Estado de São Paulo (BANESPA), adquirida pela Fundação Florestal, Secretaria de Meio Ambiente (SMA), e agrega terras devolutas, compreendendo 41.705 hectares de patrimônio natural, com notável biodiversidade. Possui aproximadamente 60 cavernas, das quais apenas 15 estão abertas a visitação (Sano, 2007).

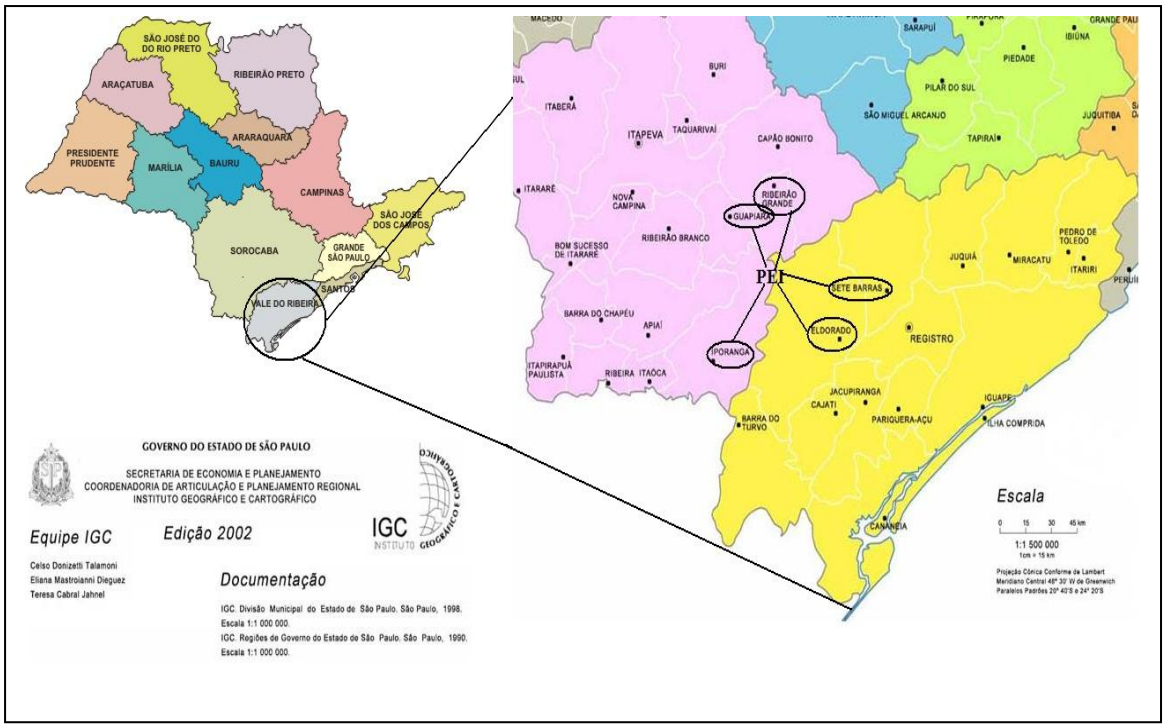

FIGURA 11 – Cidades que englobam o PEI.

3.2.3.1 Caverna Colorida

A caverna Colorida (FIG. 12) apresenta formações em calcário com pigmentação em tons de rosa e terra, por conta da argila e do óxido de ferro, característica que inspira o nome da gruta. Com extensão de 600 m, possui um pequeno rio que passa em seu interior, a água pode chegar à altura do joelho (Descobrindo Intervales, 2010).

Um monitor de radônio foi colocado na gruta, pouco depois de sua entrada.

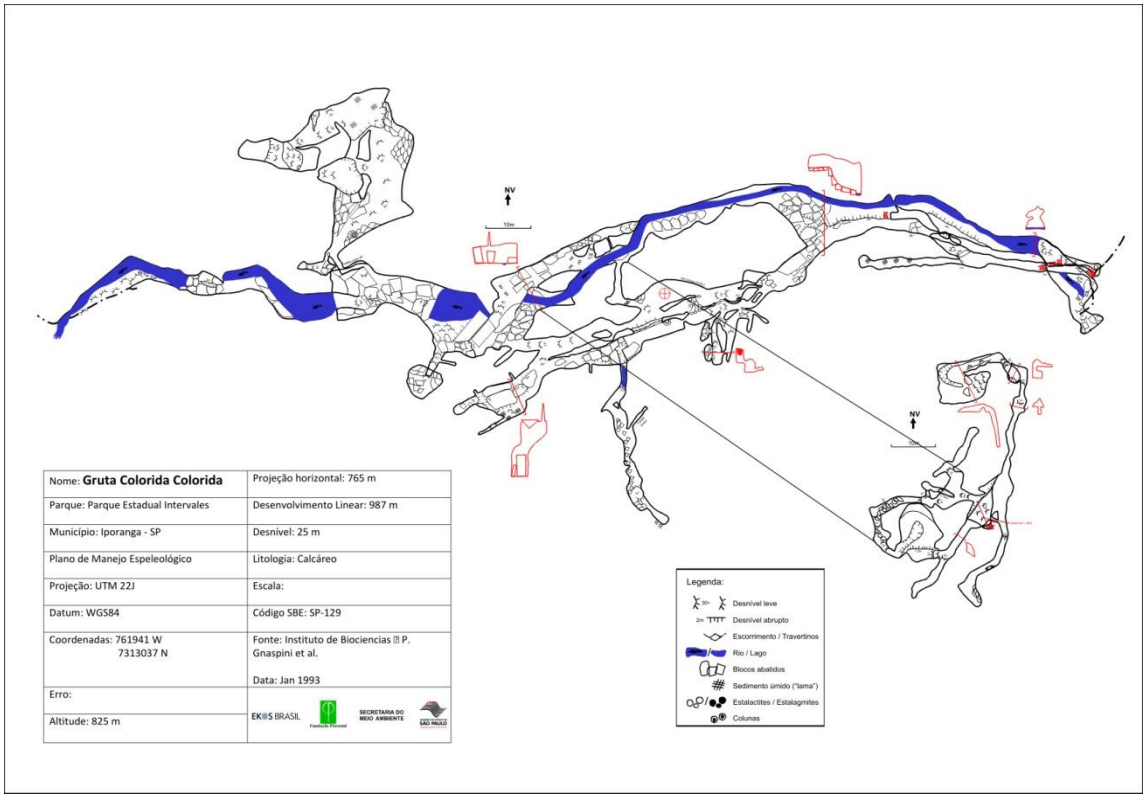

FIGURA 12 – Gruta Colorida.

4. METODOLOGIA

4.1 Detecção passiva para determinar a concentração de ^{222}Rn no ar

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}Rn em diferentes materiais, não sendo necessário o emprego de aparato eletrônico durante as coletas, o quê torna-se vantajoso quando a medida deve ser realizada em locais de difícil acesso e o monitoramento por longos períodos resultando em medida integrada é desejável.

Os detectores passivos mais utilizados são o carvão ativado, os dosímetros termoluminescentes (TLD) e os detectores de traços nucleares do estado sólido (Nikezić & Urošević, 1998, Durrani, 2001, Turek et al., 2004).

Neste trabalho optou-se pelo uso de detectores de traços nucleares do estado sólido para medida de radônio, devido ao seu baixo custo, ao fato de não ser necessário dispositivo eletrônico associado à medida e a necessidade de um procedimento de medida integrada (exposição a longo prazo dos detectores), também por ser uma técnica de amplo domínio do Laboratório de Radiometria Ambiental da Gerência de Metrologia das Radiações do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

4.2 Radiação de Fundo em Detectores de Traços Nucleares

A principal e mais importante característica dos detectores de traços nucleares é a sensibilidade a partículas carregadas pesadas (alfa, prótons e fragmentos de fissão), contudo, está característica pode tornar-se problemática na utilização deste tipo de detector em caso de armazenamento inadequado, pois, desde a sua fabricação, os mesmos já estão sujeitos a interações com a radiação e podem detectar tanto a radiação devida aos raios cósmicos, ao radônio, torônio e filhos, presentes nos ambientes onde os detectores são armazenados. Assim, quando o detector for utilizado, já apresentará certa quantidade

de traços. Essa quantidade de traços presente no detector antes de sua utilização é chamada de radiação de fundo ou simplesmente *background*.

É inevitável evitar a formação dos traços de radiação de fundo durante o período de armazenamento; contudo, existem alguns procedimentos que podem ser adotados para minimizar seus efeitos. Uma boa alternativa seria embalar as placas dos detectores com várias camadas de papel ou um plástico comum, para diminuir o contato dos detectores com a radiação presente no ambiente (em geral ^{222}Rn), ou guardar as placas dos detectores na vertical, para diminuir a incidência de radiação cósmica (Paulo, 1991).

A situação ideal para armazenamento dos detectores seria estocá-los em um ambiente livre de radônio, porém uma boa alternativa, que costuma ser adotada na maioria dos estudos envolvendo detecção com detectores passivos, é descontar a radiação de fundo nas leituras dos detectores expostos ao ^{222}Rn e filhos.

Quando a atividade alfa a ser medida for muito baixa, recomenda-se a utilização de detectores recém-fabricados, pois os mesmos apresentarão menor quantidade de traços devido à radiação de fundo. Quando os detectores expostos apresentarem quantidade elevada de traços, em caso de detectores recém-fabricados os traços devidos à radiação de fundo podem ser desprezados.

No trabalho anterior (Alberigi, 2006) foi utilizado o detector Makrofol E, neste detector a leitura dos traços foi dificultada pelo alto nível de radiação de fundo (da ordem de 1000 traços/cm^2). Atualmente optamos pelo uso do CR-39 por ser um detector de radiação de fundo baixa (da ordem de 100 traços/cm^2).

O CR-39 utilizado foi comercializado pela empresa americana Landauer, e possui dimensões de 1,7 cm^2 de área e 0,9 mm de espessura. O CR-39 é posicionado no interior do monitor de radônio modelo NRPB.

4.3 O Monitor NRPB

O suporte para o detector (FIG. 13) é popularmente chamado de monitor NRPB, por ter sido desenvolvido no início dos anos 80 por Miles e Dew (1982), dois pesquisadores do antigo Conselho Nacional de Proteção Radiológica do Reino Unido (NRPB) que foi incorporado em 1º de Abril de 2005 à Agência de Proteção a Saúde do Reino Unido (Health Protection Agency (HPA)).

O suporte de polipropileno (FIG. 14) age como uma simples câmara de difusão, excluindo produtos de decaimento de radônio e poeira, limitando a entrada de umidade, porém permitindo a entrada do gás radônio por pequenos espaços entre a parte inferior e superior do suporte. A parte inferior do monitor possui um rebaixamento no local para posicionamento do detector CR-39. As dimensões do monitor NRPB são de aproximadamente 5,5 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura. O radônio entra no suporte com um tempo de meia-vida para a entrada de 25 minutos que é relativamente curto se comparado com a meia-vida do radônio de 3,82 dias. Isto significa que os níveis de radônio no interior do suporte rapidamente se aproximam dos níveis externos, independente de qualquer variação da concentração externa (Hardcastle et al., 1996).

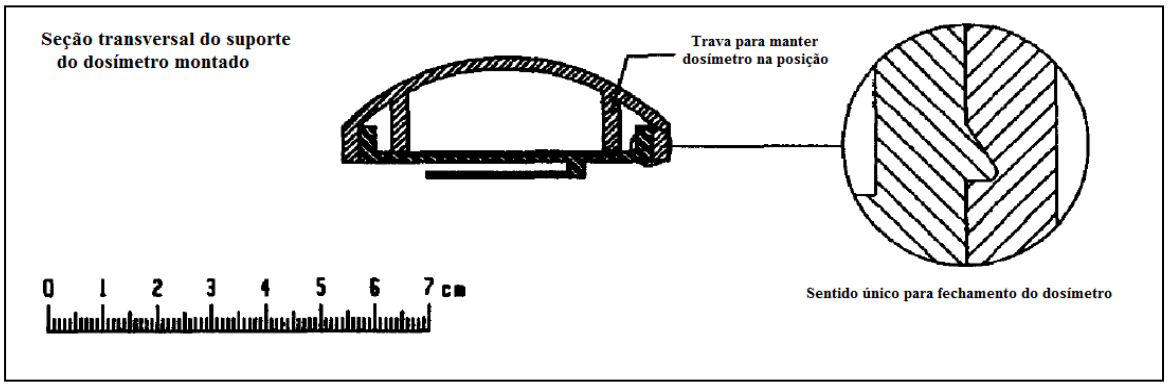

FIGURA 13 – Diagrama esquemático do dosímetro NRPB.

(a)

(b)

FIGURA 14 – Monitor de radônio NRPB com detector CR-39 no centro
a) aberto, **b)** fechado

4.4 O Ataque Químico

É importante estabelecer rigorosamente as condições de ataque de acordo com os resultados desejados, pois a partir da revelação as informações contidas no detector serão reveladas.

Existem diversos protocolos para a realização da revelação dos detectores de traços, que devem ser estabelecidas cuidadosamente. Em geral, a solução reveladora varia com o tipo de material, sendo ácida para detectores de origem inorgânica e alcalina para plásticos. Muitos pesquisadores preferem associar ao processo de revelação pré-ataques eletroquímicos com aplicação de tensão, temperatura e freqüência que podem variar de acordo com o tipo de estudo a ser realizado (Piesch et al., 1991). O processo de revelação dos detectores CR-39 é realizado em solução de 30% de KOH em banho-maria a 80°C durante um período de 5,5 horas (Orlando et al., 2002). O ataque químico quebra as ligações de carbono liberando cadeias em forma de polialil álcool que se dissolve e se difunde para os traços atacados (Stejny, 1987).

Após o período de exposição e troca, os detectores são enviados ao Laboratório de Detectores de Traços Nucleares do Laboratório de Radiometria Ambiental (LRA) da Gerência de Metrologia das Radiações (GMR) para análise.

4.5 Contagem dos traços

Quando se trabalha com detectores de traços, uma das maiores dificuldades encontradas na determinação das concentrações é a leitura e a quantificação dos traços. Em geral, a leitura dos traços pode ser feita de duas formas: de maneira visual e manual com auxílio de microscópio óptico comum ou utilizando câmara de faíscas (Enge, 1980, Sajó-Bohus et al., 1997, Sannappa et al., 2003). Também, em muitos casos, vários pesquisadores preferem adotar algum tipo de software capaz de contar os traços de forma automática ou semi-automática, por meio de programação prévia, desde que sejam definidos parâmetros iniciais, como, por exemplo, tonalidade dos traços (Amgarou et al., 2001, Tsankov et al., 2005, Da Silva, 2005).

É fato que o ambiente de cavernas submete os detectores de traços à grande de densidade de traços, devido aos altos níveis de radônio conforme mostrado na TAB. 1.

Deste modo é necessário obter uma metodologia confiável e prática que facilite e acelere o procedimento de leitura dos traços, uma vez que para detectores expostos em atmosfera com grande quantidade partículas alfa, a leitura de cada um dos detectores por toda sua área torna-se praticamente impossível.

Como já observado em procedimentos de leituras de traços em detectores realizadas anteriormente, em geral, a distribuição dos traços em toda superfície do detector ocorre de forma homogênea. Supondo que exista uma relação entre essa densidade homogênea total de traços no detector e a quantidade de traços medida em regiões aleatórias do detector, e uma vez que esta relação seja determinada, pode ser aplicada nos procedimentos de leitura de traços, simplificando e reduzindo o tempo de leitura dos detectores. A relação foi chamada de "fator de leitura de traços F_T" (Alberigi et al., 2005a).

A mesma metodologia foi empregada para determinar a relação para CR-39. O fator de leitura de traços $F_{T,}$ foi determinada submetendo cinco detectores CR-39 (colocados no interior de um recipiente adequado, no caso, célula de Lucas adaptada) a exposição de concentrações conhecidas de ^{222}Rn (equivalente a 15,2 kBq/m^3 proveniente da câmara de calibração Pylon Model RN-150 (FIG. 15) (Pylon, 1992).

Posteriormente a contagem dos traços foi feita varrendo toda a superfície de cada um dos detectores, obtendo-se assim a densidade total de traços. Em seguida foram escolhidas para cada detector três faixas de regiões centrais (para garantir que a área de leitura apresentasse somente traços, evitando as bordas do detector) e foi realizada a contagem de traços nestas regiões, obtendo um valor médio de traços na região central. Conhecendo a densidade total de traços nos detectores e os valores médios obtidos nas regiões centrais dos mesmos, F_T foi determinado por meio da equação:

$$F_T = \frac{D}{n_T} \qquad (4.5)$$

onde:

F_T = fator de leitura de traços (traços.cm^{-2});

D = densidade total de traços no detector (traços.cm^{-2});

n_T = quantidade de traços por faixa (valor médio de leitura das três faixas).

Com o fator F_T é possível determinar a densidade de traços nos detectores, calculando o valor médio obtido da leitura de apenas três faixas centrais e multiplicando

este valor por F_T, reduzindo significativamente o tempo de contagem de traços nos detectores.

FIGURA 15 – Fonte Pylon RN-150 e célula de Lucas adaptada acoplada ao sistema.

4.6 Determinação da concentração de ^{222}Rn

A concentração de radônio é determinada por meio da seguinte equação (Eappen & Mayya, 2004):

$$C_{Rn} = \frac{D}{K \cdot t} \qquad (4.6)$$

onde:

C_{Rn} = concentração de ^{222}Rn (kBq/m^3)

D = densidade de traços (tr/cm^2)

t = tempo de exposição (h)

K = eficiência do detector (tr.m^3/cm^2.kBq.h)

Para a determinação das concentrações de radônio no ar, além da quantidade total de traços no detector (densidade de traços) e do tempo de exposição, é necessário conhecer a eficiência *K* do detector utilizado. Também chamada de "fator de conversão de traços em concentração de radônio" ou simplesmente "fator de calibração", a eficiência permite converter a densidade de traços em atividade de radônio. A eficiência de detectores de traços em geral é determinada experimentalmente e pode ser confirmada por meio de exercícios de intercomparação. Com o extensivo uso do monitor NRPB por vários laboratórios europeus e a realização de intercomparações a estimativa de um fator de calibração médio para o monitor quando utilizado com CR-39 foi obtido (Orlando et al., 2002).

O fator de calibração calculado para protocolo de revelação com solução de 30% de KOH em banho-maria a 80°C por 5,5 horas é (Howard & Miles, 2002):

$$K_{NRPB} = (2{,}8 \pm 0{,}2)\ (\mathrm{tr.m^3/cm^2.kBq.h})$$

A incerteza associada à concentração de radônio foi calculada por meio da expressão (Atalla, 1978, Knoll, 1979):

$$\sigma_{C_{Rn}} = \sqrt{\left(t^{-1}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{K}\right)^2 \cdot \left[\frac{\sigma_D^2}{D^2} + \frac{\sigma_K^2}{K^2}\right]} \qquad (4.6.1)$$

4.7 Estudo do equilíbrio radioativo entre ^{222}Rn e seus descendentes dentro do monitor NRPB

O ^{222}Rn decai para outros elementos conforme segue (Evans, 1955):

	^{222}Rn	$\rightarrow$	^{218}Po	$\rightarrow$	^{214}Pb	$\rightarrow$	^{214}Bi	$\rightarrow$	^{214}Po	$\rightarrow$
Tipo de Decaimento		α		α		β^-		β^-		α
Meia-vida	3,82 dias		3 min.		26,8 min.		19,7 min.		164 μs	

Supondo que no instante t = 0 só exista radônio, após 4 horas será atingindo o equilíbrio radioativo entre radônio e seus descendentes de meia-vida curta emissores alfa ^{218}Po e ^{214}Po. Como há diferenças entre a energia desses emissores alfa (5,49 MeV para o ^{222}Rn, 6,003 MeV para ^{218}Po e 7,687 MeV para ^{214}Po), os diâmetros dos traços visualizados no detector revelado também apresentarão diferenças, permitindo a identificação.

Segundo Khayrat e Durrani (1999) para ataques químicos realizados por um curto período de tempo, a perda de energia total sob o intervalo de tempo será maior para energias menores do que para energias maiores. Entretanto se o ataque é feito até o final da faixa de energia da partícula alfa, então a perda de energia será maior para energias maiores. O diâmetro deveria ser maior para altas energias de partículas alfa e menor para baixas energias quando o ataque é feito até o final da faixa de energia da partícula.

Khayrat e Durrani (1999) testaram a hipótese acima usando um feixe colimado de partículas alfa de uma fonte de amerício ^{241}Am (E = 5,49 MeV) com incidência vertical em CR-39, atravessando diferentes distâncias de ar. O resultado do experimento, bem como o tempo de ataque para atingir o final da faixa de energia alfa é apresentado na TAB. 3.

TABELA 3 – O alcance *R* no CR-39 correspondente a várias energias α usadas no experimento. Os valores determinados experimentalmente da velocidade de ataque do traço V_T e do tempo *t* calculado* para o ataque atingir o final da faixa α sob condições padrões de ataque são mostrados na tabela a seguir (Khayrat & Durrani, 1999):

E_α (MeV)	5,49	4,8	4,2	3,7	2,7	1,6
$R(\mu m)$	32,73	26,65	21,82	18,14	11,73	6,21
V_T ($\mu m.h^{-1}$)	3,74	4,04	5,46	5,7	5,86	6,21
$t(h) = R/V_T$	8,75	6,60	4,00	3,18	2,00	1,00

* O tempo de ataque t é calculado assumindo como constante o valor de V_T (mostrado em coluna relevante da tabela) sob a faixa inteira da partícula α.

Assim, reproduzindo o experimento realizado por Khayrat e Durrani seria possível obter medidas diferentes para os diâmetros dos traços de diferentes energias para tempos de revelação diferentes, possibilitando determinar quais seriam os tempos de ataque necessários para revelação completa dos traços com as energias incidentes relativas aos descendentes do radônio. Logo, submetendo os detectores expostos nas cavernas a esses tempos de ataques, seria possível discriminar e quantificar os traços referentes à

^{222}Rn, ^{218}Po e ^{214}Po, afim de observar o comportamento destes radionuclídeos no interior do monitor NRPB.

4.8 Determinação das concentrações dos isótopos de rádio de meias-vidas longas, ^{226}Ra e ^{228}Ra em amostras de água subterrânea e de superfície

A determinação das concentrações de atividade de ^{226}Ra e ^{228}Ra em amostras de água subterrânea e de superfície foi realizada pela contagem alfa e beta total, respectivamente, de um precipitado de Ba(Ra)SO_4 em detector proporcional de fluxo gasoso de baixa radiação de fundo, modelo Berthold LB 770. Esta técnica é vantajosa por apresentar uma baixa radiação de fundo e, conseqüentemente, um limite de detecção também muito baixo, aproximadamente 2,2 mBq/L para ^{226}Ra e 3,7 mBq/L para ^{228}Ra (Oliveira, 1993, Oliveira et al., 2001).

