

## **TAXA DE DOSE ABSORVIDA NO AR DEVIDO AO RADIONUCLÍDEO <sup>40</sup>K PRESENTE EM AMOSTRAS DE ROCHAS DO NÚCLEO PIRAQUARA – PARQUE ESTADUAL DA PEDRA BRANCA**

Jorge do Ouro Neto<sup>1</sup>

Alessandro Mariano Domingues<sup>2</sup>

Ademir Xavier da Silva<sup>3</sup>

Edmilson Monteiro de Souza<sup>4</sup>

### **Resumo**

Dos radionuclídeos encontrados na natureza, o Potássio-40 (<sup>40</sup>K) é o mais importante, do ponto de vista biológico, por estar presente essencialmente em todas as amostras ambientais, e ser o responsável por 98% da emissão de radiação gama dos radionuclídeos primordiais presentes na crosta terrestre. Nesse trabalho foi utilizada a técnica da espectrometria gama de alta resolução com detector HPGe e o pacote de software *GENIE 2000* para a determinação da atividade específica do Potássio 40 (<sup>40</sup>K) em amostras de rochas obtidas de áreas de grande circulação de pessoas do Núcleo Piraquara – Parque Estadual da Pedra Branca/RJ, e estimativa da taxa de dose absorvida no ar a 1 metro da superfície. Os valores de atividade específica encontrados variaram de 1101,9 Bq.kg<sup>-1</sup> até 2536,4 Bq.kg<sup>-1</sup>. As taxas de dose absorvida no ar calculadas a partir das atividades específicas determinadas, variaram de 45,9 a 105,8 nGy.h<sup>-1</sup>. Todos os valores encontrados estão em conformidade com dados da literatura nacionais e internacionais.

**Palavras-chave:** Radioatividade Natural. Atividade Específica. Potássio-40 (<sup>40</sup>K). Taxa de Dose Absorvida. Ecoturismo.

---

<sup>1</sup>Bolsista de Iniciação Científica da FAPERJ – COTCN/UEZO.

<sup>2</sup>Doutorando em Engenharia Nuclear – PEN/COPPE/UFRJ.

<sup>3</sup>Doutor em Engenharia Nuclear pelo PEN/COPPE/UFRJ e Docente Orientador no PEN/COPPE/UFRJ.

<sup>4</sup>Doutor em Engenharia Nuclear pelo PEN/COPPE/UFRJ e Docente Orientador no PPGCTA/UEZO.

## AIR ABSORBED DOSE RATE DUE TO $^{40}\text{K}$ RADIONUCLIDE PRESENT IN ROCK SAMPLES FROM NÚCLEO PIRAQUARA – PEDRA BRANCA STATE PARK

### Abstract

In relation to natural radionuclides, in terms of biological importance, Potassium-40 ( $^{40}\text{K}$ ) is one of more important, once that it is part of the composition of most environmental samples. It is also responsible to 98% of the gamma radiation emission from primordial radionuclides from Earth's crust. In this work the high-resolution gamma spectrometry technique with HPGe detector and the *Canberra* software *GENIE 2000* were used to determinate the specific activity of Potassium-40 in samples of rock obtained in places with a large presence of people from *Núcleo Piraquara – Pedra Branca* State Park, and the terrestrial absorbed dose rates in air from this  $^{40}\text{K}$  specific activities. The results of this study showed that the potassium activity concentration from analyzed samples ranged from  $1101,9 \text{ Bq.kg}^{-1}$  to  $2536,4 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . The absorbed dose rates in air ranged from  $45,9$  to  $105,8 \text{ nGy.h}^{-1}$ . These values are below the results from national and international literature.

**Keywords:** Natural Radioactivity. Specific Activity. Potassium-40 ( $^{40}\text{K}$ ), Air absorbed dose Rate. Ecotourism.