A concentração de atividade de ^{226}Ra foi obtida a partir da seguinte expressão:

$$A\,(^{226}\mathrm{Ra}) = \frac{Rn - Bg}{60 \cdot RQ \cdot EF\alpha \cdot fabs \cdot \left[1 + k\left(1 - e^{-\lambda t}\right)\right] \cdot Q} \qquad (4.8)$$

onde:

A(^{226}Ra) = atividade de ^{226}Ra, em Bq/L.

Rn = taxa de contagem alfa total da amostra (cpm).

Bg = taxa de contagem da radiação de fundo alfa total (cpm).

RQ = rendimento químico gravimétrico percentual (%).

$EF\alpha$ = eficiência de contagem alfa total, calculada pelo ^{241}Am (cps/dps).

Q = quantidade da amostra (L).

fabs = coeficiente de auto-absorção do ^{226}Ra no precipitado de Ba(Ra)SO_4.

λ_{222Rn} = 0,181 d^{-1}.

t = tempo desde a precipitação até a contagem (d).

k = constante que leva em conta a diferença entre os coeficientes de auto-absorção das 4 partículas alfa que são emitidas no decaimento do ^{226}Ra e que tem as energias: ^{226}Ra (4,8 MeV), ^{222}Rn (5,5 MeV), ^{218}Po (6,0 MeV) e ^{214}Po (7,7 MeV).

$$k = \frac{fabs\left(^{222}Rn\right) + fabs\left(^{218}Po\right) + fabs\left(^{214}Po\right)}{fabs\left(^{226}Ra\right)} \quad (4.8.1)$$

A expressão que forneceu a concentração de atividade de ^{228}Ra a partir da medida beta total é:

$$A\left(^{228}Ra\right) = \frac{Rn - Bg}{60 \cdot RQ \cdot EF\beta\left(^{228}Ra\right) \cdot Q} - \frac{EF\beta\left(^{226}Ra\right) \cdot A\left(^{226}Ra\right)}{EF\beta\left(^{228}Ra\right)} \quad (4.8.2)$$

onde:

A(^{228}Ra) = atividade do ^{228}Ra, em Bq/L.

Rn = taxa de contagem beta total obtida (cpm).

Bg = taxa de contagem da radiação de fundo beta total (cpm).

RQ = rendimento químico gravimétrico percentual (%).

$EF\beta(^{228}Ra)$ = eficiência de contagem beta total, calculada pela medida de um precipitado padrão de Ba(^{228}Ra)SO_4 (cps/dps).

$EF\beta(^{226}Ra)$ = eficiência de contagem beta total, calculada pela medida de um precipitado padrão de Ba(^{226}Ra)SO_4 (cps/dps).

$A(^{226}Ra)$ = atividade calculada para o ^{226}Ra, em Bq/L.

Q = quantidade da amostra (L).

4.9 Determinação da dose efetiva devida à inalação de ^{222}Rn

Para avaliar os efeitos biológicos causados por radiações ionizantes é necessário estimar a dose de radiação recebida, chamada de dose efetiva de radiação.

Para a determinação da dose efetiva é necessário saber sobre os mecanismos de incorporação do radionuclídeo, seu metabolismo e seu comportamento no corpo humano.

A estimativa dessa dose de radiação é baseada no homem-referência, cujas características fisiológicas e anatômicas foram definidas pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP-23, 1975).

A incorporação de radionuclídeos pode ocorrer por inalação, ingestão ou por meio de absorção pela pele ilesa ou ferida. O termo “intake” é utilizado para descrever a

quantidade de radionuclídeos que foram incorporados por meio de inalação ou ingestão (ICRP-10, 1968).

No caso de um radionuclídeo gasoso como o radônio, a inalação é a principal via de incorporação. Os compostos radioativos sólidos inalados na forma de aerossóis podem seguir uma série de caminhos dentro do organismo dependendo das suas propriedades físico-químicas. Uma parte do que é inalado é depositada no trato respiratório e daí transportada para outros órgãos e tecidos e o restante é exalado (ICRP-66, 1994).

A dose de radiação recebida pelo tecido do trato respiratório devido à inalação do radônio e de seus produtos de decaimento não pode ser diretamente medida. Sua determinação deve ser feita por meio de modelos dosimétricos que avaliem a quantidade de material inalado e a deposição, retenção e eliminação deste material do trato respiratório.

A dose efetiva causada pela exposição ao radônio e seus produtos de decaimento foi calculada por meio da equação (Papachristodoulou et al., 2004, Aytekin et al., 2006, Somlai et al., 2009, Kávási et al., 2010, Langridge et al., 2010):

$$E = C_{Rn} \times F \times t \times d \times u \quad (4.9)$$

onde:

E = dose efetiva devida à inalação do radônio na caverna (mSv/a);

C_{Rn} = concentração média de radônio no ar (Bq/m^3);

F = fator de equilíbrio entre o radônio e seus produtos de decaimento;

t = tempo gasto anualmente dentro da caverna pelo guia (h/a);

d = fator de conversão de dose (= 1,4 mSv/mJ.h.m^{-3}) (ICRP-65, 1993);

u = fator de conversão de unidade (= 5,6 x 10^{-6} mJ.m^{-3}/Bq.m^{-3}) (ICRP-65, 1993).

Das grandezas, unidades e fatores de conversão empregados para estimativa de dose, um fator particularmente importante é o equilíbrio radioativo entre o radônio e seus descendentes. O fator de equilíbrio é expresso como a razão entre a energia total de partículas alfa que uma mistura de radônio e seus descendentes emitirá e a energia total emitida pela mesma concentração de gás radônio em perfeito equilíbrio com seus descendentes (Safety Reports Series 33, 2003). Quando ambas as concentrações são iguais

o fator de equilíbrio é igual a 1. Entretanto, a atividade dos descendentes de radônio é usualmente menor do que atividade do pai radônio, e conseqüentemente o fator de equilíbrio é usualmente menor do que 1 (CCOHS, 2010).

Para a estimativa de dose do presente trabalho, três cenários são propostos, e para o cálculo foi adotado o fator de equilíbrio 0,5 que já vem sendo utilizado em estimativa de doses em cavernas (Pinza-Molina et al., 1999, Przylibski, 1999, Gilmore et al., 2002, Papachristodoulou, 2004). Também foi feita estimativa de dose utilizando valores para fator de equilíbrio 0,7 e 1, para simular uma situação intermediária e a pior situação possível (atividade de filhos igual à atividade de ^{222}Rn), respectivamente.

Também para a estimativa da dose efetiva é necessário saber o tempo gasto pelos usuários (neste caso guias turísticos ou visitantes). Em muitos trabalhos é adotado um tempo de exposição anual de 1000 horas para os guias turísticos (Przylibski, 1999, Papachristodoulou et al., 2004).

A suposição das 1000 horas parte da consideração que os guias trabalhem 8 horas por dia nos fins de semana, portanto 16 horas (sábado e domingo) mais metade de sexta-feira (4 horas) totalizando 20 horas semanais, uma vez que a maior parte das visitas ocorre nos fins de semana. Conversas informais com funcionários, guias e artigos em mídia impressa (Vendrame, 2006), mostraram ser correta a suposição do trabalho no fim de semana.

De qualquer forma, no caso das cavernas do PETAR, supor 1000 horas por ano para cada caverna seria superestimar a dose para os guias, pois, devido às características e dificuldades das cavernas consideradas nem sempre os guias conseguem percorrer todas as cavernas monitoradas em apenas um dia, logo o número de horas de trabalho é menor.

Considerando o protocolo de trabalho estabelecido pela Secretaria do Meio Ambiente do Governo do Estado de São Paulo (SMA, 2005) e informações de usuários e turistas (Vendrame, 2006), os tempos de visitação estimados para cada uma das cavernas são os seguintes: Morro Preto: 1h, Santana: 2 h, Colorida: 1h e Diabo: 1 h.

Em conversas com o gerente comercial da Pousada da Diva localizada no bairro da Serra (PETAR), recebemos a informação de que um guia turístico passa em média 3,5 horas por dia no interior das cavernas (3,5 horas gastas em visitas de 2 ou 3 cavernas no máximo em um único dia) (Andrade Junior, 2010).

De acordo com as informações recebidas os guias da Pousada da Diva são os que mais operam, trabalhando em média 12 dias por mês. O restante dos guias empregados por outras empresas trabalham em média 5 dias por mês (Andrade Junior, 2010).

Assim, para o cálculo de dose, a suposição do tempo de exposição foi feita separadamente para cada caverna, considerando as informações de estimativa de tempo gasto em cada visita. Devido às diferenças nos resultados das concentrações obtidos para os períodos monitorados, os cálculos levam em consideração tanto a média aritmética das concentrações como a média geométrica, que é, contudo pouco influenciada por estas alterações.

4.10 Dados Ambientais

O trabalho conjunto com pesquisadores que monitoraram a quantidade de chuvas e medidas de temperatura na caverna Santana possibilitou a obtenção de resultados para comparação com as variações nos níveis de radônio.

Os pesquisadores Dr. José Antonio Ferrari e Dr. Gustavo Armani do Instituto Geológico do Estado de São Paulo que desenvolvem um trabalho sobre drenagem subterrânea nos planaltos cársticos do rio Betari (Ferrari, 2010) estão monitorando a quantidade de chuvas diárias na caverna Santana e forneceram os resultados que abrangem os períodos entre Novembro de 2009 a Junho de 2010. O pesquisador Heros Lobo do Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista (Campus de Rio Claro) que desenvolve trabalho sobre capacidade de carga turística na caverna Santana (Lobo, 2010) esta realizando o monitoramento de temperatura em pontos distribuídos no interior e externamente a mesma caverna, forneceu as medidas de temperaturas para o período compreendido entre Abril de 2009 e Março de 2010. Além desta valiosa contribuição para o trabalho, os três pesquisadores contribuíram também com as trocas e recolhimento dos monitores, conforme será descrito em 5.1.

Além dos resultados obtidos acima, foram consultadas outras fontes de pesquisa, com a finalidade de englobar uma quantidade maior de informações sobre quantidade de chuvas na região durante o período de monitoramento de radônio (Abril/2009 – Junho/2010).

Inicialmente, o objetivo era a busca de medidas nas localizações das cavernas monitoradas, caso estas informações fossem ausentes, a busca abrangeria as cidades que

compõem os parques, e em último caso a busca por informações nas proximidades dos três parques (cidades vizinhas a região). Para isto, foram demarcadas as áreas de interesse que seriam as 10 cidades onde estão localizados os três parques em estudo: Cananéia, Jacupiranga, Cajati, Eldorado, Barra do Turvo, Iporanga, Guapiara, Ribeirão Grande, Sete Barras e Apiaí e áreas que delimitassem esta região, que seriam compostas pelas cidades de Capão Bonito, Taquarivai, Itapeva, Ribeirão Branco, Barra do Chapéu, Ribeira, Itaoca e Pariquerá-Açu.

As informações foram pesquisadas em sites do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (2010), do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) (2010) e Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas do Instituto Agronômico de Campinas (CIIAGRO/IAC) (2010).

No site do INMET o banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa abriga dados diários em formato digital referente a séries históricas de 291 estações meteorológicas convencionais, todavia, para fins desta pesquisa, foi encontrada apenas uma estação de interesse que está localizada em Barra do Turvo, e outra fora da área demarcada que seria a estação de Iguape, motivo pelo qual foram descartadas.

No site do CPTEC, por meio de pesquisa das informações disponíveis através das plataformas de coletas de dados hidrológicos, foi possível localizar resultados de boa parte das cidades demarcadas. Os resultados para medidas de pluviosidade são medidos diariamente de hora em hora, entretanto, a maioria dos resultados destoava muito se comparado com outras medidas de chuva diária. Para esclarecimento sobre os altos índices de pluviosidade, foi feito contato com a equipe de atendimento do CPTEC via correio eletrônico, que prontamente respondeu, também achando os valores elevados, descrevendo as quantidades de chuvas como absurdas, informando que algumas plataformas de coletas de dados apresentavam problemas e sugerindo consulta ao banco de dados do INMET.

No site do CIIAGRO, a pesquisa do balanço hídrico por local, traz informações semanais sobre temperatura e precipitação. Foram encontrados resultados mais condizentes para medidas de chuva para as cidades de Capão Bonito, Sete Barras, Registro, Jacupiranga, Pariquerá-Açu, Cananéia, Ribeira e Itapeva, inseridas na região demarcada, (FIG. 16), ou seja, oito cidades pertencentes à região demarcada, das quais três delas, Sete Barras, Jacupiranga e Cananéia compõem parte das cidades que integram os três parques.

Embora o ideal fosse obter maior quantidade de dados sobre chuva e temperatura na região, optou-se pela adoção dos resultados de chuva e temperatura obtidos do banco de dados do CIIAGRO para este trabalho.

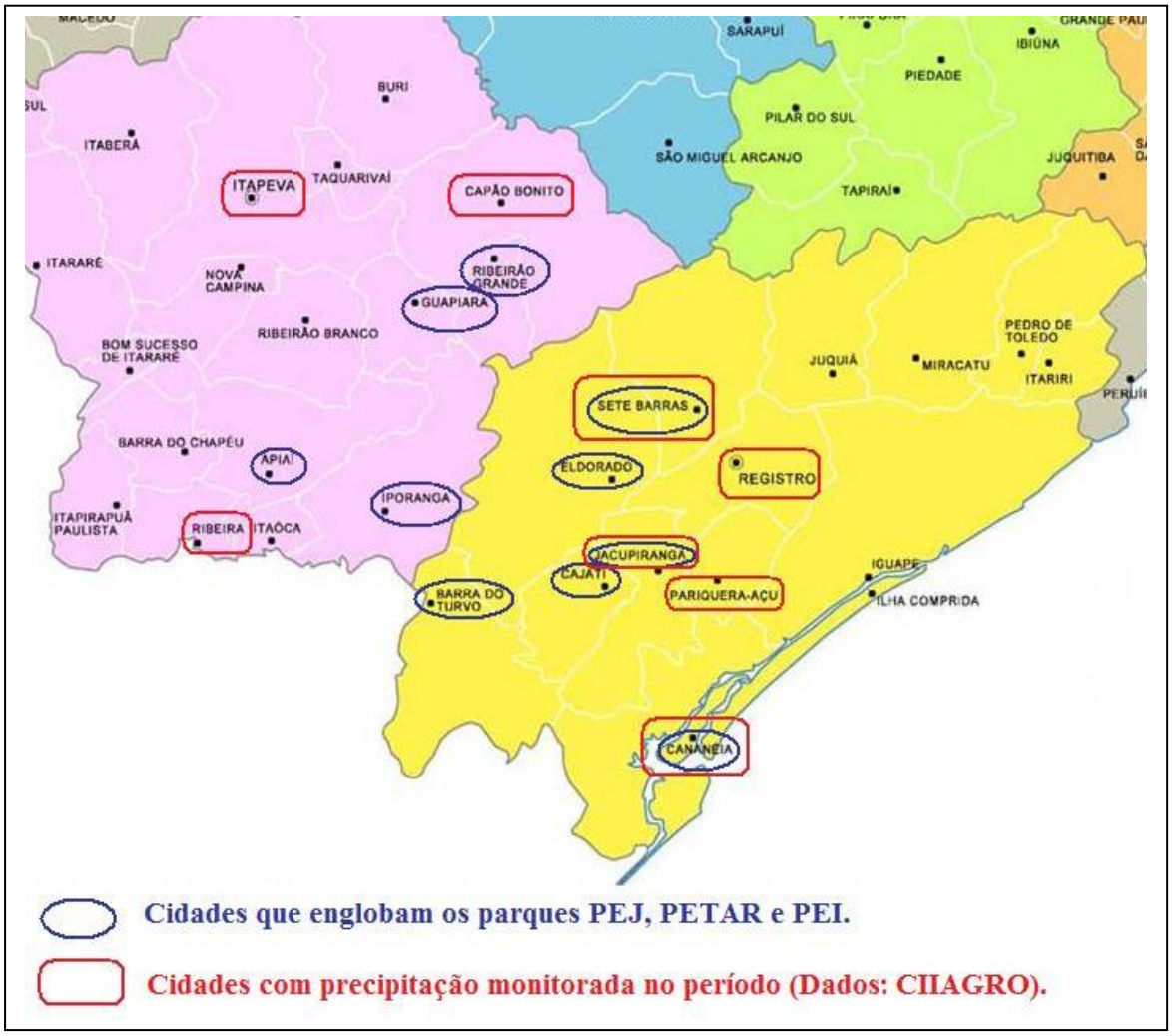

FIGURA 16 – Cidades que abrigam os parques PETAR, PEJ e PEI, e cidades com informações de chuva e temperatura no período.

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Instalação dos monitores de ^{222}Rn nas cavernas

A instalação e troca dos monitores nas cavernas avaliadas, contou com a colaboração dos pesquisadores Dr. José Antonio Ferrari e Dr. Gustavo Armani do Instituto Geológico do Estado de São Paulo e do pesquisador Heros Lobo do Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista (Campus de Rio Claro), e que estão realizando o monitoramento de chuvas e temperatura nas cavernas, respectivamente.

Conforme descrito em 3.2 os detectores foram colocados nas quatro cavernas, com onze pontos de monitoramento distribuídos entre os salões mais visitados; em cada ponto foi posicionado um detectores.

Os monitores foram pendurados em estalactites no centro dos salões (distantes do teto) (FIG. 17), ficando expostos por um período mínimo de 30 dias. O período de avaliação teve início em Abril de 2009 e foi finalizado em junho de 2010.

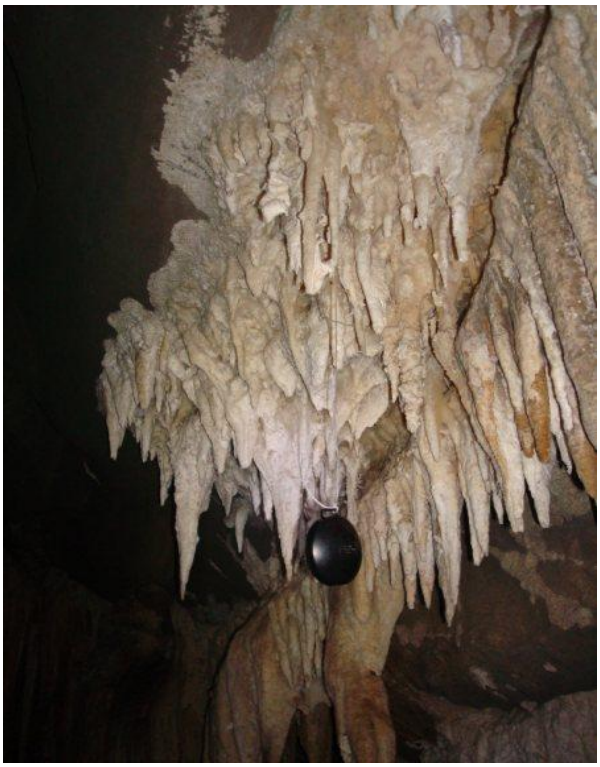

FIGURA 17 – Monitor pendurado em estalactite da caverna Santana.

5.2 Revelação dos detectores expostos nas cavernas

Os detectores, após expostos eram enviados ao IPEN para tratamento químico. O processo de revelação adotado neste trabalho utilizou a solução alcalina de 30% de KOH em banho-maria Quimis (FIG. 18) a 80°C sob agitação constante durante um período de 5,5 horas (Orlando et al., 2002).

FIGURA 18 – Revelação de detectores CR-39 em banho-maria.

5.3 Visualização dos traços

Terminada a revelação, os detectores, após lavagem, eram 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"(FIG. 19 e 20).

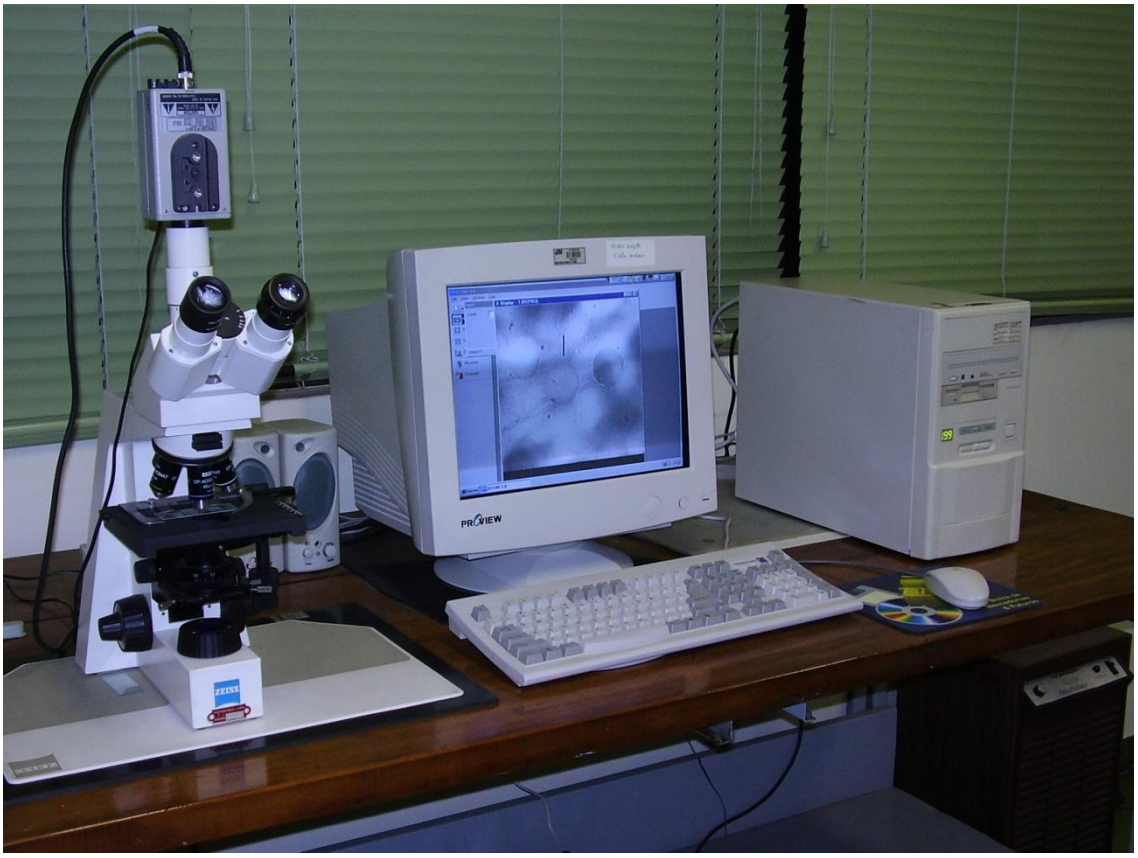

FIGURA 19 – Sistema para visualização e contagem dos traços.

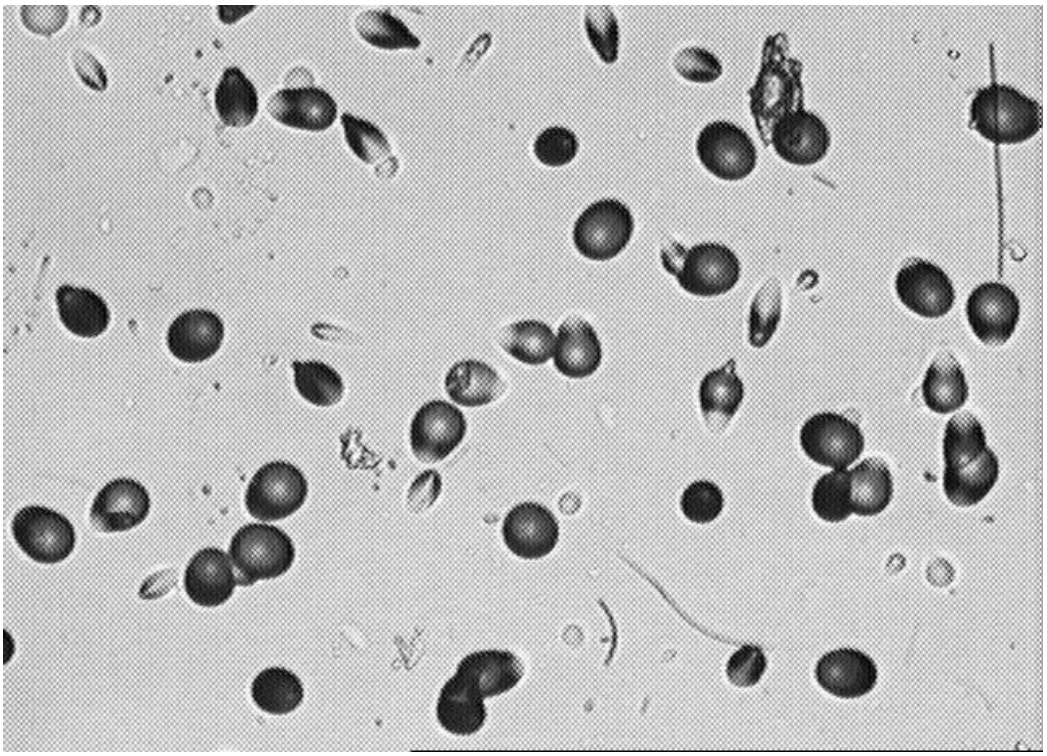

FIGURA 20 – Imagem de traços na superfície do detector CR-39.

5.4 Verificação do equilíbrio radioativo entre ^{222}Rn e seus descendentes no monitor NRPB

Conforme descrito na seção 4.7 o experimento realizado por Khayrat & Durrani, foi reproduzido no laboratório de traços do LRA. Para tanto, inicialmente cinco detectores CR-39 foram previamente irradiados conforme mostrado em diagrama (FIG.21) com uma fonte de ^{241}Am emissor de partículas alfa, usando espaçadores de lucite (FIG. 22) com mesmo diâmetro e tempos de irradiação conforme especificado na TAB. 4.

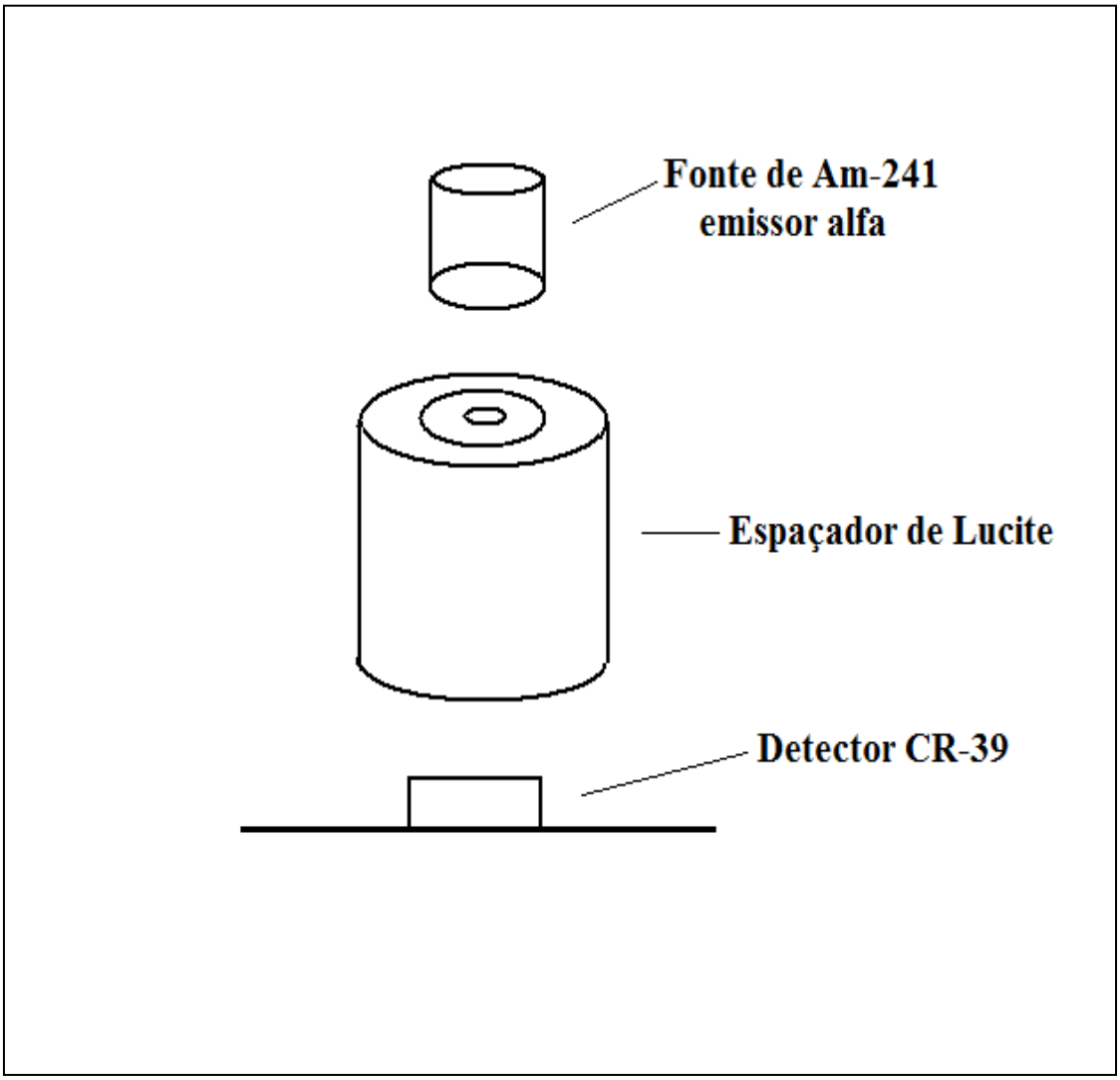

FIGURA 21 – Diagrama do experimento para verificação do equilíbrio radioativo.

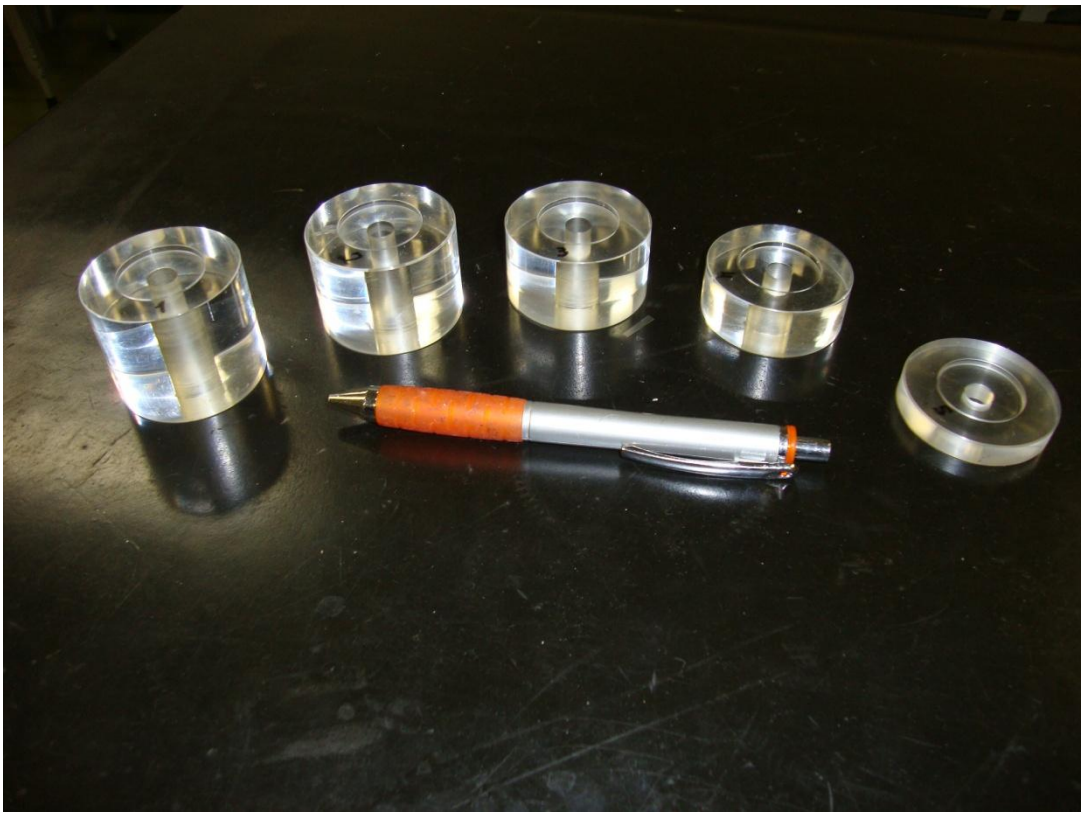

FIGURA 22 – Espaçadores de lucite utilizados no experimento.

TABELA 4 – Tempos e distâncias de irradiação com ^{241}Am dos detectores CR-39.

Detector CR-39	Espaçador (mm)	Tempo de irradiação (min.)
1	35,5	1,5
2	30,5	1,5
3	24,0	1,0
4	14,9	0,5
5	5,7	0,5

Os detectores depois de irradiados passaram por ataque químico conforme protocolo descrito em 5.2, porém com tempos de revelação distintos, determinado através da TAB. 3 mostrada na seção 4.7. Os tempos de revelação obtidos são mostrados na TAB. 5. Após a secagem dos detectores, foi possível fazer a visualização e medida de alguns diâmetros, a fim de verificar a sua diferenciação.

A partir do diâmetro médio para cada detector pôde-se determinar a relação entre a energia da partícula incidente e diâmetro médio do traço. Para isso é necessário

calcular a energia incidente no detector, lembrando que cada espaçador determinou uma distância entre a fonte e o detector.

Por meio de equação a seguir (Fleischer, 1988) calcula-se o alcance das partículas alfa no ar, para as condições experimentais:

$$R = 0{,}309 \cdot E^{\frac{3}{2}} \qquad (5.4)$$

onde:

R = Alcance das partículas alfa no ar, em cm.

E = Energia das partículas alfa, em MeV.

A TAB. 5 apresenta os tempos de revelação e as medidas de diâmetros obtidas nos cinco detectores irradiados com ^{241}Am.

TABELA 5 – Tempo de revelação e diâmetros dos traços em CR-39 irradiados com ^{241}Am.

CR-39	Esp. (cm)	ΔE (cm)	E (MeV)	T(min.)	D(μm)
1	3,55	3,11	2,38	105	11,46
2	3,05	2,67	2,81	140	14,61
3	2,4	2,1	3,38	256	26,62
4	1,59	1,4	4,08	355	35,54
5	0,57	0,5	4,98	430	41,92

Com as medidas dos diâmetros foram calculadas suas correspondentes energias. A partir dos resultados obtidos experimentalmente, os tempos de ataque químico para completa revelação dos traços devido aos descendentes de radônio também foram obtidos. Assim, com os resultados da TAB. 5, foi feito o gráfico mostrado na (FIG. 23) permitindo o ajuste para determinar os tempos de revelação para identificação de radionuclídeos de interesse.

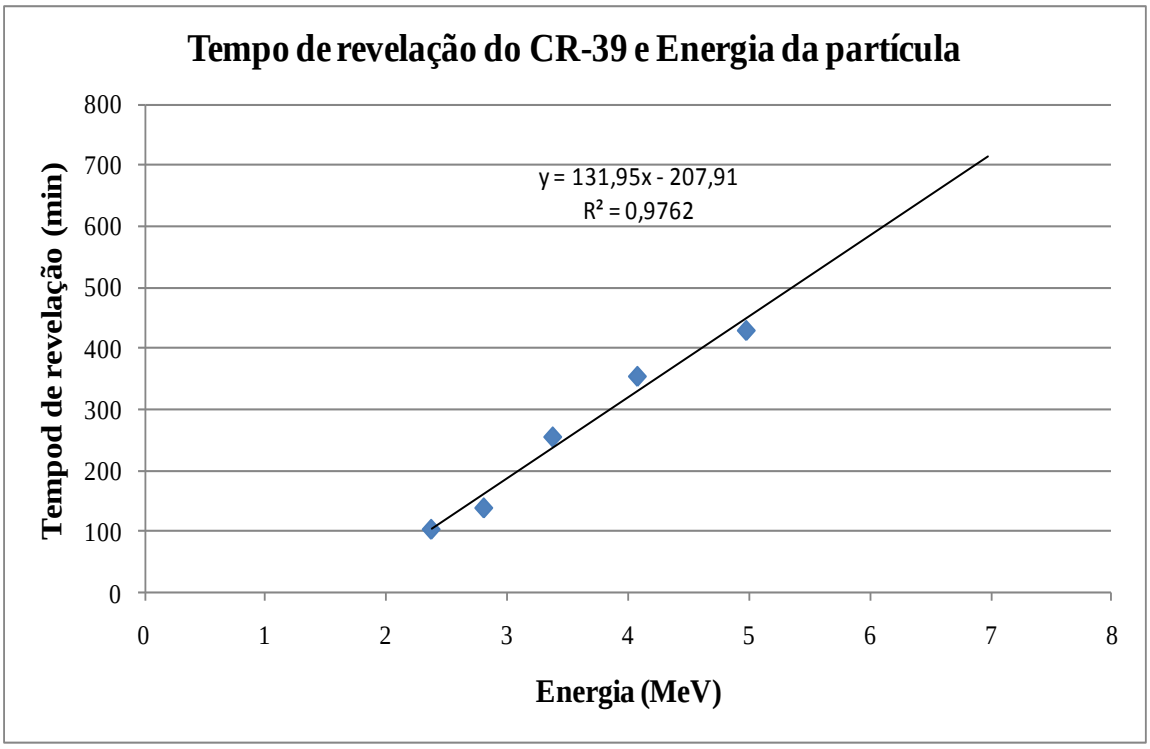

FIGURA 23 – Tempo de revelação e energia das partículas alfa em CR-39.

Assim, para atingirmos traços referentes ao ^{222}Rn, ^{214}Po e ^{218}Po que correspondem as energias de 5,49 MeV, 6,003 MeV e 7,687 MeV respectivamente, da equação ajustada, obteremos tempos de revelação iguais a 516 minutos (8h 36min) para a revelação de traços correspondentes a emissões de ^{222}Rn, 584 minutos (9h 44min) para ^{214}Po e 806 minutos (13h 26min) para ^{218}Po.

Sendo assim, os detectores expostos nas cavernas que já haviam sido revelados durante 5,5 horas para determinação das concentrações de radônio, foram novamente atacados por 7 horas e 46 minutos, ou seja, tempo restante para atingir as 13 horas e 26 minutos necessárias para revelação de traços correspondentes ao emissor de maior energia.

Após a segunda revelação e secagem dos detectores, foi feita visualização para verificação de diferenças entre os diâmetros.

5.5 Pontos de coletas das amostras de água subterrânea e de superfície

Nas TAB. 6 e 7 são apresentadas as coordenadas geográficas dos pontos de coletas das amostras de água realizadas em abril e setembro de 2009, nos núcleos Santana e Caboclos, respectivamente.

Para as tabelas 8 e 9, os pontos de coletas (designados por letra e número) foram distribuídos ao longo da Rodovia Sebastião Ferraz de Camargo Penteado (SP-250), nos núcleos Areado e Bulha d'água correspondente a outubro de 2009. Todos os núcleos citados pertencem ao PETAR.

TABELA 6 - Localização geográfica das amostras de água coletadas no PETAR, núcleo Santana (Abril de 2009).

Origem das Amostras	Data da coleta	Volume (L)	T (°C)	Latitude	Longitude
Caverna Santana	28/04/2009	5	19	24º31.510'S	48º42.060'W
Caverna Água Suja	28/04/2009	5	19	24º31.250'S	48°42.270'W
Cachoeira do Couto	28/04/2009	5	19	24º31.140'S	48°41.430'W
Caverna Alambari de Baixo	28/04/2009	5	20	24º33.368'S	48º39.888'W
Fonte na Estrada	29/04/2009	5	21	38º51.334'S	94º47.941'W
Furnas	29/04/2009	5	19	24º32.253'S	48º43.371'W
Água Potável – Núcleo Santana	29/04/2009	5	22	24º31.510'S	48º42.060'W

TABELA 7 - Localização geográfica das amostras de água coletadas no PETAR, núcleo Caboclos (Setembro de 2009).

Origem das Amostras	Data da coleta	Volume (L)	T (°C)	Latitude	Longitude
Trilha Casa de Pedra	26/09/2009	2	-	24°26.416'S	48°35.086'W
Trilha Casa de Pedra (Venda do Betão)	26/09/2009	2	-	24°26.933'S	48°35.078'W
Trilha Casa de Pedra (Depois do desmoronamento de calcário)	26/09/2009	2	-	24°27.077'S	48°35.558'W
Rio do Chapéu (Próx. a igrejinha)	26/09/2009	2	16,0	24°26.194'S	48°35.243'W
Gruta Chapéu Mirim I	26/09/2009	2	-	24°24.033'S	48°35.098'W
Rio Iporanga	27/09/2009	2	17,0	24°27.263'S	48°37.553'W
Rio ao lado da mina de chumbo Mina Espírito Santo	27/09/2009	2	19,5	24°27.134'S	48°37.041'W
Rio do Chapéu (Garganta do Diabo, ao lado da mina de calcário)	27/09/2009	2	20,0	24°26.407'S	48°36.573'W
Casa início da trilha (Rio da Montanha da Dúvida)	27/09/2009	2	20,5	24°26.316'S	48°36.337'W
Rio Pescaria	27/09/2009	2	-	24°24.418'S	48°34.055'W
Gruta do Chapéu	27/09/2009	2	17,0	24°26.061'S	48°35.246'W
Caverna das Aranhas	27/09/2009	2	18,0	24°35.246'S	48°35.246'W

TABELA 8 - Localização geográfica das amostras de água coletadas no PETAR, núcleo Areado (Outubro de 2009).

Origem das Amostras	Data da coleta	Volume (L)	T (°C)	Latitude	Longitude
Ponto A1	23/10/2009	2	18,0	24°19.054'S	48°35.183'W
Ponto A2	23/10/2009	2	19,0	24°19.073'S	48°35.175'W
Ponto A3	23/10/2009	2	23,0	24°20.134'S	48°36.053'W
Ponto A4	24/10/2009	2	16,5	24°20.002'S	48°36.016'W

TABELA 9 - Localização geográfica das amostras de água coletadas no PETAR, núcleo Bulha d'água (Outubro de 2009).

Origem das Amostras	Data da coleta	Volume (L)	T (°C)	Latitude	Longitude
Ponto B1	24/10/2009	2	20,0	24°20.149'S	48°30.589'W
Ponto B2	24/10/2009	2	19,0	24°20.042'S	48°30.353'W
Ponto B3	24/10/2009	2	19,5	24°20.156'S	48°30.060'W
Ponto B4	25/10/2009	2	18,7	24°20.130'S	48°30.055'W
Ponto B5	25/10/2009	2	21,0	24°18.549'S	48°30.030'W

5.6 – Coleta de estalactite da caverna Santana para medida de concentração de ^{222}Rn

Estalactite é uma formação alongada, cilíndrica a cônica, pendente da abóbada das grutas calcárias, resultante da precipitação de calcita ou aragonita.

Em viagem para colocação dos detectores realizada em abril de 2009, tivemos a permissão de recolher um pedaço de estalactite (FIG. 24) encontrada no piso da caverna Santana que se desprendeu do teto.

A medida da concentração de ^{222}Rn diretamente numa estalactite permite determinar se a presença do radônio no ar da caverna tem como origem as paredes da mesma.

FIGURA 24 – Pedaço de estalactite recolhida da caverna Santana.

O pedaço de estalactite de 560 gramas foi trazido ao laboratório de traços, pesado e selado em recipiente plástico com colocação de detectores de traços no interior do recipiente para verificação da atividade de radônio.

Os detectores ficaram expostos por 22 dias à amostra de estalactite e, após este intervalo de tempo, o recipiente foi aberto e os detectores de traços foram avaliados (ver seção 5.2 e 5.3).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Fator de leitura de traços

Após a exposição dos cinco detectores CR-39 a fonte Pylon Model RN-150 que contém uma fonte sólida de ^{226}Ra que produz concentrações de radônio de 15,2 kBq/m^3, os detectores passaram por ataque químico apropriado e secagem para serem lidos.

Para cada detector foi determinado um "fator de leitura de traços", $F_{T,}$ usando o procedimento descrito em 4.5. A partir destes resultados, foi determinado um valor médio para o fator de leitura de traços e seu respectivo desvio padrão, igual a (48 ± 7).

Assim, este fator foi adotado como um método alternativo, relativamente simples e rápido para determinação da densidade total do detector.

6.2 Concentração de ^{222}Rn no ar das cavernas

As concentrações de radônio são apresentadas separadamente nas TAB. 10 e 12 de acordo com os períodos de colocação e troca de detectores nos pontos de monitoramento. Os resultados para precipitação total para a caverna Santana nos períodos aproximados aos das coletas são mostrados na TAB. 11 (Ferrari, 2010).