### Introdução

A radiação gama emitida em ocorrências de radionuclídeos naturais como o Potássio-40 ( $^{40}\text{K}$ ) e os radionuclídeos das séries radioativas naturais do Urânio-235 ( $^{235}\text{U}$ ), Urânio-238 ( $^{238}\text{U}$ ), Tório-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) e seus produtos de decaimento, representam a principal fonte de exposição gama externa para o homem. Estes níveis de exposição dependem primariamente das condições geológicas de cada área do planeta e da concentração de Urânio, Tório e Potássio da rocha que originou o solo. (TZORTZIS. TSERTOS, 2004; ANJOS et al., 2005).

Com a prática do Ecoturismo e do Turismo de Aventura, tem-se aumentado a presença da população em regiões até então pouco exploradas pelo homem, regiões estas formadas em sua maioria por reservas florestais e maciços rochosos, onde os níveis de radioatividade natural são pouco conhecidos. Um exemplo de sucesso, localizado na Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro é o Núcleo

Piraquara, importante trilha da Unidade de Conservação do Parque Estadual da Pedra Branca (PEPB), devido ao número de atrativos disponíveis ao público como parque infantil, academia ao ar livre, piscinas e fontes naturais, área de rapel entre outros. (INEA, 2013). Consequentemente é de fundamental importância o desenvolvimento de estudos radiométricos nestas regiões, visando proteger os visitantes de eventuais efeitos causados pelas radiações ionizantes.

Em geral, concentrações de atividade mais altas são comuns em rochas ígneas (graníticas) em relação às sedimentares e metamórficas. (UNSCEAR, 2000; EL-ARABI, 2007; BASTOS, 2008; MAROCCHI et al., 2011). O Maciço da Pedra Branca é composto por um grupo de rochas com litologias distintas, envolvendo a ocorrência de granitóides de variadas texturas e estruturas, além de gnaisses e migmatitos encaixantes (Silva, 2011). Do ponto de vista biológico-ambiental, somente dois radionuclídeos isolados que ocorrem naturalmente são relevantes: o  $^{40}\text{K}$  e o Rubídio-87 ( $^{87}\text{Rb}$ ), sendo o  $^{40}\text{K}$  o mais importante, do ponto de vista biológico, por estar presente essencialmente em todas as amostras ambientais. (KATHREN, 1998). Dos três isótopos naturais do potássio, o  $^{40}\text{K}$  é o único radioativo, com meia-vida de  $1,28 \times 10^9$  anos e uma abundância isotópica de 0,0118%, sendo o responsável por 98% da emissão de radiação gama dos radionuclídeos primordiais presentes na crosta terrestre. (PIRES, 1995).

Estudos radiométricos e radioecológicos vêm sendo desenvolvidos mundialmente, em busca do mapeamento de áreas com elevados níveis de radioatividade, um pré-requisito essencial na investigação da exposição à radiatividade ambiental (SANTOS JÚNIOR, 2009). Uma das grandezas mais estudadas para avaliar a radiação gama outdoor proveniente dos radionuclídeos naturais é a taxa de dose absorvida no ar a 1 m da superfície do solo. Pesquisas realizadas com medidas diretas da taxa de dose absorvida no ar provenientes dos radionuclídeos terrestres já foram realizadas em várias regiões do mundo. A faixa típica de taxa de dose encontrada é de 10-200 nGy.h<sup>-1</sup>. (UNSCEAR, 2000).

Considerando isto, torna-se importante, em termos radiológicos, o desenvolvimento de estudos sobre a taxa de dose absorvida no ar obtidas a partir da atividade específica do  $^{40}\text{K}$  nas formações rochosas do PEPB, devido a radiação

gama do  $^{40}\text{K}$ , visando a avaliação da exposição à radiação natural por parte do público residente e visitante desta importante área de conservação ambiental da Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro.