A TAB. 13 apresenta a média dos resultados de temperaturas máximas e mínimas medidas em algumas galerias da caverna Santana, e também na parte externa da caverna para dois períodos monitorados (Lobo, 2010).

Tabela 10 – Concentrações de radônio no ar das Cavernas do Vale do Ribeira.

		Concentração de Radônio (Bq/m^3)				
Caverna/Parque	**Galerias**	**28/4/09-25/9/09 150 dias**	**25/09/09-06/11/09 42 dias**	**06/11/09-28/01/10 83 dias**	**28/01/10-05/03/10 36 dias**	**05/03/10-10/06/10 97 dias**
Diabo/PEJ	**1**	-	776 ± 58	268 ± 20	545 ± 49	650 ± 18
Morro Preto/PETAR	**Camarote**	277 ± 23	447 ± 55	**132 ± 16**	363 ± 43	189 ± 20
Santana/PETAR	**Fafá**	898 ± 65	3771 ± 408	7214 ± 516	7116 ± 511	3604 ± 258
	Cristo	1039 ± 175	4245 ± 372	8699 ± 622	7479 ± 542	3599 ± 257
	Encontro	927 ± 67	3855 ± 304	**9456 ± 676**	6999 ± 504	3558 ± 254
	Entrada	228 ± 19	1324 ± 117	2892 ± 208	2823 ± 210	1047 ± 115
Colorida/PEI	**1**	-	377 ± 64	642 ± 49	860 ± 84	407 ± 34

Tabela 11 – Chuvas[1] na caverna Santana para o período aproximado de monitoramento da Tabela 1 (Ferrari, 2010).

Quantidade total de chuvas medidas no período		
27/11/09-27/01/09	**28/01/10-05/03/10**	**06/03/10-10/06/10**
650,4 mm	314,6 mm	371,2 mm

[1] Ferrari, J. A. (2010) A DINÂMICA DA DRENAGEM SUBTERRÂNEA NOS PLANALTOS CÁRSTICOS DO RIO BETARI, VALE DO RIBEIRA/SP Projeto de Pesquisa - FAPESP Proc. 2009/05115-5.

Tabela 12 – Concentrações de radônio no ar das galerias mais profundas da Caverna Santana (PETAR).

		Concentração de Radônio (Bq/m^3)		
Caverna/Núcleo	**Galerias**	**24/11/09-23/01/09 60 dias**	**23/01/10-19/03/10 55 dias**	**19/03/10-26/06/10 99 dias**
Santana/Santana	**Discos**	6384 ± 458	5747 ± 411	2763 ± 198
	Intermediária 11	6886 ± 496	6206 ± 444	**1879 ± 136**
	Intermediária 13	6438 ±462	6547 ± 469	2975 ± 213
	São Paulo	**8452 ± 604**	6734 ± 482	2607 ± 187

Tabela 13 – Medidas de temperatura[2] na caverna Santana.

	Média de Temperaturas (ºC) medidas na Caverna Santana						
Galeria	**Externa**	**Boca**	**Fafá**	**Cristo**	**Encontro (ar)**	**Discos**	**São Paulo**
Período	**24/11/09-15/12/09**	**24/11/09-23/01/10**	**24/11/09-18/01/10**	**24/11/09-13/12/09**	**24/11/09-18/01/10**	**13/12/09-23/01/10**	**24/11/09-23/01/10**
Temp. Máxima	25,9	21,7	19,4	19,3	18,2	19,3	17,5
Temp. Mínima	20,7	19,9	19,3	19,1	18,0	19,3	17,0
Período	**24/01/10-19/02/10**	**24/01/10-19/03/10**	**01/02/10-19/03/10**	**24/01/10-19/03/10**	**24/01/10-19/03/10**	**24/01/10-19/03/10**	**24/01/10-19/03/10**
Temp. Máxima	26,8	22,0	19,6	19,6	18,7	19,5	17,2
Temp. Mínima	21,6	19,8	19,5	19,5	18,6	19,5	17,7

[2] LOBO, H.A.S. **Dinâmica atmosférica subterrânea na determinação da capacidade de carga turística (Caverna de Santana, Iporanga-SP)**. Relatório de qualificação de doutorado (Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, p.311, 2010.

Analisando a TAB. 10, observamos que os menores valores de concentrações de radônio foram obtidos para o primeiro período de medida, sendo este o maior período de exposição para os monitores (150 dias), exceto para a galeria Camarote da caverna Morro Preto, que apresentou menor concentração de radônio no terceiro período de monitoramento. É um período que abrange parte do outono, inverno e início de primavera, caracterizado por baixas temperaturas. O segundo período de monitoramento (exposição de 43 dias) que compreende a primavera ocorre elevação nos resultados das concentrações, caracterizado também por leve elevação de temperatura (FIG. 29). O terceiro período com exposição dos detectores de 83 dias compreende o verão, e apresenta os maiores resultados de concentração de radônio para a caverna Santana, e menor valor para a galeria Camarote da caverna Morro Preto. Houve decréscimo nos níveis para a Caverna do Diabo, e elevação da concentração para a Caverna Colorida, caracterizado por período que engloba o verão e apresentou a maior quantidade de chuvas no período (TAB. 11) e (FIG. 27 e 28). A diminuição dos níveis de radônio volta a ocorrer para as cavernas do Diabo, Morro Preto, Colorida e também para a caverna Santana no quarto período (detectores expostos por 36 dias). O período considerado compreende o verão e há uma diminuição na quantidade de chuvas de acordo como mostrado nas FIG. 27 e 28.

Os resultados do quinto e último período monitorado (97 dias de exposição) apresentaram leve acréscimo da concentração de radônio para a Caverna do Diabo, e decréscimo significativo dos níveis de radônio em relação ao período anterior, período que abrange o outono, caracterizado pela diminuição da quantidade de chuvas e temperatura.

Os resultados da TAB. 12 representam o monitoramento nas galerias mais profundas da Caverna Santana. Neste caso, é observado que para o primeiro período de exposição (60 dias), que corresponde praticamente ao terceiro período de monitoramento da TAB. 10, também foram obtidos os maiores níveis de radônio. O segundo período com exposição dos detectores de 55 dias, ou seja, praticamente mesmo tempo de exposição do período anterior, ocorre leve diminuição nos níveis de radônio, exceto para a galeria São Paulo que apresenta diminuição acentuada. E finalmente, no terceiro período (99 dias de exposição), ocorreu diminuição significativa com relação aos períodos anteriores.

Os resultados de temperatura medidas nas galerias da caverna Santana mostrados na TAB. 13, englobam apenas dois períodos de monitoramento (primavera e verão). As FIG. 25 e 26 ilustram como a temperatura pode variar entre a entrada e as galerias mais profundas. As medidas indicam diminuição de temperatura para galerias mais

profundas. Quando esses valores são analisados em conjunto com os resultados de concentração de radônio para a caverna Santana (TAB. 10 e 12) verifica-se ocorrência de aumento das concentrações a medida que o ponto monitorado se distancia da entrada.

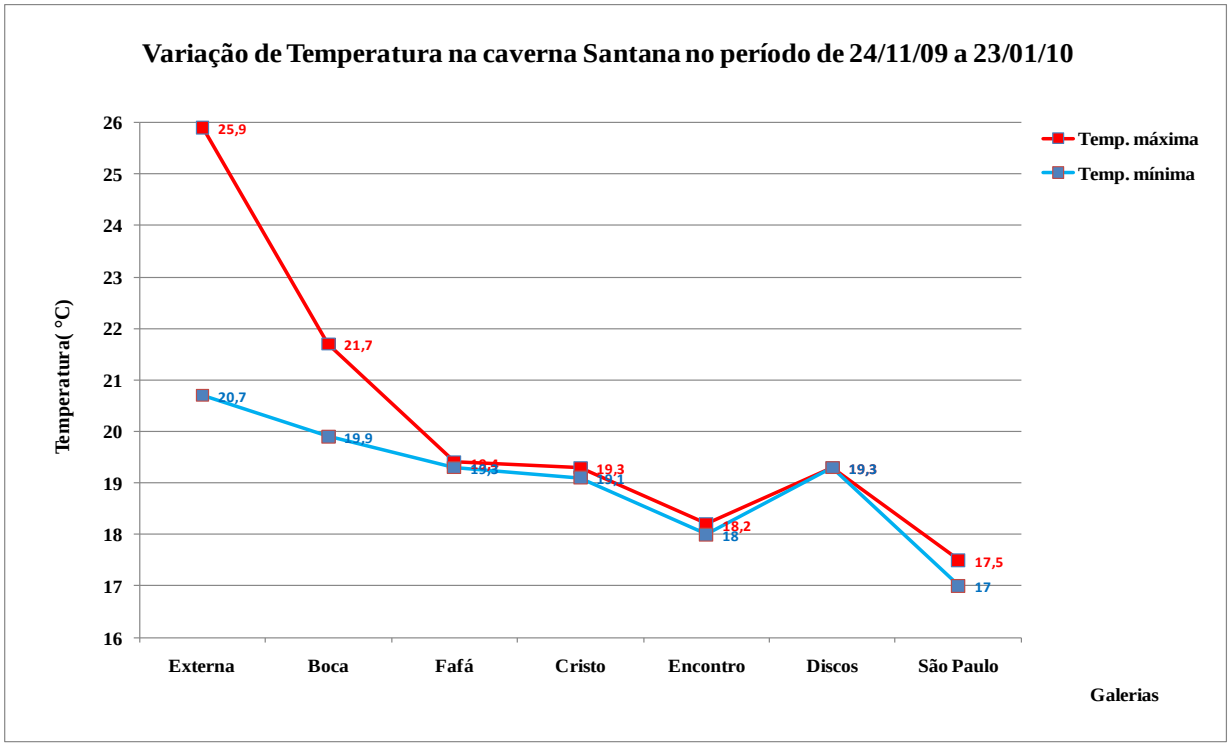

FIGURA 25 – Medidas de temperatura nas galerias da caverna Santana (PETAR).

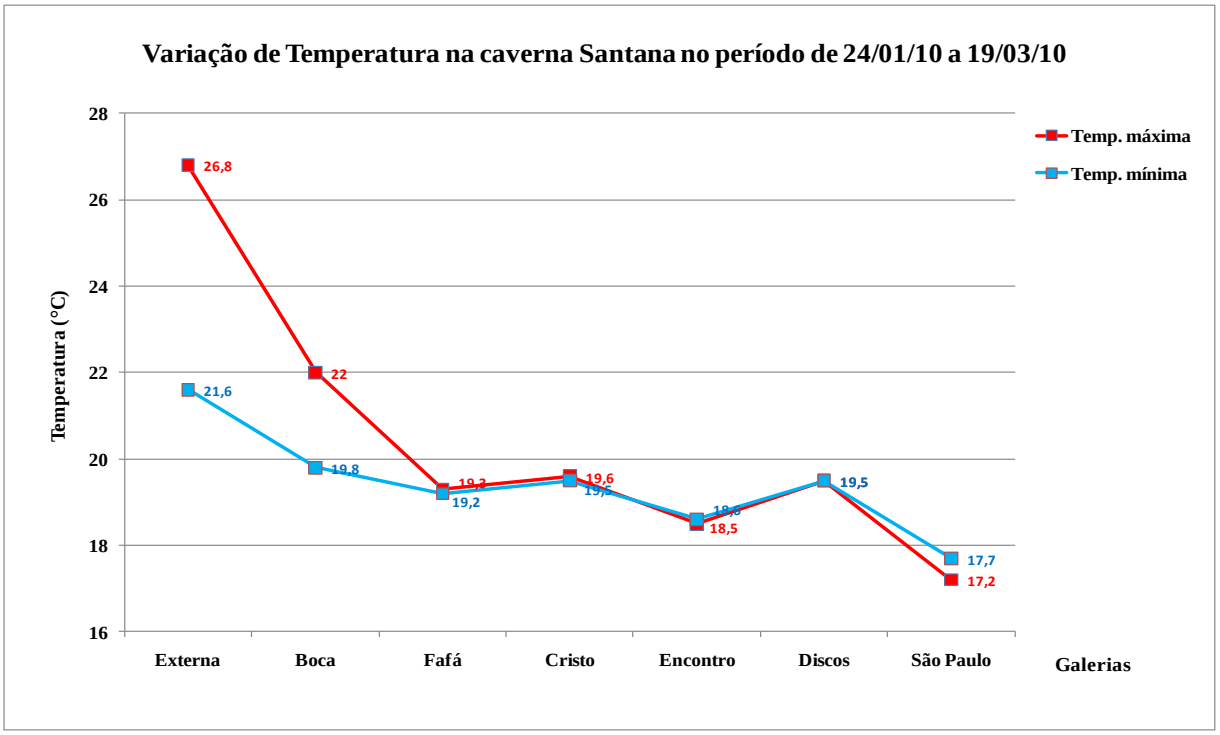

FIGURA 26 – Medidas de temperatura nas galerias da caverna Santana (PETAR).

Os resultados obtidos do banco de dados do CIIAGRO para precipitação nas cidades da região demarcada são apresenta na FIG. 27.

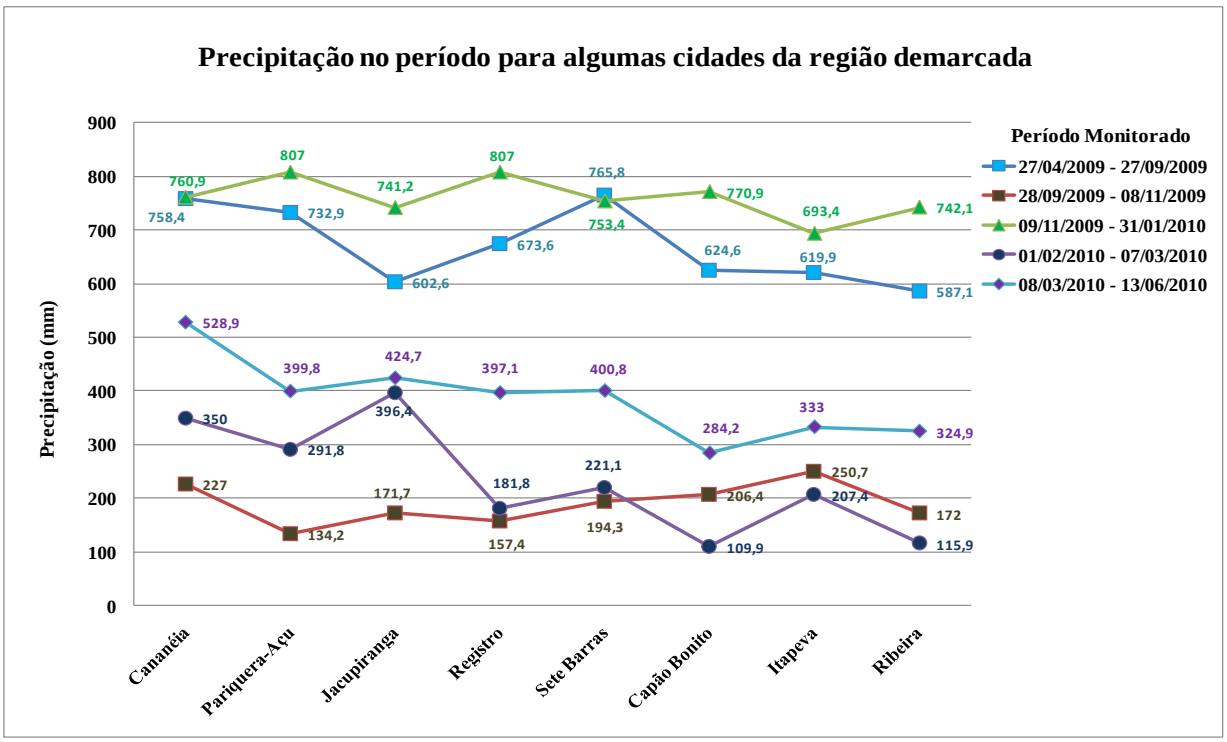

FIGURA 27 – Precipitação obtida para oito cidades da região demarcada (CIAGRO, 2010).

A FIG. 28 apresenta a variação da chuva no período e também a quantidade de chuva medida na caverna Santana (três últimos períodos), mostrando consonância entre os resultados.

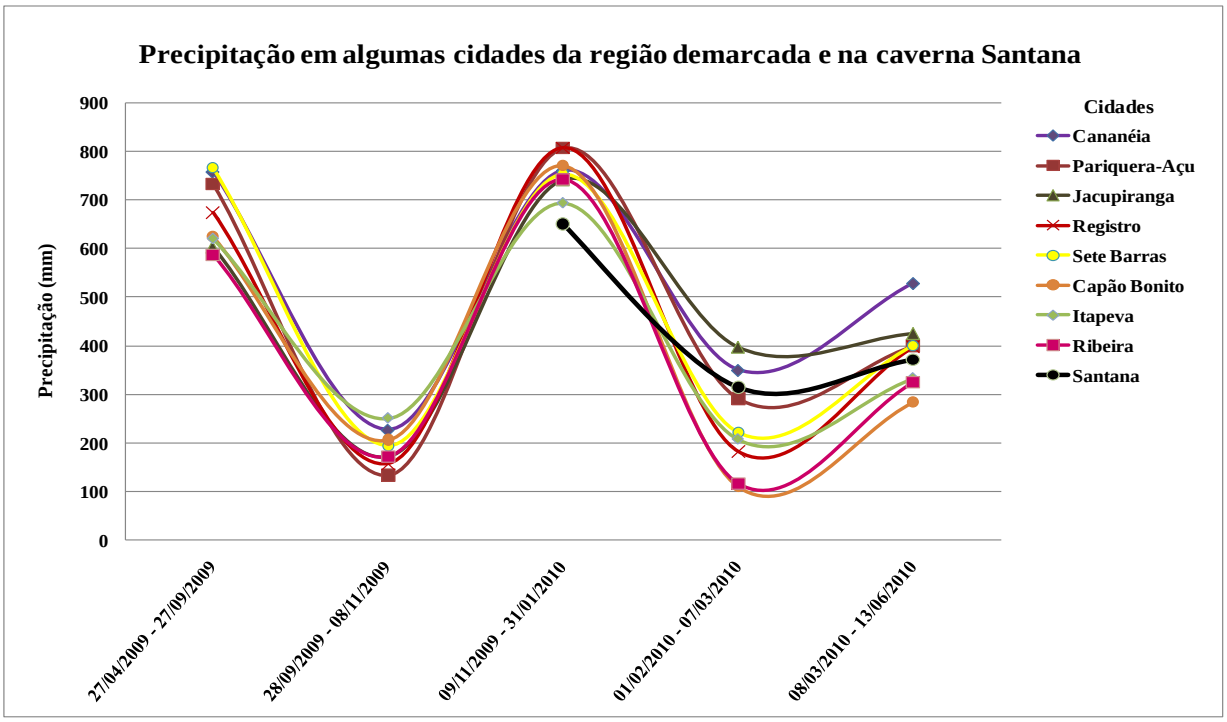

FIGURA 28 – Variação das chuvas no período para as cidades da região demarcada.

Nas FIG. 29 e 30 é mostrada a variação de temperaturas medidas na região demarcada.

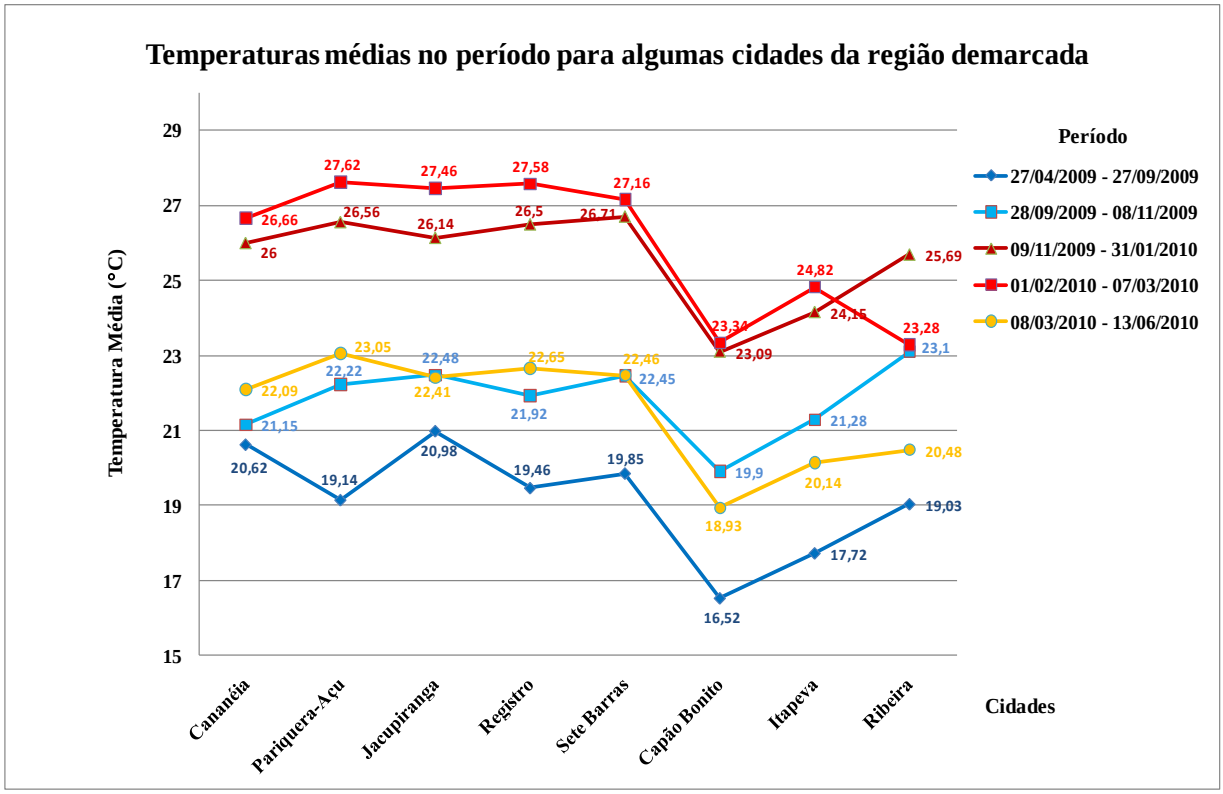

FIGURA 29 – Temperaturas médias obtidas para oito cidades da região demarcada (CIIAGRO, 2010).