## **Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo a determinação da taxa de dose absorvida no ar a partir da atividade específica do Potássio 40 ( $^{40}\text{K}$ ) em amostras de rochas obtidas de áreas de grande circulação de pessoas do Núcleo Piraquara – Parque Estadual da Pedra Branca/RJ. Para tal, será utilizada a técnica da espectrometria gama de alta resolução utilizando detector de Germânio Hiperpuro (HPGe) e o pacote de software *GENIE 2000* da *Canberra Industries*. Os resultados obtidos serão comparados com dados encontrados na literatura para rochas graníticas utilizadas como materiais de construção, visto que a natureza de sua aplicação torna obrigatório que os valores de atividade específica não ofereçam riscos radiológicos ao público, bem como com valores de taxa de dose absorvida no ar, encontrados na literatura, provenientes dos radionuclídeos terrestres.

## **Metodologia**

### *Área de estudo*

A região escolhida para estudo está situada no Núcleo Piraquara, importante trilha do PEPB. A Tabela 1 ilustra os pontos de coleta de amostras de rocha, identificados por códigos, e suas respectivas coordenadas geográficas.

Tabela 1. Coordenadas geográficas dos pontos de coleta de amostras de rocha para análise da Concentração de atividade do <sup>40</sup>K.

Coordenadas Geográficas		
Amostras	Latitude	Longitude
A1	-22,901763	-43,447610
A2	-22,901818	-43,447694
A3	-22,901784	-43,448647
A4	-22,901228	-43,448782
A5	-22,901502	-43,445352
A6	-22,901523	-43,448052
A7	-22,901449	-43,448464

Fonte: Pesquisa dos Autores

As amostras de rochas foram coletadas em diferentes afloramentos existentes ao longo da região escolhida para estudo, cobrindo uma extensão territorial de 10.000 m<sup>2</sup>, correspondendo a 01 hectare, como mostra a Figura 1.

Figura 1. Distribuição geográfica dos pontos de coleta no Núcleo Piraquara – PEPB.



Fonte: Pesquisa dos Autores

Um total de 07 afloramentos foram mapeados, realizando-se 02 amostragens em cada. Os pontos de coleta foram escolhidos em função da facilidade de acesso ao turista e ao morador, o tempo de permanência e a concentração de visitantes. Foram considerados fatores como presença de brinquedos para crianças, atrativos esportivos, atrativos turísticos para contemplação, presença de minas d'água e açudes.

### *Preparação das Amostras*

As amostras de rocha foram submetidas a lavagem com água destilada, visando a retirada de matéria orgânica existente na superfície. Posteriormente foram submetidas a processo de secagem em estufa de esterilização por 24h, a uma temperatura de 60 °C. Limpas e secas, as amostras foram submetidas a processo de cominuição, utilizando-se um Moinho de Jarros modelo Marconi MA500/JC1, com esferas (cristais) cerâmicas. Foram obtidos 02 padrões de granulometria para cada amostra processada: refinado e granulado. Todo o procedimento foi realizado no Laboratório Didático e Pesquisa de Processamento de Materiais – LDPPM da Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO. As amostras foram acondicionadas em recipientes de polipropileno de volume de 120 ml, com as tampas lacradas, e etiquetadas, resultando em um total de sete 07 recipientes com amostras de padrão refinado e 07 com padrão granulado, e posteriormente encaminhadas para o Laboratório de Análises Ambientais e Modelagem Computacional – LAASC do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ.

Uma vez no LAASC/UFRJ, as massas das amostras foram aferidas utilizando uma balança digital da marca *Gehaka*, modelo BG 4000, com resolução de centésimos de gramas. Não foram realizados estudos para determinação do tipo de rocha coletado, uma vez que o objetivo do presente estudo é a verificação da concentração de atividade do <sup>40</sup>K nas mesmas, independentemente da sua composição. Para fins de estudo foram analisadas somente as amostras de padrão

refinado. Visando alcançar a condição de equilíbrio radioativo secular, as amostras foram mantidas em repouso durante o período de 40 dias.