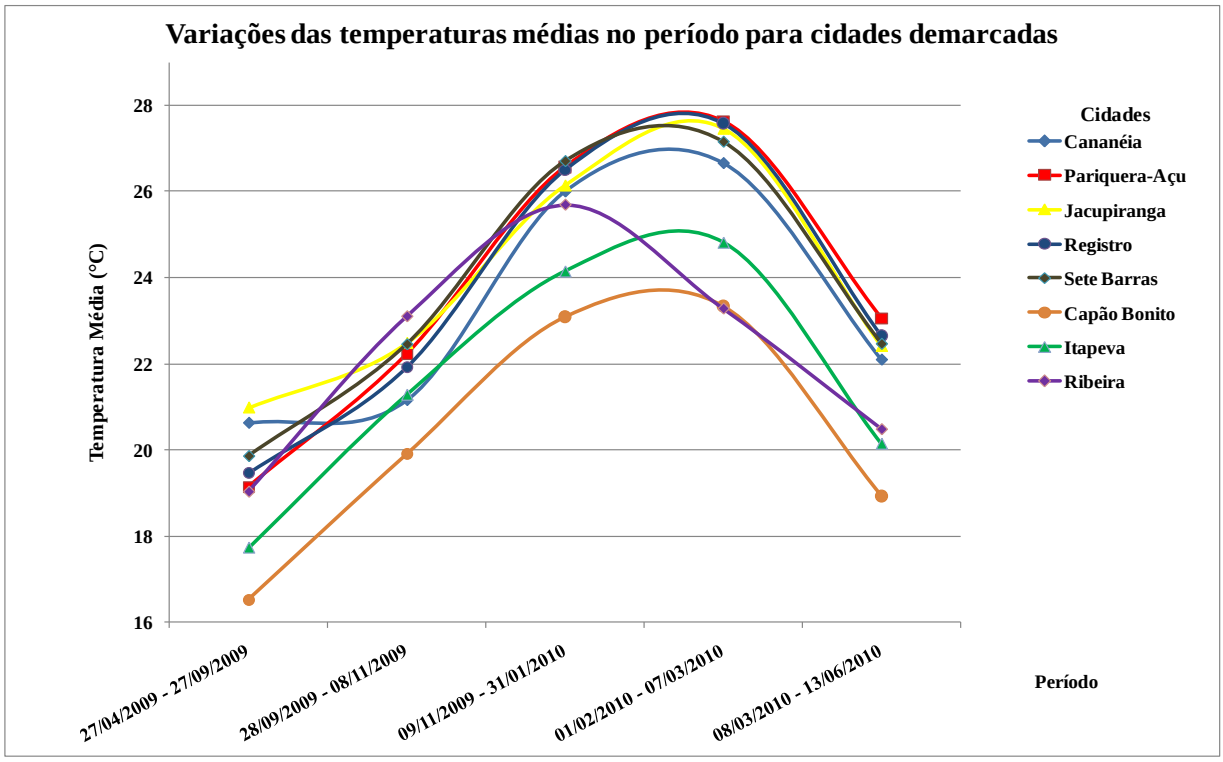

FIGURA 30 – Variação de temperatura para oito cidades da região demarcada (CIIAGRO, 2010).

Como os resultados da FIG. 28 mostraram consonância entre os resultados de precipitação na região e resultados de precipitação obtida na caverna Santana, optou-se pela utilização de um valor médio entre a precipitação total medida para cada período de monitoramento nas cidades demarcadas. A FIG. 31 apresenta os resultados para concentração de radônio na caverna Santana e a precipitação média da região.

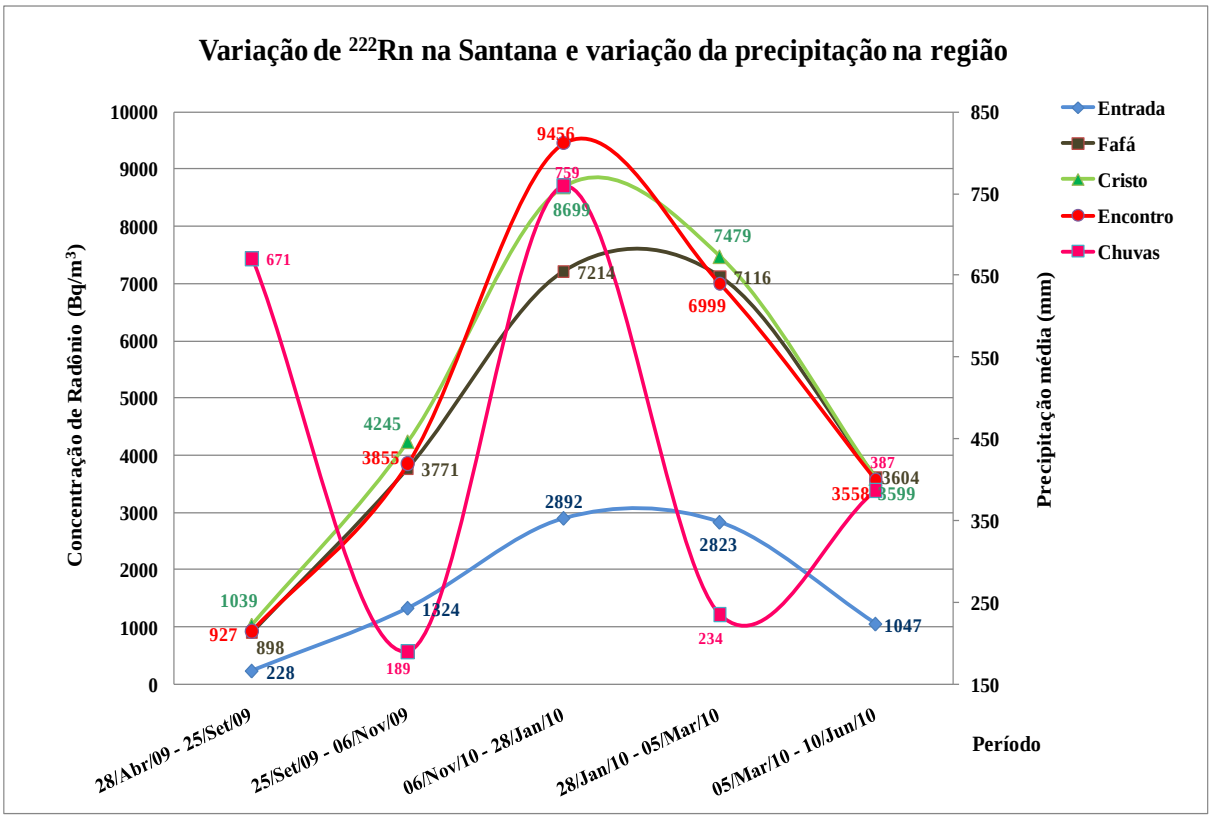

FIGURA 31 – ^{222}Rn nas galerias mais próximas da entrada da caverna Santana (PETAR) e precipitação média na região.

Da mesma forma com o observado na FIG. 30, será utilizada a temperatura média da região demarcada.

A FIG. 32 apresenta a concentração de radônio na Santana associada a temperatura média da região. Para os resultados de concentrações de radônio obtidos em galerias mais profundas da caverna Santana foi feito o mesmo como é mostrado nas FIG. 33 e 34 com precipitação e temperatura média na região demarcada.

O mesmo foi feito para o restante das cavernas monitoradas, assim nas FIG. 35 e 36 é mostrada a variação da concentração de radônio e precipitações e temperaturas médias na região demarcada para a caverna Morro Preto, respectivamente, para a caverna do Diabo é apresentado nas FIG. 37 e 38, e finalmente, para a caverna Colorida é apresentado nas FIG. 39 e 40.

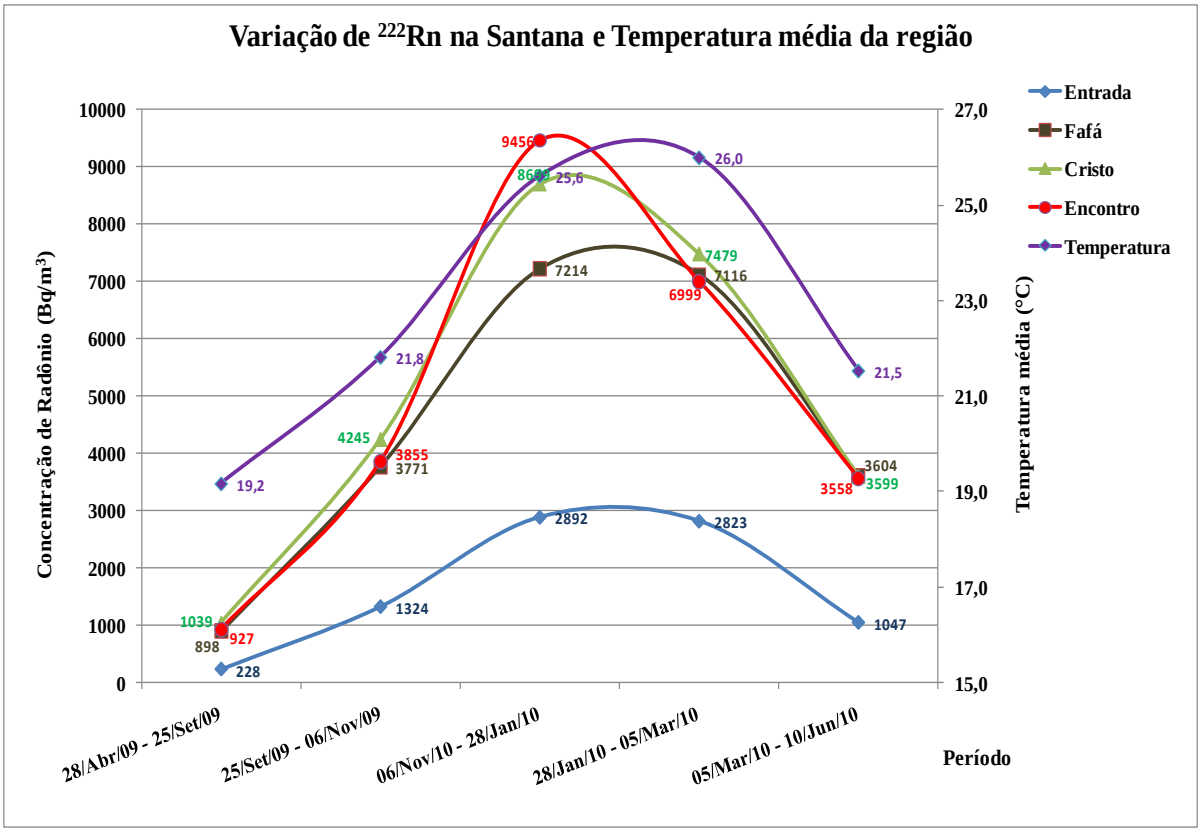

FIGURA 32 – ^{222}Rn nas galerias mais próximas da entrada da caverna Santana (PETAR) e temperatura média na região.

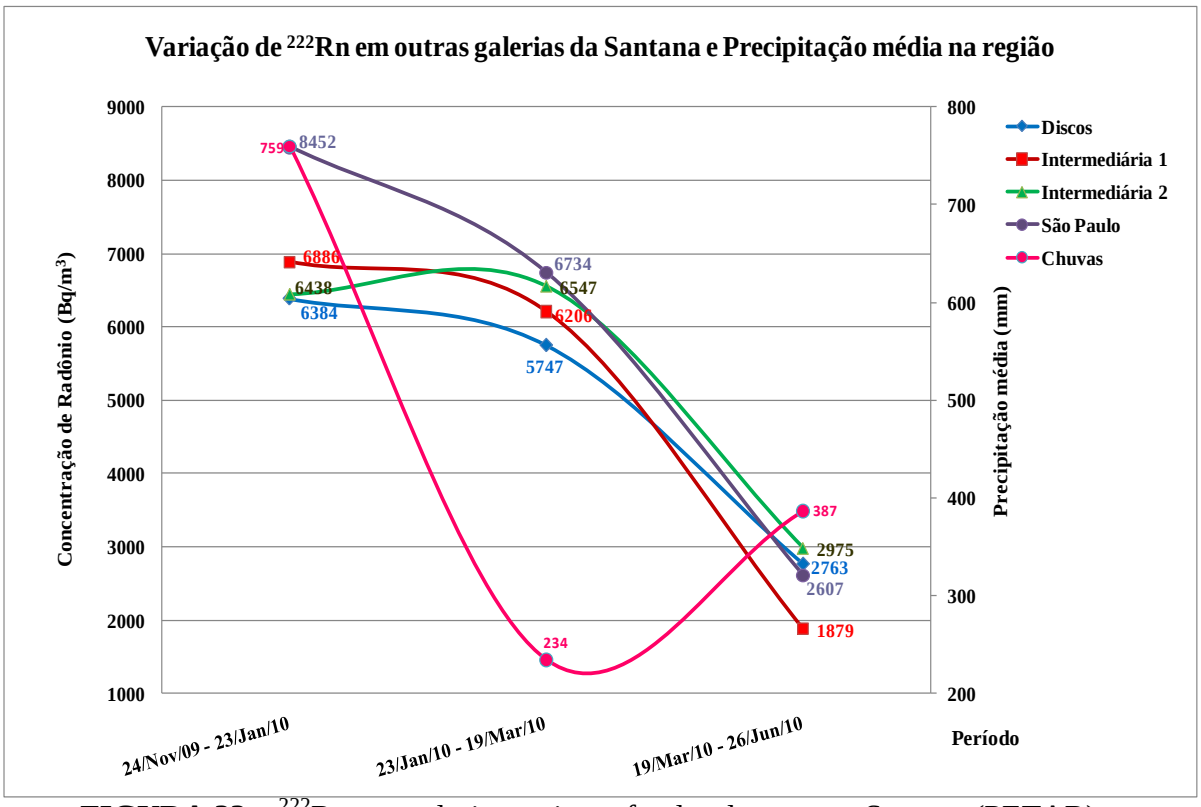

FIGURA 33 – ^{222}Rn nas galerias mais profundas da caverna Santana (PETAR) e precipitação média na região.

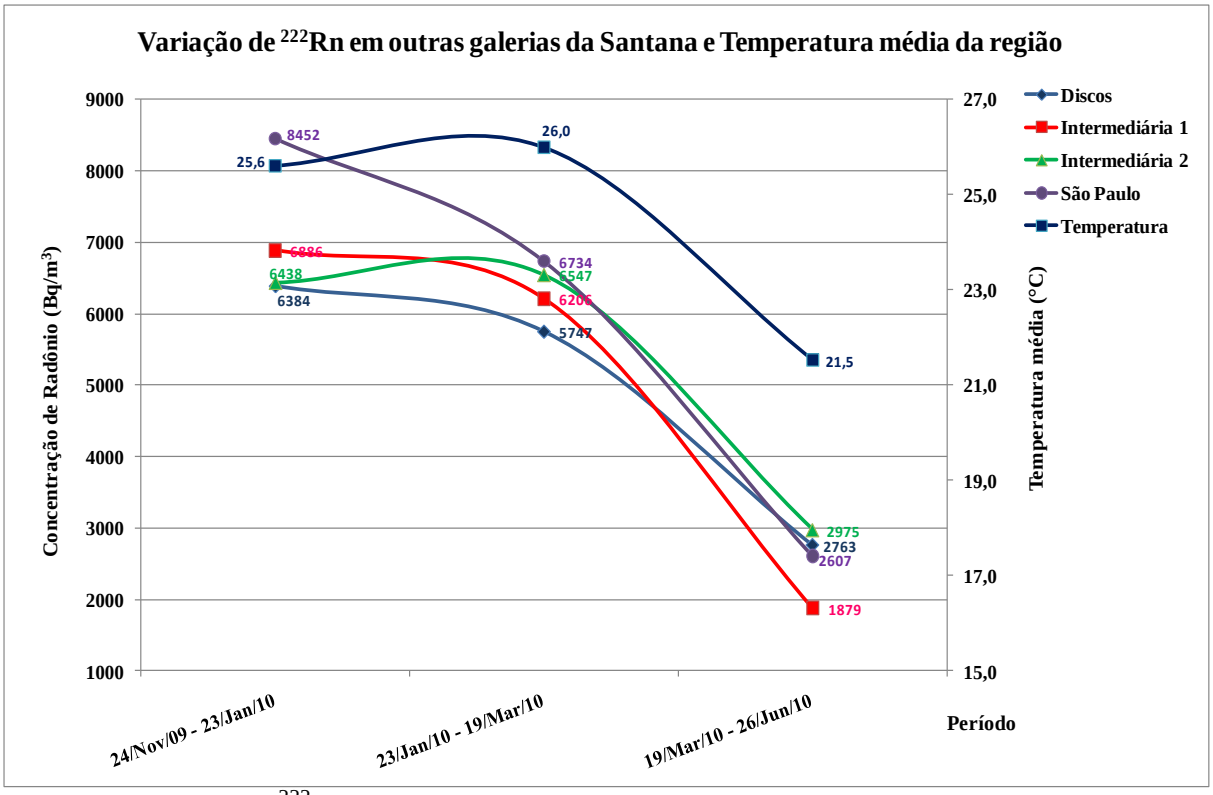

FIGURA 34 – ^{222}Rn nas galerias mais profundas da caverna Santana (PETAR) e temperatura média na região.

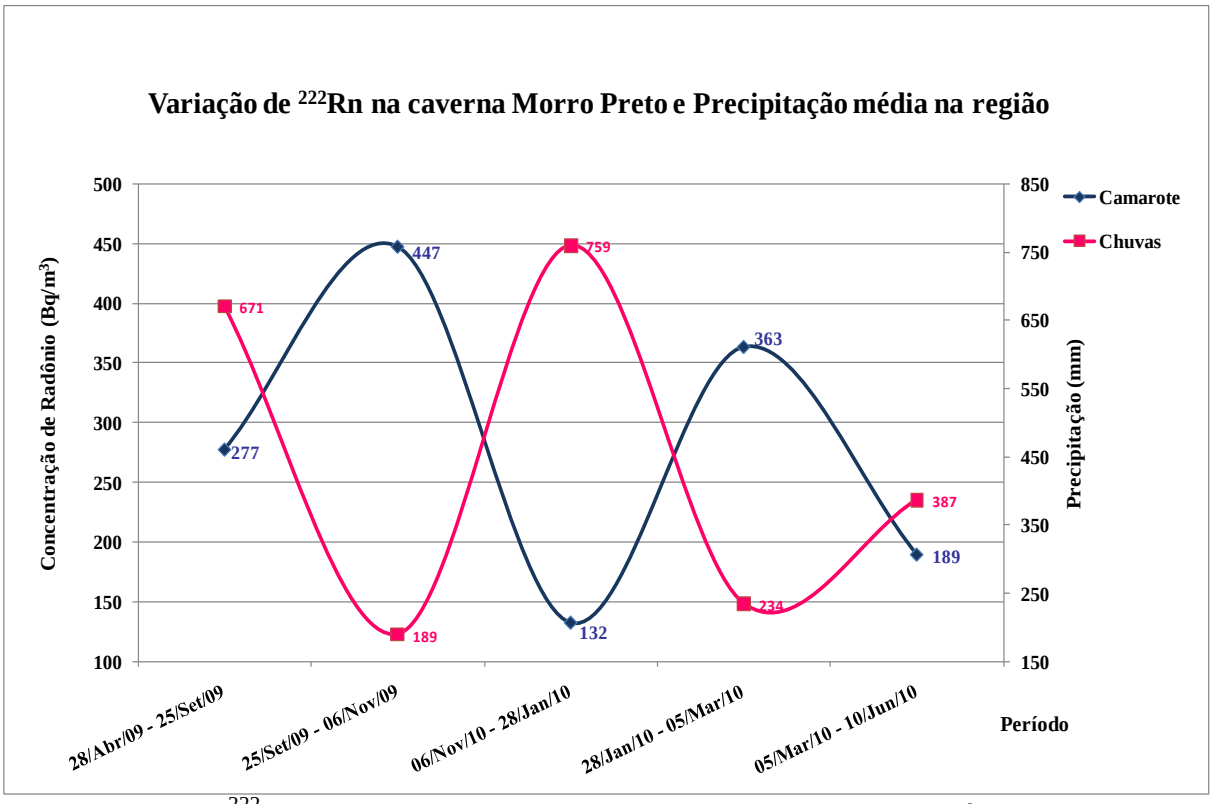

FIGURA 35 – ^{222}Rn na caverna Morro Preto (PETAR) e precipitação média na região.

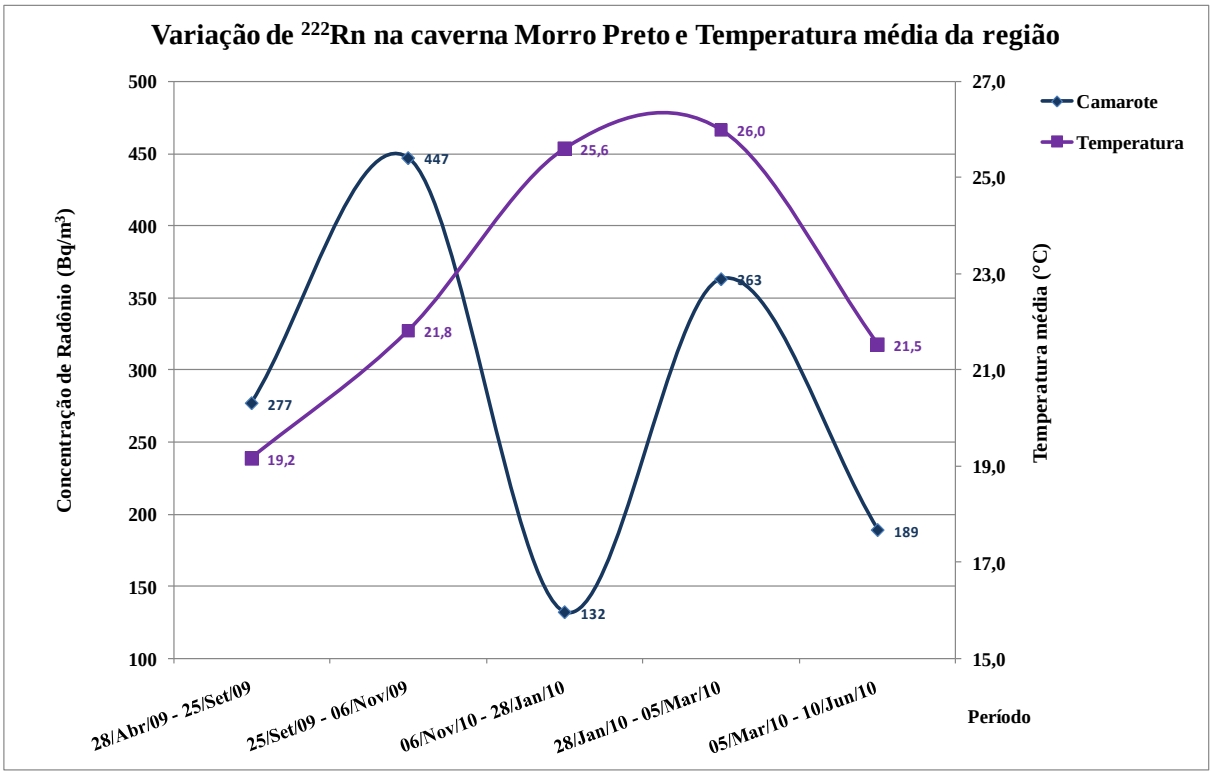

FIGURA 36 – ^{222}Rn na caverna Morro Preto (PETAR) e temperatura média na região.