### *Sistema de Aquisição de Dados*

A técnica utilizada para a determinação da atividade específica do radionuclídeo natural Potássio ( $^{40}\text{K}$ ) nas amostras foi a *Espectrometria Gama de Alta Resolução*. (GARCÊZ, 2016). As análises espectrométricas foram realizadas no LAASC/COPPE/UFRJ. Para se obter os espectros de emissão gama das amostras foi utilizado um sistema de espectrometria gama de alta resolução produzido pela *Canberra Industries*, composto por um detector semicondutor de Germânio Hiper-Puro (HPGe) vertical modelo GC3020, com eficiência relativa de 30%, acoplado a um pré-amplificador do tipo RC, modelo 2002C, sistema multicanal modelo DAS 1000 (*Digital Spectrum Analyzer*), de 8192 canais, com faixa de energia trabalhada de 50 keV até 2 MeV. O cristal de germânio é do tipo coaxial, com 62 mm de diâmetro e 40 mm de altura. A fim de minimizar os efeitos da radiação de fundo, o detector é envolto por uma blindagem produzida pela *Canberra Industries*, modelo 747, com espessuras de 10 cm de chumbo, 1mm de estanho e 1,6mm de cobre. Essa blindagem ainda é recoberta externamente por 9,5mm de aço com baixa percentagem de carbono.

A calibração em energia do sistema foi realizada com o auxílio do *software Gamma Analysis* da suíte *GENIE 2000*, utilizando três fontes radioativas certificadas, de Césio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), Cobalto-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) e Európio-152 ( $^{152}\text{Eu}$ ), totalizando um número de cinco pontos experimentais correspondentes aos picos do  $^{137}\text{Cs}$  (0,6617 MeV),  $^{60}\text{Co}$  (1,17 MeV e 1,33 MeV) e  $^{152}\text{Eu}$  (0,1218 MeV e 0,3443 MeV). Na Figura 2 é mostrado o sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho.

Figura 2. Espectrômetro de alta resolução equipado com HPGe instalado no LAASC/PEN/COPPE/UFRJ.



Fonte: Pesquisa dos Autores

*Processamento dos dados e determinação da atividade específica e taxa de dose absorvida devida ao  $^{40}\text{K}$*

O processamento dos espectros oriundos das amostras analisadas foi realizado com o auxílio da suíte de softwares para espectrometria alfa e gama *GENIE 2000*, da *CANBERRA Industries*. O *GENIE 2000* é um ambiente computacional que inclui um conjunto de algoritmos de análise avançados para processamento adicional de espectros de radiação gama adquiridos. Os algoritmos fornecem uma análise completa dos espectros como área, largura a meia altura e eficiência. Outras ferramentas importantes são o programa *Gamma Analysis*, utilizado para a calibração em energia do sistema de aquisição, e o pacote de programas *LabSOCS (Laboratory SOURCEless Calibration Software)*, que faz calibrações matemáticas da eficiência de detecção, sem a necessidade de qualquer utilização de fontes padrões de radiação. O *GENIE 2000* também realiza a



identificação e quantificação do radionuclídeo, correções de interferência, auto-atenuação dos fótons emitidos pela amostra, cálculo da concentração de atividade, Atividade Específica e Atividade Mínima Detectável – MDA. (GARCÊZ, 2016). O MDA é a mínima atividade que o arranjo experimental é capaz de detectar. O MDA reflete a habilidade do arranjo experimental em detectar raios gama na presença de interferência da radioatividade natural e do espalhamento Compton de raios gama de alta energia originados da fonte, e dependerá do tipo da amostra, da energia da radiação, da geometria de contagem, do tipo de detector, da radiação de fundo e do tempo de medida. É uma medida imprescindível, em se tratando de análise de campos com baixo nível de radiação. Neste trabalho os valores de MDA para cada amostra foi determinado através do software *Gamma Analysis*, cujo a metodologia para cálculo é baseada na *Derivação de Curie*. (ISO, 2010). Os valores obtidos, para um nível de confiança de 95%, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de MDA para as amostras analisadas neste trabalho