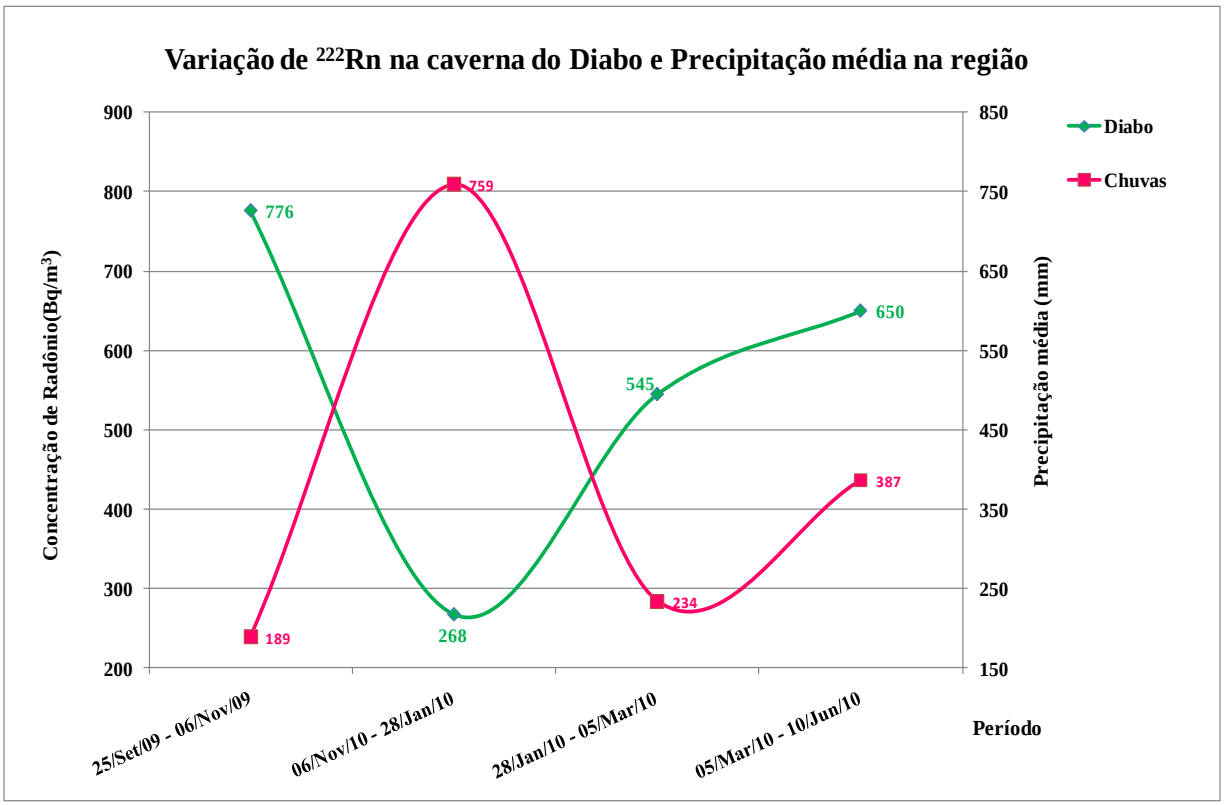

FIGURA 37 – ^{222}Rn na caverna do Diabo (PEJ) e precipitação média na região.

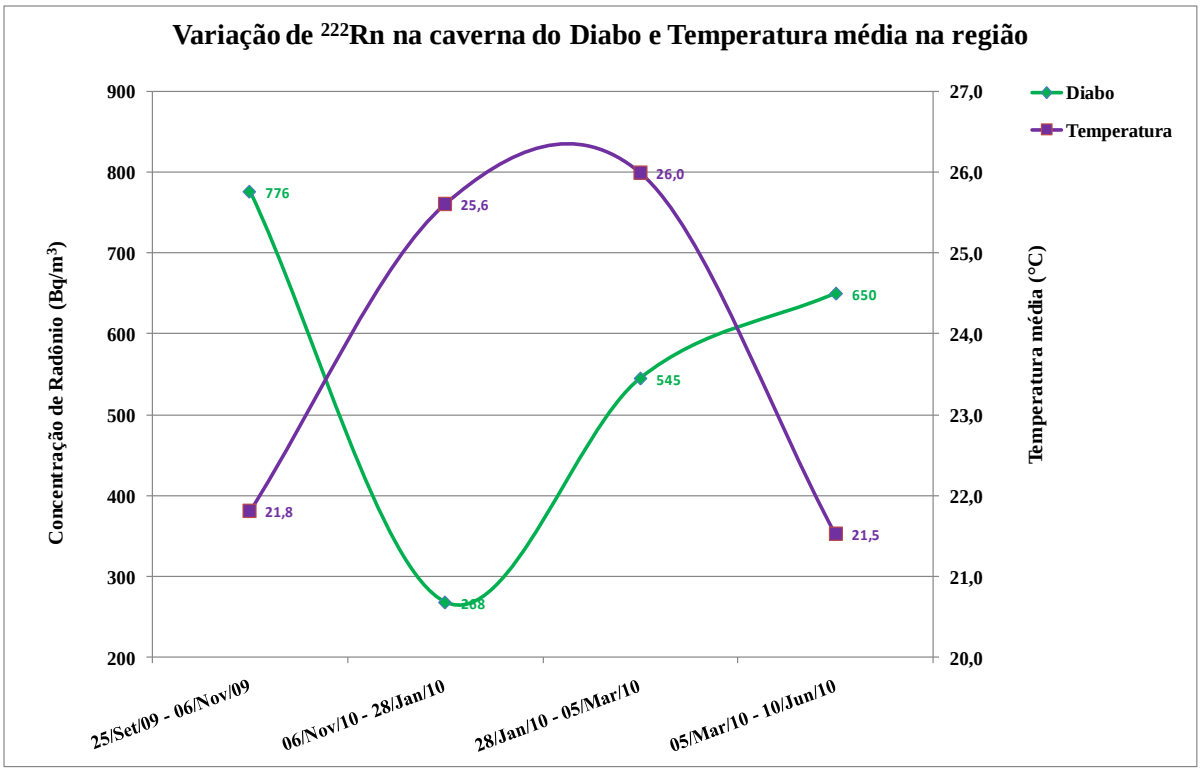

FIGURA 38 – ^{222}Rn na caverna do Diabo (PEJ) e temperatura média na região.

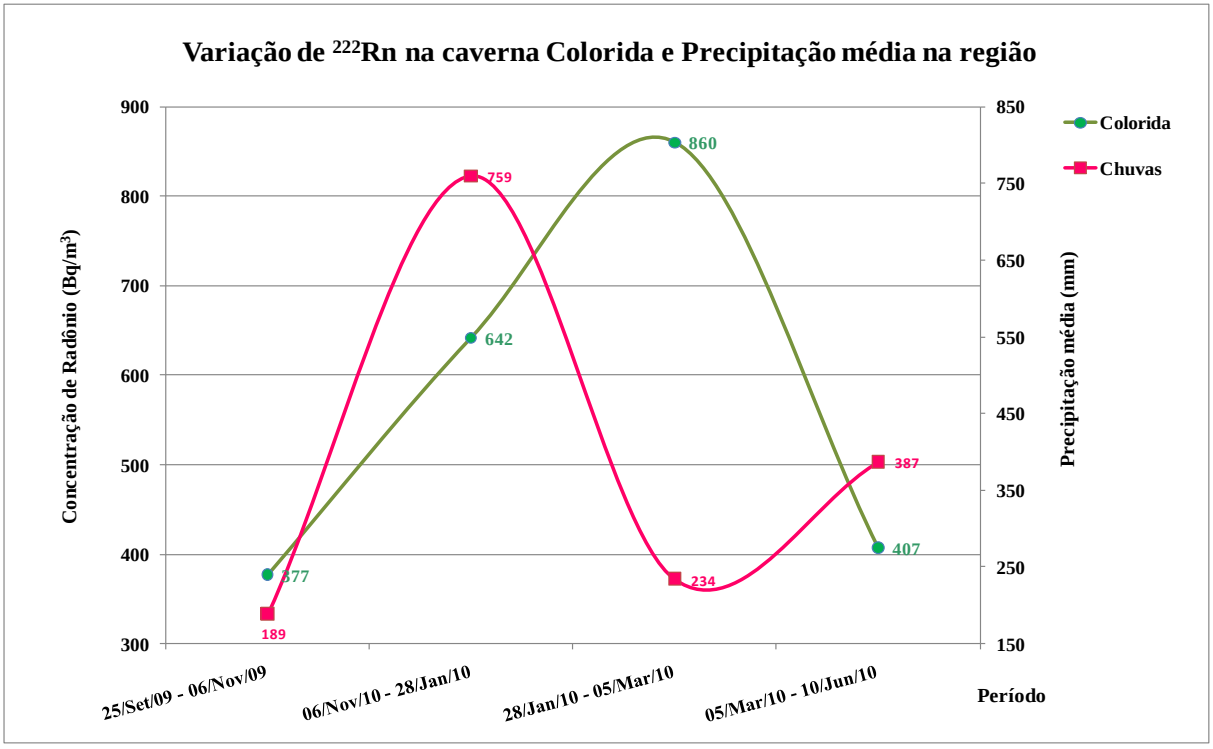

FIGURA 39 – ^{222}Rn na caverna Colorida (PEI) e precipitação média na região.

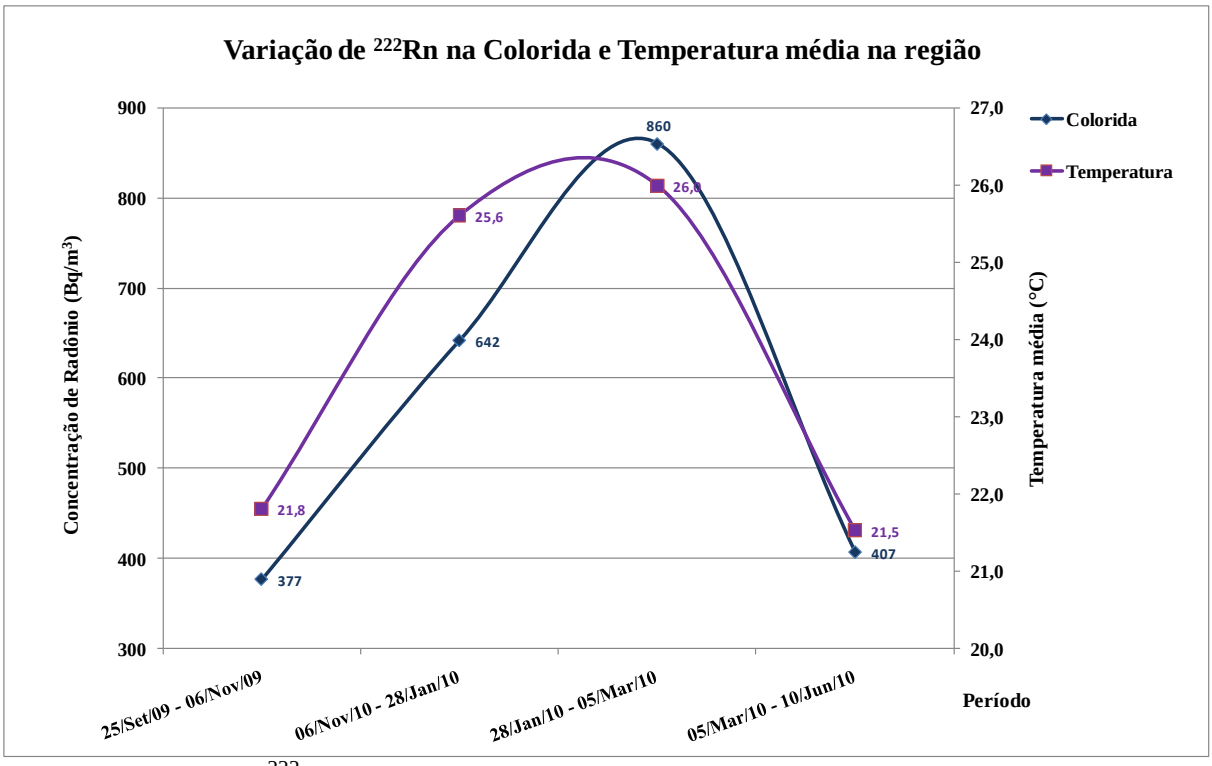

FIGURA 40 – ^{222}Rn na caverna Colorida (PEI) e temperatura média na região.

Para a caverna Santana (entrada, salões Fafá, Cristo e Encontro) conforme observado nas FIG. 31 e 32 verifica-se que os menores níveis de radônio são obtidos no primeiro período marcado por quantidade elevada de chuva e baixas temperaturas, com o aumento da temperatura é observado também elevação nas concentrações de radônio. Os maiores níveis de concentração coincidem com a alta nas quantidades de chuvas e alta nas temperaturas, no período seguinte a temperatura manteve-se constante, contudo o decréscimo nos níveis ocorre juntamente com a diminuição nas chuvas e para o último período a diminuição nos níveis continua sendo observada marcada por diminuição nas temperaturas e baixa na quantidade de chuva. Analisando as figuras fica evidente a dependência direta entre temperatura e concentrações de radônio no ar.

Para as galerias mais profundas (salões Discos, São Paulo e os pontos intermediários) a exposição dos detectores de radônio foi realizada apenas para os três últimos períodos, mesmo assim é possível observar comportamento análogo ao obtido para as demais galerias, e também os maiores níveis são obtidos quando ocorre aumento na quantidade de chuva e elevação nas temperaturas conforme FIG. 33 e 34, e no período seguinte houve diminuição nas concentrações, embora a temperatura média praticamente

tenha se mantido constante, ocorreu uma brusca queda na quantidade de chuvas e os menores níveis de radônio ocorrem no último período com diminuição na temperatura e baixa quantidade de chuva durante o período. O comportamento é análogo ao obtido para os 3 últimos períodos observados para outras galerias da Santana (FIG. 32).

Na caverna Morro Preto o comportamento é totalmente diferente daquele observado até aqui, pois de acordo com a FIG. 35 as maiores concentrações ocorrem quando há diminuição na quantidade de chuvas, o menor nível de radônio foi obtido no período de maior quantidade de chuva na região, já a FIG. 36 que relaciona as concentrações do gás com a temperatura, não ocorre um comportamento tão bem definido, para o primeiro e último período de monitoramento observamos concentrações menores de radônio e baixas temperaturas, entretanto, a menor concentração é observada no terceiro período caracterizado por temperaturas elevadas (primavera/verão), e para o quarto período a elevação nos níveis é retomada, caracterizada por altas temperaturas e baixa na quantidade de chuvas. Assim, há uma dependência inversamente proporcional entre radônio no ar e chuvas, e as variações de radônio parecem sofrer pouca influência da temperatura externa.

Para a caverna do Diabo parece ocorrer comportamento análogo ao observado na caverna Morro Preto, na FIG. 37 observa-se oposição entre aumento e diminuição nos níveis de radônio e aumento e diminuição na quantidade de chuva. Com relação às concentrações de radônio e a temperatura média na região (FIG. 38), o maior valor para concentração de radônio foi obtido no primeiro período com baixa na temperatura e a menor concentração do gás foi observada em período de temperatura elevada, porém maior quantidade de chuvas. A elevação nas concentrações de radônio é retomada com a diminuição na quantidade de chuvas, embora a temperatura continue elevada, no último período a elevação nas concentrações é mantida, ocorre aumento na quantidade de chuvas, porém agora o que diminui é a temperatura. Neste caso os níveis de radônio no ar se mostraram inversamente proporcionais à quantidade de chuva e temperatura.

Na caverna Colorida a menor concentração de radônio foi observada no primeiro período coincidindo com menor precipitação e baixa nas temperaturas (FIG. 39 e 40), para o período seguinte a concentração do gás aumenta, ocorre elevação na temperatura e é observado um máximo na quantidade de chuvas para a região. O maior nível de radônio é observado no terceiro período caracterizado por um mínimo na quantidade de chuvas e temperatura elevada, e finalmente para o último período ocorre

queda acentuada na concentração de radônio, a temperatura também diminui e a quantidade de chuva retorna elevação.

6.3 Concentração dos isótopos de rádio de meias-vidas longas, ^{226}Ra e ^{228}Ra em amostras de água subterrânea e água de superfície

As concentrações de atividade de ^{226}Ra, ^{228}Ra e as razões de atividade ^{228}Ra/^{226}Ra, são apresentadas nas TAB. 14 e 15 para coletas realizadas em abril e novembro de 2009 no núcleo Santana, e TAB. 16 para coletas em setembro de 2009 e núcleo Caboclos.

Nas TAB. 17 e 18 são apresentados as concentrações de atividades e as razões de atividade ^{228}Ra/^{226}Ra para amostras recolhidas ao longo da SP-250 nos núcleos Areado e Bulha d'água em outubro de 2009.

TABELA 14 – Concentrações de atividade dos isótopos naturais de rádio em amostras coletadas no núcleo Santana, PETAR (Abril de 2009).

Origem da Amostra	^{226}Ra (mBq/L)	^{228}Ra (mBq/L)	Razão de Atividade ^{228}Ra/^{226}Ra
Caverna Santana	1,2 ± 0,1	21,9 ± 0,2	18,2
Caverna Água Suja	**2,1 ± 0,1**	**50,5 ± 5,0**	**24,0**
Cachoeira do Couto	1,3 ± 0,1	16,3 ± 0,4	12,5
Caverna Alambari de Baixo	1,2 ± 0,4	18,4 ± 2,0	15,3
Fonte na Estrada	1,3 ± 0,2	19,1 ± 2,0	14,7
Furnas	1,6 ± 0,7	17,7 ± 1,0	11,0
Água Potável – Núcleo Santana	1,2 ± 0,1	19,1 ± 0,2	15,9

TABELA 15 – Concentrações de atividade dos isótopos naturais de rádio em amostras coletadas no núcleo Santana, PETAR (Novembro de 2009).

Origem da Amostra	^{226}Ra (mBq/L)	^{228}Ra (mBq/L)	Razão de Atividade ^{228}Ra/^{226}Ra
Caverna Santana	0,17	0,60	3,5
Caverna Água Suja	0,06	0,76	**12,7**
Cachoeira do Couto	0,06	0,74	12,3
Caverna Alambari de Baixo	0,06	0,71	11,8
Água Potável – Núcleo	0,09	0,66	7,3

TABELA 16 – Concentrações de atividade dos isótopos naturais de rádio em amostras coletadas no núcleo Caboclos, PETAR (Setembro de 2009).

Origem da Amostra	^{226}Ra (mBq/L)	^{228}Ra (mBq/L)	Razão de Atividade ^{228}Ra/ ^{226}Ra
Trilha Casa de Pedra	5,4 ± 0,1	39,9 ± 2,1	7,4
Trilha Casa de Pedra (Venda do Betão)	3,3 ± 0,2	43,1± 0,8	13,1
Trilha Casa de Pedra (Depois do desmoronamento de calcário)	4,8 ± 0,2	52,4 ± 0,9	10,9
Rio do Chapéu (Próximo a igrejinha)	5,7 ± 0,5	45,9 ± 0,5	8,1
Gruta Chapéu Mirim I	6,3 ± 0,1	46,1 ± 2,0	7,3
Rio Iporanga	3,3 ± 0,3	44,7 ± 0,5	13,5
Rio ao lado da mina de chumbo Mina Espírito Santo	5,6 ± 0,2	50,6 ± 0,9	9,0
Rio do Chapéu (Garganta do Diabo, ao lado da mina de calcário)	5,1 ± 0,3	78,9 ± 2,3	**15,5**
Casa início da trilha (Rio da Montanha da Dúvida)	5,2 ± 0,2	56,1 ± 2,1	10,8
Rio Pescaria	3,8 ± 0,4	43,2 ± 0,4	11,4
Gruta do Chapéu	4,9 ± 0,1	44,8 ± 0,8	9,1
Caverna das Aranhas	5,2 ± 0,2	62,0 ± 0,5	11,9

TABELA 17 – Concentrações de atividade dos isótopos naturais de rádio em amostras coletadas no núcleo Areado, PETAR (Outubro de 2009).

Origem da Amostra	^{226}Ra (mBq/L)	^{228}Ra (mBq/L)	Razão de Atividade ^{228}Ra/ ^{226}Ra
Ponto A1	6,8 ± 0,2	52,2 ± 0,8	7,7
Ponto A2	3,2 ± 0,1	46,2 ± 1,9	**14,2**
Ponto A3	3,8 ± 0,4	42,6 ± 0,5	11,2
Ponto A4	3,4 ± 0,2	42,9 ± 0,9	12,6

TABELA 18 – Concentrações de atividade dos isótopos naturais de rádio em amostras coletadas no núcleo Bulha d'água, PETAR (Outubro de 2009).

Origem da Amostra	^{226}Ra (mBq/L)	^{228}Ra (mBq/L)	Razão de Atividade ^{228}Ra/ ^{226}Ra
Ponto B1	2,5 ± 0,2	40,8 ± 0,9	**14,9**
Ponto B2	4,1 ± 0,5	45,4 ± 1,3	11,1
Ponto B3	3,1 ± 0,2	40,9 ± 0,7	13,1
Ponto B4	10,8 ± 0,7	42,5 ± 0,8	3,9
Ponto B5	3,8 ± 0,2	39,7 ± 1,2	10,5

Nas águas coletadas nas cavernas em Abril de 2009 observa-se da TAB.14, que concentração média de ^{226}Ra foi de 1,4 ± 0,3 mBq/L. As concentrações de ^{228}Ra variaram de 16 a 51 mBq/L. As maiores concentrações de ^{226}Ra, ^{228}Ra e da razão de atividade ^{228}Ra/^{226}Ra foram observadas nas águas da Caverna Água Suja.

Em Novembro de 2009, as concentrações de atividade de ^{226}Ra e ^{228}Ra determinadas no Núcleo Santana apresentaram-se ligeiramente menores (TAB. 15), mas as razões de atividade ^{228}Ra/^{226}Ra se mantiveram concordantes com a grande maioria dos outros resultados obtidos no Petar (TAB. 16 a 18).

Nas águas de superfície coletadas no Núcleo Caboclos, em Setembro de 2009, as concentrações de ^{226}Ra variaram de 3,3 a 6,3 mBq/L, enquanto que as de ^{228}Ra estiveram entre 40 e 79 mBq/L. A maior concentração de ^{226}Ra foi observada no ponto localizado na Gruta do Chapéu Mirim. O maior valor de ^{228}Ra e da razão de atividade ^{228}Ra/^{226}Ra foram observados nas águas do ponto Rio do Chapéu, ao lado de uma mina de calcário (TAB.16).

No Núcleo Areado, as amostras foram coletadas em Outubro de 2009. As concentrações de ^{226}Ra variaram de 3,2 a 6,8 mBq/L, enquanto que as de ^{228}Ra estiveram entre 43 e 52 mBq/L. As maiores concentrações de ^{226}Ra e de ^{228}Ra foram observadas no ponto A1. O maior valor de razão de atividade ^{228}Ra/^{226}Ra foi obtido nas águas do ponto A2 (TAB.17).

As concentrações de ^{226}Ra variaram de 2,5 a 11 mBq/L nas águas estudadas no Núcleo Bulha D'água em Outubro de 2009, enquanto que as de ^{228}Ra estiveram entre 40 e 45 mBq/L. As maiores concentrações de ^{226}Ra e de razão de atividade ^{228}Ra/ ^{226}Ra foram obtidas nos ponto B4 e B1, respectivamente (TAB.18).

Em Novembro de 2009, as concentrações de atividade de ^{226}Ra e ^{228}Ra determinadas no Núcleo Santana e no Núcleo Ouro Grosso apresentaram-se ligeiramente menores, mas as razões de atividade ^{228}Ra/^{226}Ra se mantiveram concordantes com a grande maioria dos outros resultados obtidos no Petar. Isto é um indicativo de provável diluição das águas estudadas em função da intensidade aumentada de chuvas. No caso da distribuição destes radionuclídeos naturais, em um dado ambiente natural, não impactado por atividades tecnológicas, em geral a distribuição das razões de atividade se mantém dentro de um intervalo conhecido, com pequenas variações.

6.4 Concentração de ^{222}Rn na amostra da estalactite da caverna Santana

A concentração de ^{222}Rn obtida da visualização e quantificação dos traços observados nos detectores expostos a estalactite em recipiente fechado foi:

$$C_{Rn} = 11{,}3 \pm 0{,}7 \text{ kBq/m}^3.$$

O valor é da mesma ordem de grandeza aos resultados obtidos para as galerias que apresentam os maiores níveis de radônio (TAB. 10 e 12).

6.5 Equilíbrio Radioativo entre ^{222}Rn e seus descendentes no monitor NRPB

A visualização de alguns detectores inicialmente apresentou diferenças entre os mesmos e a medida dos diâmetros de alguns traços selecionados apresentou de uma maneira geral três valores distintos correspondentes a 50μm, 57μm e 78μm que possivelmente correspondem às energias de 5,49 MeV do ^{222}Rn, 6,00 MeV do ^{218}Po e 7,7 MeV do ^{214}Po respectivamente. As medidas destes três diâmetros foram classificadas em P, M e G. Para medidas optou-se por visualização de detectores que apresentaram menores concentrações de radônio, por apresentarem menor densidade de traços. A TAB. 19 apresenta a quantidades de traços medidas nos detectores.

Os resultados sugerem que a discriminação dos radionuclídeos é possível. A identificação dos radionuclídeos para detectores com altas densidades de traços, torna-se muito trabalhoso. Entretanto, a técnica poderia ser aplicada e possivelmente utilizada para avaliações em residências ou outros locais que apresentem baixos níveis de radiação.

TABELA 19 – Quantidade de traços de acordo com a classificação dos diâmetros para alguns detectores expostos nas cavernas e incerteza associada (raiz quadrada das contagens).

Cavernas	P(^{222}Rn)	M(^{218}Po)	G(^{214}Po)
Diabo (25/09/09- 05/11/09)	1192 ± 35	630 ± 25	370 ± 19
Diabo (06/11/09-28/01/10)	751 ± 27	380 ± 19	359 ± 19
Diabo (29/01/10-05/03/10)	680 ± 26	405 ± 20	270 ± 16
Diabo (06/03/10 – 10/06/10)	150 ± 12	117 ± 11	62 ± 8
MP (28/04/09 – 25/09/09)	1458 ± 38	893 ± 30	449 ± 21
MP (06/11/09 – 28/01/10)	315 ± 18	211 ± 14	208 ± 14
MP (29/01/10 -05/03/10)	460 ± 21	327 ± 18	116 ± 11
MP (06/03/10 -10/06/10)	608 ± 25	420 ± 20	205 ± 14
Colorida (25/09/09 – 05/11/09)	542 ± 23	304 ± 17	218 ± 15
Colorida (06/11/09 – 28/01/10)	1870 ± 43	1136 ± 34	919 ± 33
Colorida (29/01/10 – 05/03/10)	973 ± 31	657 ± 26	390 ± 20
Colorida (06/03/10 -10/06/10)	913 ± 30	516 ± 23	431 ± 21

6.6 Estimativa de dose efetiva anual devida à inalação de ^{222}Rn

A dose efetiva devido à exposição ao ^{222}Rn e seus produtos de decaimento foi calculada por meio da equação 4.9.

Conforme exposto no item 4.9 do capítulo 4, foram adotados alguns critérios para estimar a dose efetiva, a fim de verificar quais seriam os riscos para as situações simuladas.

Para os cálculos foram empregados três diferentes fatores de equilíbrio, F = 0,5, 0,7 e 1, representando cenário mais próximo do real, intermediário e a pior situação possível, respectivamente. Os cálculos foram realizados com os tempos de exposição resumidos na TAB 20. Para a avaliação foi considerada a pior situação possível: um único guia percorre todas as cavernas, tanto no sábado como no domingo e ainda, na sexta-feira trabalhando somente por meio período, o mesmo guia percorre as cavernas com as concentrações mais altas. Os resultados são apresentados nas TAB. 21 a 26, considerando 52 semanas anuais de trabalho e média aritmética e geométrica para as concentrações de radônio.

A TAB. 27 traz informações sobre o tempo gasto no interior das cavernas conforme as informações recebidas do gerente de pousada da Diva (Andrade Junior, 2010). Na TAB. 28 são apresentadas as estimativas de dose efetiva anual para guias turísticos da pousada da Diva e para guias que trabalham em outras empresas, considerando 52 semanas anuais de trabalho e média aritmética das concentrações.

TABELA 20 – Estimativa de horas semanais gastas no interior das cavernas monitoradas.

Caverna / Parque	Tempo de visitação (h)	Tempo de trabalho (h)			Tempo de trabalho semanal por caverna (h)	Tempo de trabalho anual por caverna para 52 semanas (h)
		6ª feira	Sábado	Domingo		
Diabo / PEJ	1	1	1	1	3	156
Colorida / PEI	1	1	1	1	3	156
Morro Preto / PETAR	1	1	1	1	3	156
Santana / PETAR	2	2	2	2	6	312

TABELA 21 – Estimativa de dose efetiva anual (E) para caverna do Diabo, 52 semanas de trabalho e diferentes fatores de equilíbrio.

Caverna / Parque	Concentração ^{222}Rn Média aritmética (Bq/m^3)	Tempo de Exposição anual (h)	Dose efetiva anual F=0,5 E (mSv/a)	F=0,7 E (mSv/a)	F=1,0 E (mSv/a)
Diabo/PEJ	560	156	0,3	0,5	0,7

TABELA 22 – Estimativa de dose efetiva anual (E) para caverna do Diabo, 52 semanas de trabalho e diferentes fatores de equilíbrio.

Caverna / Parque	Concentração ^{222}Rn Média geométrica (Bq/m^3)	Tempo de Exposição anual (h)	Dose efetiva anual F=0,5 E (mSv/a)	F=0,7 E (mSv/a)	F=1,0 E (mSv/a)
Diabo/PEJ	521	156	0,3	0,4	0,6

TABELA 23 – Estimativa de dose efetiva anual (E) para caverna Colorida, 52 semanas de trabalho e diferentes fatores de equilíbrio.

Caverna / Parque	Concentração ^{222}Rn Média aritmética (Bq/m^3)	Tempo de Exposição anual (h)	Dose efetiva anual total F=0,5 E (mSv/a)	F=0,7 E (mSv/a)	F=1,0 E (mSv/a)
Colorida/Intervales	572	208	0,5	0,6	0,9

TABELA 24 - Estimativa de dose efetiva anual (E) para caverna Colorida, 52 semanas de trabalho e diferentes fatores de equilíbrio.

Caverna /Parque	Concentração ^{222}Rn Média geométrica (Bq/m^3)	Tempo de Exposição anual (h)	Dose efetiva anual total F=0,5 E (mSv/a)	F=0,7 E (mSv/a)	F=1,0 E (mSv/a)
Colorida/Intervales	540	208	0,4	0,6	0,9

TABELA 25 - Estimativa de dose efetiva anual (E) para duas cavernas do PETAR, 52 semanas de trabalho e diferentes fatores de equilíbrio.

Caverna /Parque	Concentração ^{222}Rn Média aritmética (Bq/m^3)	Tempo de Exposição anual (h)	Dose efetiva anual F=0,5 E (mSv/a)	F=0,7 E (mSv/a)	F=1,0 E (mSv/a)
Morro Preto/PETAR	282	156	0,2	0,2	0,3
Santana/PETAR	4039	312	4,9	7	10
Dose Efetiva Anual Total			**5,1**	**7,1**	**10,3**

TABELA 26 - Estimativa de dose efetiva anual (E) para duas cavernas do PETAR, 52 semanas de trabalho e diferentes fatores de equilíbrio.

Caverna /Parque	Concentração ^{222}Rn Média geométrica (Bq/m^3)	Tempo de Exposição anual (h)	Dose efetiva anual F=0,5 E (mSv/a)	F=0,7 E (mSv/a)	F=1,0 E (mSv/a)
Morro Preto/PETAR	278	156	0,2	0,2	0,3
Santana/PETAR	3712	312	4,5	6,4	9,1
Dose Efetiva Anual Total			**4,7**	**6,6**	**9,4**

TABELA 27 – Estimativa de horas gastas no interior de cavernas e dias trabalhados por monitores da Pousada da Diva e outras pousadas.

Tempo gasto diariamente no interior das cavernas (h)	Dias trabalhados no mês	Total de horas gastas anualmente (h)
3,5	12[(a)]	504
3,5	5[(b)]	210

[(a)] – Monitores da Pousada da Diva
[(b)] – Monitores de outras Pousadas

TABELA 28 - Estimativa de dose efetiva anual (E) para 52 semanas de trabalho e diferentes fatores de equilíbrio.

Cavernas	Concentração ^{222}Rn (Bq/m^3)	Tempo de Exposição anual (h)	Dose efetiva anual total F=0,5 E (mSv/a)	F=0,7 E (mSv/a)	F=1,0 E (mSv/a)
Morro Preto e Santana [(a)]	4321	504	8,5	12	17
Morro Preto e Santana [(b)]	4321	210	3,6	5	7

[(a)] – Monitores da Pousada da Diva
[(b)] – Monitores de outras pousadas

7. CONCLUSÕES

As concentrações de radônio encontradas são da magnitude daquelas obtidas anteriormente (Alberigi, 2006). Observando os resultados apresentados nas TAB. 10 e 12, verificamos que as maiores concentrações continuam sendo obtidas para as galerias da caverna Santana e para esses resultados ocorre aumento nas concentrações para o período entre Novembro de 2009 e Janeiro de 2010, períodos marcados por alta na quantidade de chuvas e elevação nas temperaturas (FIG. 27 a 30).

Por ser uma caverna com maior riqueza de galerias observa-se que as concentrações aumentam à medida que a distância entre os pontos de monitoramentos e a entrada da caverna também aumenta devendo-se isto ao fato de que a ventilação diminui.

Nas FIG. 25 e 26 é nítida a diferença entre as temperaturas medidas externamente e temperaturas medidas em galerias distantes da boca da entrada da caverna Santana, fator que pode dificultar as trocas entre o ar do interior e exterior, impedindo a saída de radônio da caverna.

Em todos os períodos os níveis medidos na entrada são menores do que os níveis obtidos para as galerias interiores, o que é esperado, devido à contínua dispersão do ambiente externo.

Analisando os resultados das concentrações obtidas na caverna Santana com a quantidade total de chuvas e temperaturas na região (FIG. 31 a 34) percebe-se que as variações dos níveis de radônio não sofrem influência da quantidade de chuva, todavia estão diretamente relacionados às variações de temperatura da região.

Comparando esses resultados com os resultados obtidos para concentrações de atividade de ^{226}Ra, ^{228}Ra e ^{228}Ra/^{226}Ra observa-se que tanto a quantidade de rádio quanto as razões de atividade são maiores em abril de 2009 e diminuem em novembro de 2009, opondo-se ao que ocorre com o radônio da caverna Santana. Esta diminuição indica provável diluição das águas estudadas em função do aumento da quantidade de chuvas. Ou seja, o aumento nas concentrações de radônio não deve receber contribuição significativa dos isótopos medidos em água.

O resultado de concentração de radônio obtido pela exposição de detectores à estalactite (seção 6.4) indica que a maior contribuição para o radônio no ar das cavernas vem das rochas.

A menor concentração de radônio foi observada para a caverna Morro Preto medida entre Novembro de 2009 e Janeiro de 2010 igual a 132 Bq/m^3. Ressalta-se que a caverna Morro Preto está ligada a caverna Couto que é extremamente ventilada e que apresentou os menores níveis de radônio em estudo anterior (Alberigi, 2006) conforme mostrado na TAB. 2 em período que englobava o final da primavera e inicio verão ocorrendo coincidência entre as estações do estudo anterior e estudo atual. O resultado pode estar associado à fuga ou escape do gás entre as duas cavernas.

Relacionando as variações de radônio ocorridas na caverna Morro Preto com a quantidade de chuva e temperatura da região (FIG. 35 e 36) é nítida a relação de oposição existente entre as concentrações de radônio e as quantidades de chuvas, obedecendo a uma proporcionalidade inversa. Já com a temperatura o comportamento usual é mantido até que ocorre uma ruptura nesse comportamento no terceiro período quando apesar de elevação na temperatura o nível de radônio diminui bruscamente.

A caverna do Diabo apresentou a maior concentração na primavera e a menor concentração no final da primavera e início do verão como mostrado nas FIG. 37 e 38, indicando uma relação inversamente proporcional entre o radônio no ar e a quantidade de chuva e variação da temperatura.

Basicamente as cavernas Morro Preto e Diabo apresentaram comportamento semelhante quanto aos níveis do radônio no ar e as variações nas quantidades de chuvas, pois para ambas, as concentrações de radônio são inversamente proporcionais à quantidade de chuva. Nestes dois casos os pontos de monitoramento das duas cavernas estão localizados no sumidouro, o contrário do observado para caverna Santana que tem os pontos de monitoramento localizados praticamente na ressurgência da caverna. Este fato levanta a hipótese de que as variações nos níveis de radônio possam também estar associadas com a localização dos pontos de monitoramento no interior da caverna e deve ser investigada.

Também esta relação inversa entre variações nos níveis de radônio e variações nas quantidades de chuvas levanta outra hipótese que deve ser investigada, de que em épocas de cheia ou estiagem, a contribuição das chuvas para diminuição de radônio no ar

do interior das cavernas ocorra do ponto de vista mecânico, ou seja, de que a água poderia agir como uma espécie de pistão arrastando o gás em direção a entrada ou saída da caverna diminuindo suas concentrações durante estes períodos, pois o aumento ou diminuição nas quantidades de chuvas acarretará em aumento ou diminuição também nos rios da região, e conseqüentemente em aumento ou diminuição nos rios que percorrem o interior das cavernas.

As variações de radônio ocorridas na caverna Colorida estão de acordo com a maioria dos estudos realizados sobre radônio em cavernas. Nas FIG. 39 e 40 é mostrado que as concentrações parecem sofrer maiores influencias das variações de temperatura, uma vez que no terceiro período ocorre queda brusca na quantidade de chuvas, porém há alta nas temperaturas e a concentração de radônio assume seu maior valor.

O aumento e diminuição nas concentrações de radônio estão diretamente relacionados às variações de temperatura do ambiente externo.

Considerando-se os resultados das razões isotópicas, observou-se uma predominância dos isótopos naturais de rádio da série natural do ^{232}Th na maior parte das amostras, em comparação com os da série do ^{238}U e do ^{235}U. Estes resultados refletem a presença de uma concentração maior de ^{232}Th em relação ao ^{238}U nos sedimentos e rochas cristalinas da plataforma continental do Estado de São Paulo (Pereira et al., 1986).

Durante o período de investigação, as distribuições das concentrações de atividade dos isótopos naturais de rádio ao longo dos meses nas águas de superfície evidenciaram que as maiores concentrações foram obtidas no mês de Outubro. O trabalho também evidenciou que nas águas dos rios, o ^{228}Ra é o isótopo presente em maiores concentrações, em virtude da sua regeneração e liberação mais rápida dos sedimentos e do material particulado em suspensão, conseqüência da sua meia-vida mais curta, quando comparada a do ^{226}Ra. No caso das águas subterrâneas, o ^{228}Ra é o isótopo que se apresenta em maiores concentrações, em conseqüência do alto teor de ^{232}Th nas rochas e sólidos dos aqüíferos da região.

Os resultados obtidos para o núcleo Caboclos (TAB.16) se mostraram superiores aos resultados observados no núcleo Santana (TAB.14 e 15) em virtude da contribuição do granito que caracteriza a região do núcleo Caboclos em relação ao calcário característico da região do núcleo Santana (Karmann, 2011).

Considerando as atividades dos radionuclídeos específicos ^{226}Ra e ^{228}Ra observadas nas amostras estudadas no PETAR, em nenhum caso os limites de 0,1 Bq/ L

para atividade alfa total e de 1 Bq/L para atividade beta total, recomendados pela Portaria n° 518 do Ministério da Saúde foram ultrapassados (Portaria nº 518, 2005).

Os resultados da TAB. 19 sugerem que a identificação dos radionuclídeos é possível e embora os resultados apresentem diferenças entre a quantidade de traços dos três radionuclídeos, deveria ocorrer equilíbrio radioativo entre radônio e seus descentes no monitor NRPB.

Contudo, a identificação dos radionuclídeos para os detectores com altas densidades de traços torna-se muito trabalhosa, pois os traços sobrepõem-se entre si. Entretanto, a técnica poderia ser aplicada para avaliações em residências ou outros locais que apresentem menores quantidades de traços, ou seja, baixos níveis de radiação, pois, para detectores CR-39 irradiados na fonte padrão Pylon (Pylon, 1992), o equilíbrio radioativo foi verificado a contento (Pecequilo, 2010).

Quanto aos resultados obtidos para estimativa de dose efetiva anual observa-se que, para os cenários que mais se aproximam da realidade, que considera fator de equilíbrio 0,5 e tempo de exposição anual de 52 semanas supondo o tempo de visitação para cada caverna (TAB. 20), a maior dose foi de 4,9 mSv/a para caverna Santana e a menor dose efetiva anual foi de 0,2 mSv/a para a caverna Morro Preto, considerando as médias aritméticas das concentrações. Os cálculos de dose considerando as médias geométricas das concentrações são ligeiramente inferiores.

Para o pior cenário que considerou 52 semanas de trabalho e fator de equilíbrio 1, as doses variaram de (0,3 mSv/a a 10 mSv/a) obtidas respectivamente para as cavernas Morro Preto e Santana.

A dose efetiva anual estimada (que considera as horas mostradas na TAB. 27) para os guias turísticos que trabalham para a empresa Pousada da Diva foi de 8,5 mSv/a para o fator de equilíbrio 0,5, 12,0 mSv/a para o fator de equilíbrio 0,7 e 17 mSv/a para o fator de equilíbrio 1.

Em geral, para medidas de radônio em cavernas é comum a ocorrência de valores que se aproximem do limite de dose efetiva anual de 20 mSv/a recomendado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP 60, 1990). Em estudo recente realizado na Hungria foi estimada uma dose efetiva anual total de 19,7 mSv/a (Kávási et al., 2010).

Entretanto para todos os casos simulados neste trabalho, mesmo para o pior cenário que adotou o fator de equilíbrio 1, os resultados estão abaixo do limite anual de 20 mSv/a recomendado para trabalhadores (ICRP 60, 1990).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação e estudo do equilíbrio radioativo entre radônio e seus descendentes deve ser intensificada para detectores expostos em ambientes com baixos níveis de radônio para aperfeiçoamento da metodologia empregada.

O monitoramento em cavernas de todo o mundo vem sendo realizado intensivamente e é fato que tais ambientes apresentam elevados níveis de radônio se comparados a outros ambientes não subterrâneos. Propor um sistema para aumento de ventilação e conseqüentemente diminuição dos níveis de radônio como é feito em minas poderia contribuir para a degradação desses ambientes, uma vez que, apesar de levarem milhares de anos para serem formados apresentam fragilidade, pois a simples presença desordenada do homem contribui para sua degradação.

Estas elevadas concentrações não diminuirão, pois é resultado direto do material geológico de que é formado, deste modo, é importante o monitoramento por períodos longos para caracterização dos níveis de radônio e ampliação de monitoramento para cavernas de outras regiões abertas a pesquisadores e visitantes.

Para melhor compreender as trocas existentes entre o ambiente interno e externo das cavernas que parecem dominar as variações de radônio no ar seria interessante realizar medidas em pontos de diferentes localizações no interior da caverna, como por exemplo, no sumidouro da caverna Santana, uma vez que o monitoramento realizado nesta caverna cobriu apenas pontos localizados em sua ressurgência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-JARAD, F., WILSON, C.K., FREMLIN, J.H. The registration of the alpha-particles from polonium isotopes plated-out on the surface of the plastic detectors LR-115 and CR-39. **Nuclear Tracks**, v.5, n.3, p. 285-290, 1981.

ÁGUAS PARANÁ – Instituto das Águas do Paraná. Disponível em <www.aguasparana.pr.gov.br>. Acesso em 16/09/2010.

ALBERIGI, S., PECEQUILO, B.R.S., CAMPOS, M.P., 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, 2005.

ALBERIGI, S. PECEQUILO, B.R.S., CAMPOS, M.P. Um método alternativo para contagem de traços em detectores sólidos de traços nucleares. In: **International Nuclear Atlantic Conference**, VII ENAN, Santos, Brasil, 2005a CD – ROM.

ALBERIGI, S. **Avaliação da exposição ao ^{222}Rn nas cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR)**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

ALBERIGI, S., PECEQUILO, B.R.S., Caves of Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP, Brasil: A Study of indoor radon levels and impact of seasonal temperature and humidity In**: International Nuclear Atlantic Conference**, VIII ENAN, Santos, Brasil, 2007 CD - ROM.

ALBERIGI, S., PECEQUILO, B.R.S., Níveis de radônio em cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). Pesquisa em Turismo e Paisagens Cársticas – **Revista Científica da Seção de Espeleoturismo da SBE**, v. 1, p. 43-55, 2008.

ALBERIGI, S., PECEQUILO, B.R.S., Variation of Indoor Radon Levels in Some Caves of Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP, Brazil with Ventilation and Rain. **American Institute of Physics**, v. 1034, p. 153–156, 2008a.

AMGAROU, K., FONT, Ll, DOMINGO, C., FERNÁNDEZ, F., BAIXERAS, C. Simultaneous measurement of radon, radon progeny and thoron concentrations using Makrofol DE detectors, **Radiation Measurements**, v.34, p. 139 - 144, 2001.

AMGAROU, K., FONT, L1, BAIXERAS, C. A novel approach for long-term determination of indoor ^{222}Rn progeny equilibrium factor using nuclear track detectors, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v.506, p.186 - 198, 2003.

AMIN, R.M., MANSY, M., EISSA, M.F., EISSA, H.M., SHAHIN, F.M. Assessment of natural radioactivity and radon exhalation rate in Sannur cave, eastern desert of Egypt, **Journal of Radiological Protection**, v. 28, p. 213–212, 2008.

ANDRADE JUNIOR, VANDIR – Comunicação Pessoal, Novembro/2010.

ANJOS, R.M., UMISEDO, N., DA SILVA, A.A.R., ESTELLITA, L., RIZZOTTO, M., YOSHIMURA, E.M., VELASCO, H., SANTOS, A.M.A. Occupational exposure to radon and natural gama radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina, **Journal of Environmental Radioactivity**, v.101, p. 153-158, 2010.

ATTALA, L.T. **Interpretação Quantitativa de Resultados Experimentais**. Centro de Operação e Utilização do Reator de Pesquisa, Área de Radioquímica. Instituto de Energia Atômica, São Paulo – Brasil, maio de 1978.

AULER, A., RUBBIOLI, E., BRANDI, R., **As grandes cavernas do Brasil**, Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, Belo Horizonte, 2001.

AYTEKIN, H., BALDIK, R., ÇELEBI, N., ATAKSOR, B., TAŞDELEN, M., KOPUZ, G., Radon measurements in the caves of Zonguldak (Turkey), **Radiation Protection Dosimetry**, v. 118, nº1, p.117-121, 2006.

BAHTIJARI, M., VAUPOTIC, J., GREGORIC, A., STEGNAR, P., KOBAL, I. Exposure to Radon in the Gadime Cave, Kosovo, **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 99, p. 343–348, 2008.

BATIOT–GUILE, C., SEIDEL, J-L., JOURDE H., HÉBRARD O., BAILLY-COMTE, V. Seasonal variations of CO_2 and ^{222}Rn in a Mediterranean sinkhole – spring (Causse d'Aumelas, SE France), **International Journal of Speleology**, v.36, nº1, p. 51–56, 2007.

BINNS, D.A.C., TOLENTINO, J., GOUVEA, V.A., MELO, V.P., **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, 1996 CD-ROM.

BINNS, D.A.C., FIGUEIREDO, N., MELO, V.P., GOUVEA, V.A., Radon-222 measurements in a Uranium-prospecting area in Brazil, **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 38, n.2, p. 249–254, 1998.

BRUNENI, J. L. CR-39 Celebrating 50 years – More than meets the eye – The Stories Behind the Development of Plastic Lenses, booklet. Disponível em <http://www.ppg.com/optical/opticalproducts/opticalmaterials/Pages/CR-39.aspx>. Acesso em 31/06/2010.

CARTWRIGHT, B.G., SHIRK, E.K., PRICE, P.B. A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution, **Nuclear Instruments and Method**, v.153, p. 457–460, 1978.

CARVALHO FILHO, C.A., RAPOSO, C., ALVES, J.V., MACACINI, J.F., CARDOZO, C., FRAENKEL, O., GOUVEA, V.A., BRITO, W. **Levantamento das concentrações de radônio em minas subterrâneas do Brasil**, In: International Nuclear Atlantic Conference, Santos, Brasil, 2005, CD-ROM.

CAVERNA DO DIABO, disponível em <www.cavernadodiabo.com>. Acesso em 08/08/2010.

CCOHS – Canadian Centre for Occupational Health and Safety. Disponível em <www.ccohs.ca>. Acesso em 17/09/2010.

CEU – Centro Excursionista Universitário. Mapeamento da caverna Morro Preto, 1987.

CIIAGRO/IAC – Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas/Instituto Agronômico de Campinas, disponível em<www.ciiagro.sp.gov.br>. Acesso em 05/06/2010.

COTEC – Ofício Nº 549/2009 D71/09 A. Autorização para realização de projeto de pesquisa. Vigência entre Junho/09 e Julho/10. São Paulo, 18 de Setembro de 2009.

CPTEC/INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, disponível em <www.cptec.inpe.br>. Acesso em 05/06/2010.

CPMR – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. Disponível em <www.cprm.gov.br/gestao/ppga_valedoribeira>. Acesso em 08/08/2010.

DA SILVA, A.A.R., **Radônio e filhos em residências**. 2005. Tese (Doutorado) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DESCOBRINDO INTERVALES – Atlas Ambiental. Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Geografia – Disponível em <www.geografia.fflch.usp.br>. Acesso em 08/08/2010.

DUBINCHUK, V.T., PLATA-BEDMAN, A., FROEHLICH, K. Nuclear techniques for investigating migration of pollutants in groundwater. A report on some practical applications for preventing pollution of water resources, **IAEA Bulletin 4**, 1990.

DUEÑAS, C., FERNÁDEZ, M.C., CAÑETE, S. ^{222}Rn concentrations and the radiation exposure levels in the Nerja Cave, **Radiation Measurements**, v. 40, p. 630–632, 2005.

DUFFY, J.T., MADDEN, J.S., MACKIN, G.M, MACGARRY, A.T., COLGAN, P.A., A reconnaissance survey of radon in show caves in Ireland, **Environment International**, v. 22, p.415–423, 1996, Supplement 1.

DURRANI, S.A., Nuclear Tracks: A success story of the 20th century, **Radiation Measurements**, v. 34, p.5–13, 2001.

EAPPEN, K.P., MAYYA, Y.S., Calibration factors for LR–115 (type–II) based radon thoron discriminating dosimeter, **Radiation Measurements**, v. 38, p.5–17, 2004.

EISENBUD, M. **Environmental Radioactivity.** 2nd ed. Academic Press, Orlando, 1987.

ENGE, W., Introduction to plastic nuclear track detectors, **Nuclear Tracks**, v.4, n.4, p. 283 – 308, 1980.

ESPINOSA, G., GOLZARRI, J.I., GAMMAGE, R.B., SAJO-BOJUS, L., VICCON-PALE, J., SIGNORET-POILLON, M. Seasonal variation measurements of radon levels in caves using SSNTD method, **Radiation Measurements**, v.43, S364 - S368, 2008.

EVANS, R. D. **The atomic nucleus**. McGraw Hill Book Company, Inc., New York, 1955.

FERRARI, J. A. **A Dinâmica da drenagem subterrânea nos planaltos cársticos do rio Betari, Vale do Ribeira SP** – Projeto de Pesquisa - FAPESP Proc. 2009/05115-5, (2010).

FLEISCHER, R.L., Radon in the environment – opportunities and hazards. **Nuclear Tracks Radiation Measurements**, v. 14, n. 4, p. 421– 435, 1988.

FRANK, A.L., BENTON, E.V. Radon dosimetry using plastic nuclear track detectors. **Nuclear Track Detection**, v.1, n. 3-4, p. 149–179, 1977.

GILMORE, G.K., SPERRIN, M., PHILLIPS, P., DENMAN, A. Radon Hazards, geology and exposure of caves users: a case study and some theoretical perspectives, **Ecotoxicology and Environment Safety**, v. 46, p. 279–288, 2000.

GILMORE, G.K., PHILLIPS, P., DENMAN, A., SPERRIN, M., PEARCE, G., Radon levels in abandoned metalliferous mines, Devon, Southwest England, **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 49, p. 281–292, 2001.

GILMORE, G.K., PHILLIPS, P.S., DENMAN, A.R., GILBERSTSON, D.D., Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves, **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 62, p.165–179, 2002.

GILMORE, G., GILBERTSON, D., GRATTAN, J., HUNT, C., McLAREN, S., PYATT, B., BANDA, R., BARKER, G., DENMAN, A., PHILLIPS, P., REYNOLDS, T. The potential risk from ^{222}Rn posed to archaeologists and earth scientists: reconnaissance study of radon concentrations, excavations, and archaeological shelters in the great Cave of Niah, Sarawak, Malaysia, **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 60, p. 213–227, 2005.

GOUVEA, V.A., MELO, V.P., BINNS, D.A.C. **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, 1996.

HANAN AL-MUSTAFA, AL JARALLAH, M.I, FAZAL-UR-REHMAN, F. ABU-JARAD. Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia, **Radiation Measurements**, v. 40, p. 707–710, 2005.

HARDCASTLE, G.D., HOWARTH, C.B, NAISMITH, S.P., ALGAR, R.A., MILES, J.C.H. NRPB Etched-track Detectors for Area Monitoring of Radon. Technical Report, Chilton, 1996.

HOWARTH, C.B., MILES, J.C.H. NRPB W44 – Results of the 2002 NRPB Intercomparison of Passive Radon Detectors, National Radiological Protection Board, Chilton, 2002.

ICRP 10 – International Commission on Radiological Protection, Report of the Committee IV on evaluation of radiation doses to body tissues from internal contamination due to occupational exposure, Oxford: Pergamon Press: ICRP Publication 10, 1968.

ICRP 23 – International Commission on Radiological Protection, Report of the task group on reference man, Oxford, Pergamon Press: ICRP Publication 23, 1975.

ICRP 60 – International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the international commission on radiological protection. Oxford, Pergamon Press: ICRP Publication 60, 1990.

ICRP 65 – International Commission on Radiological Protection, Protection against radon-222 at home and at work, Oxford, Pergamon Press: ICRP Publication 65, 1993.

ICRP 66 – International Commission on Radiological Protection, Human respiratory tract model for radiological protection, Oxford, Pergamon Press: ICRP Publication 66, 1994.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, disponível em <www.inmet.gov.br>. Acesso em 05/06/2010.

JOVANOVIC, P. Radon measurements in karst caves in Slovenia, **Environment International**, v. 22, p. S429–S432, 1996. Supplement 1.

KARMANN, I.; BATISTUCCI, N.L.N., PHILADELPHI, M.A.;BOGGIANI, P.C.; ALCOVER NETO, A.; PISSATO, E.; BARROS, E.J.; SILVA, E.L.; MATTOS, A.C.Y.; SHINOHARA, E.J.; MIHALY, P. **Grupo de Espeleologia da Geociências – USP**. Mapeamento das cavernas Água Suja e Conjunto Morro Preto Couto, 1988.

KARMANN, I., FERRARI, J.A., Carste e cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP, **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**, DNPM, Brasília, v. 43, p. 401-414, 2002.

KARMANN, I. Comunicação Pessoal, 2011.

KÁVÁSI, N., SOMLAI, J., SZEILER, G., SZABÓ, B., SCHAFER, I., KOVÁCS,T. Estimation of effective doses to cavers based on radon measurements carried out in seven caves of the Bakony Mountains in Hungary, **Radiation Measurements**, v.45, p. 1068-1071, 2010.

KHAN, H., A, QURESHI, I.E., TUFAIL, M., Passive dosimetry of radon and its daughters using solid state nuclear track detectors (SSNTDs), **Radiation Protection Dosimetry**, v.46, nº3, p. 149-170, 1993.

KHAYRAT, A.H., DURRANI, S.A. Variation of alpha-particle track diameter in CR-39 as a function of residual energy and etching conditions, **Radiation Measurements**, v. 30, p. 15-18, 1999.

KNOLL, G., F., **Radiation Detection and Measurement**, 2nd ed., Nova York, 1979.

KULWANT, S., SINGH, M., SINGH, S., SAHOTA, H.S., PAPP, Z. Variation of radon progeny concentrations in outdoor air functions of time, temperature and relative humidity, **Radiation Measurements**, v. 39, p. 213–217, 2005.

LANGRIDGE, D., STOKES, R.P., JACKSON, C.P. Monitoring of radon gas in caves of the Yorkshire Dales, United Kingdom, **Journal of Radiological Protection**, v.30, p. 545-556, 2010.

LARIO, J., SÁNCHEZ-MORAL, S., CAÑAVERAS, J.C., CUEZVA, S., SOLER, V., Radon continuous monitoring in Altamira cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose, **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 80, p. 161–174, 2005.

LARIO, J., SÁNCHEZ-MORAL, S., CUEZVA, S., TABORDA, M., SOLER, V. High ^{222}Rn levels in a show cave (Castañar de Ibor, Spain): Proposal and application of management measures to minimize the effects on guides and visitors, **Atmospheric Environment**, v. 40, p. 7395–7400, 2006.

LEUNG, S.Y.Y., NIKEZIC, D., YU, K.N. Passive monitoring of the equilibrium factor inside a radon exposure chamber using bare LR 115 $SSNTD_S$, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 564, p. 319–323, 2006.

LOBO, H.A.S. **Dinâmica atmosférica subterrânea na determinação da capacidade de carga turística (Caverna de Santana, Iporanga-SP)**. Relatório de qualificação de doutorado (Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, p.311, 2010.

MARQUES, M., SAGOSTAVSKAS, N. **Mapeamento da caverna Santana**, SBE, 1972.

MILES, J.C.H., DEW, E.J. A passive radon gas detector for use in homes. Proceeding 11th International Conference Solid State Nuclear Tracks Detectors, Supplement 3, Bristol, Nuclear Tracks, Pergamon Press, Oxford, 1982.

MISDAQ, M.A., AMGHAR, A. Radon and thoron emanation from various marble materials: impact on the workers, **Radiation Measurements**, v. 39, p. 421–430, 2005.

MISDAQ, M.A., OUGUIDI, J. Radon, Thoron and their decay products in natural caves with nuclear track detectors, **Radiation Protection Dosimetry**, v. 130, n° 1, p.110–114, 2008.

NCRP 97 – National Council on Radiation Protection and Measurements, Measurement of radon and radon daughter in air, 1998.

NIKEZIĆ, D., UROŠEVIĆ, V., A theoretical study of radon measurements with activated charcoal, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, nº406, p. 486–498, 1998. Section A.

OLIVEIRA, J. **Determinação de ^{226}Ra, ^{228}Ra em águas minerais da região de Águas da Prata**. 1993. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

OLIVEIRA, J. **Determinação dos níveis de radioatividade natural em águas utilizadas para abastecimento público no Estado de São Paulo**. 1998. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

OLIVEIRA, J.; MAZZILLI, B.P.; SAMPA, M.H.O.; BAMBALAS, E. Natural radionuclides in drinking water supplies of São Paulo State, Brazil and consequent population doses. **Journal of Environmental Radioactivity**, v.53, p.99-109, 2001.

ORLANDO, C., ORLANDO, P., PATRIZII, L., TOMMASINO, L., TONNARINI, S., TREVISI, R., VIOLA, P. A Passive Radon dosemeter suitable for workplaces, **Radiation Protection Dosimetry**, v. 102, nº2, p. 163-168, 2002.

OTTON, J.K., GUNDERSEN, L.C.S., SCHUMANN, R. The Geology of Radon, U.S. Department of the Interior/U.S. Geological Survey, 1995. Disponível em <http://energy.cr.usgs.gov/radon/georadon.html> Acesso em 29/05/2010.

PAPACHRISTODOULOU, C.A., IONNIDES, K.G., STAMOULIS, K.C., PATIRIS, D.L., PAVLIDES, S.B., Radon activity levels and effective doses in the Perama Cave, Greece, **Health Physics**, v. 86, n.6, p.619–624, 2004.

PAPASTEFANOU, C., MANOLOPOULOU, M., STOULOS, S., IOANMIDOU, A., GERASOPOULOS, E. Elevated radon concentrations in a Plestocenic cave operating as a show cave, **International Congress Series**, v. 1276, p. 204–205, 2005.

PAULO, S.R., **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**. 1991. Tese (Doutorado) – Universidade de Campinas, Campinas

PECEQUILO, B.R.S. Comunicação Pessoal, 2010.

PEREIRA, E.B., HAMZA V.M., FURTADO, V.V. ADAMS, J.A.S. U,Th and K content heat production the thermal conductivity of São Paulo, Brazil, continental shelf sediments: a reconnaissance work, **Chemical Geology**, v. 58, p. 217-226, 1986.

PIESCH, E., Al NAJJAR, S.A.R., JÓZEFOWICZ, K., The two–step electrochemical etching technique applied for polycarbonate track etched detectors, **Nuclear Tracks and Radiation Measurements**, v. 19, n.1–4, p. 205–210, 1991.

PINZA-MOLINA, C., ALCAIDE, J.M., RODRIGUEZ-BETHENCOURT, R., HERNANDEZ-ARMAS, J. Radon exposures in the caves of Tenerife (Canary Islands), **Radiation Protection Dosimetry**, v. 82, nº 3, p.219–224, 1999.

PLANINIC, J., FAJ, Z. The equilibrium factor F between radon and its daughters, **Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 278, p. 550–552, 1989.

PORTARIA MS nº 518/2004. **Série E. Legislação Saúde**, Ministério da Saúde, Brasília (2005).

PRZYLIBSKI, T.A. Radon concentration changes in the air of two caves in Poland, **Journal of Environmental Radioactity**, v. 45, p.81–94, 1999.

Pylon Eletronics Incorporation, Pylon model RN-150, **Instruction Manual**, 1992.

RELATÓRIO FAPESP – Avaliação dos níveis de radônio nas cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), sul do estado de São Paulo, Projeto FAPESP de auxílio à pesquisa, processo: 2003/01846-2, **Relatório Final**, jan. 2006.

SAFETY REPORTS SERIES 33, Radiation Protection against Radon in Workplaces other than Mines, (2003).

SAINZ, C., QUINDÓS, L.S., FUENTE, I., NICOLÁS, J., QUINDÓS, L. Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: The case of tourist caves, **Journal of Hazardous Materials**, v.145, p. 368–371, 2007.

SAJÓ-BOHUS, L., GREAVES, E.D., PÁLFAVI, J., URBANI, F., MERLO, G. Radon concentration measurements in Venezuelan caves using SSNTDS, **Radiation Measurements**, v. 28, n.1–6, p.725–728, 1997.

SANNAPPA, J, CHANDRASHEKARA, M, S, SATHISH, L,A, PARAMESH, L, VENKATARAMAIAH, P, Study of background radiation dose in Mysore city, Karnataka State, India, **Radiation Measurements**, v. 37, p. 55–65, 2003.

SANO, N.N. **Estudo Comparado da Gestão das Visitações nos Parques Estaduais Turísticos do Alto Ribeira (PETAR) e Intervales (PEI)**. (2007). Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geografia Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SBE – Sociedade Brasileira de Espeleologia – disponível em <www.sbe.com.br>. Acesso em 09/08/2010.

SMA – Secretaria do Meio Ambiente, Projeto de Desenvolvimento do Ecoturismo na Região da Mata Atlântica – Estudo Ambiental, Governo do Estado de São Paulo, 2005.

SOLOMON, S.B., LANGROO, R., LYONS, R.G., JAMES, J.M, Radon exposure to tour guides in Australian show caves, **Environment International**, v. 22, p.S409–S413, 1996. Supplement 1.

SOLOMON, S.B., LANGROO, R., PEGGIE, J.R., LYONS, R.G., JAMES, J.M. Occupational Exposure to Radon in Australian Tourist Caves an Australia-Wide Study of Radon Levels – Final Report, Australian Radiation Laboratory, 1996a.

SOMLAI, J., SZEILER, G., SZABÓ, P., VÁRHEGYI, A., TOKONAMI, S., ISHIKAWA, T., SORIMACHI, A., YOSHINAGA, S., KOVÁCS, T. Radiation dose of workers originating from radon in the show Cave of Tapolca, Hugary, **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v.279, nº1, p. 219-225, 2009.

SPERRIN, M., DENMAN, T., PHILLIPS, P.S. Estimating the dose from radon to recreational cave users in the Mendips, UK, **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 49, p.235–240, 2000.

STEINHAUSLER, F. HOFMANNM W., LETTNER, H. Thoron exposure of man: a negligible issue? **Radiation Protection Dosimetry**, v.56, n. 1 – 4, p.127–131, 1994.

STEJNY, J. The polymer physics of CR-39 – The state of understanding. **Radiation Protection Dosimetry**, v.20, n. 1-2, p. 31-36, 1987.

TSANKOV, L., PRESSYANOV, D., MITEV, K., GEORGIEV, S., DIMITROVA, I. Automatic counting of chemically etched tracks by means of a computer scanner, **Radiation Measurements**, v. 39, p. 557–559, 2005.

TSVETKOVA, T., PRZYLIBSKI, T.A., NEVINSKY, T.A., NEVINSKY, I. Measurement of radon in the East Europe under the ground, **Radiation Measurements**, v. 40, p.98–105, 2005.

TUREK, K., GELEV, M., DIMOV, I. Comparative measurements of soil gas radon concentration using thermoluminescent and track detectors, **Radiation Measurements**, v.38, p. 843–846, 2004.

UNSCEAR – 1977, United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Levels and effects of ionizing radiation, United Nations, New York, 1977.

UNSCEAR – 2000, United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), The 2000 Report to the General Assembly with scientific Annexes. New York: United Nations, 2000.

USNO – USA National Observatory, Earth`s Seasons Equinoxes, Solstices, Perihelion, and Aphelion 2000–2020, Astronomical Applications Department disponível em <www.usno.navy.mil>. Acesso em 11/07/2010.

VEIGA, L.H.S., MELO, V., KOIFMAN, S., AMARAL, E.C.S., High radon exposure in a Brazilian underground coal mine, **Journal of Radiological Protection**, v. 24, p.295–305, 2004.

VENDRAME, F. **Reconheça seus limites numa incursão às cavernas do PETAR**. O Estado de São Paulo, São Paulo, 14 fev. 2006. Caderno de Viagem & Aventura, p. 8-14.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for drinking water quality. Recommendations. vol. 1., 2nd edition, United Nations, Geneva, 2003.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION, Radon and cancer. Ficha técnica nº 291 atualizada em Setembro de 2009. Disponível em < www.who.int>. Acesso em 15/01/2010.

ZEISS, C., KS 100 Imaging System Release 3.0, 1997. CD-ROM.