<b>Amostra</b>	<b>MDA (Bq.kg<sup>-1</sup>) Nível de Confiança de 95%</b>
A1	1,12
A2	2,04
A3	3,85
A4	1,33
A5	1,72
A6	0,92
A7	1,07

Fonte: Pesquisa dos Autores

A taxa de dose absorvida  $D$  devido a radiação gama natural ao ar livre, a 1m da superfície, será calculada a partir da atividade específica do  $^{40}\text{K}$ , utilizando o seguinte fator de conversão fornecidos pela ICRU (1994) e UNSCEAR 2000:

$$1\text{Bq.kg}^{-1} \text{ } ^{40}\text{K} = 0,0417 \text{ nGy.h}^{-1}$$

O erro associado a cada medida de taxa de dose,  $\sigma_D$ , será dado pela equação:

$$\sigma_D = 0,0417 \times \sigma_{AK-40}$$

onde  $\sigma_{AK-40}$  é o erro associado aos valores de atividade específica obtidos através dos procedimentos experimentais. (KNOLL, 2000).

## Resultados

### *Atividade específica do $^{40}\text{K}$ e taxa de dose absorvida no ar a 1m da superfície*

Os valores calculados para atividade específica do  $^{40}\text{K}$  nas amostras são apresentados na Tabela 3. O tempo de contagem utilizado para o levantamento dos espectros de fundo e do espectro bruto das amostras analisadas foi de 8 horas (28800s). Para a determinação da atividade específica do  $^{40}\text{K}$ , o espectro de fundo foi subtraído dos espectros brutos com o auxílio da suíte *GENIE 2000*. Para aferir a atividade do  $^{40}\text{K}$  foi utilizada a sua própria energia de decaimento de 1460,8 keV. Devido ao fato do Actínio-228 ( $^{228}\text{Ac}$ ) apresentar probabilidade de emissão de 1% na energia de 1459,2 keV, muito próxima a energia de 1460,8 keV do  $^{40}\text{K}$ , probabilidade de emissão de 10,67%, foi necessária uma correção na atividade do potássio. Para tal, foi adotada a metodologia proposta por Lavi et al. (LAVI et al., 2004).

Tabela 3. Concentração de Atividade do  $^{40}\text{K}$  nas amostras de rocha obtidas no Núcleo Piraquara – PEPB

<b>Amostra</b>	<b>Atividade Específica do <math>^{40}\text{K}</math> (<math>\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}</math>)</b>
A1	1101,9 $\pm$ 45
A2	(1494,8 $\pm$ 61)
A3	(2536,4 $\pm$ 104)
A4	(2294,1 $\pm$ 93)
A5	(1593,8 $\pm$ 65)
A6	(1609,9 $\pm$ 65)
A7	(1511,8 $\pm$ 61)

Fonte: Pesquisa dos Autores

Todas as amostras de rocha analisadas apresentaram valores de atividade específica do  $^{40}\text{K}$  superiores à atividade mínima detectável (MDA). As atividades específicas variaram de 1101,9  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  até 2536,4  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Estes valores estão dentro das faixas de variação de resultados reportados na literatura obtidos para rochas graníticas utilizadas na construção civil, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Comparação da atividade específica do  $^{40}\text{K}$  encontrada nas amostras de rocha obtidas no Núcleo Piraquara e valores oriundos da literatura.

Região Estudada	Número de amostras	Concentração de atividade do $^{40}\text{K}$ ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		Referência
Turquia	42	92	4155,9	(TURHAN, 2008)
Itália	20	( $240 \pm 7$ )	( $2000 \pm 70$ )	(MAROCCHI et al., 2011)
Brasil	110	( $190 \pm 63$ )	( $2029 \pm 95$ )	(ANJOS et al., 2005)
SP e MG	14	407,5	1615	(MOURA, 2005)
Paraná	37	( $246 \pm 17$ )	( $1604 \pm 94$ )	(FERREIRA, 2013)
Núcleo Piraquara (PEPB/RJ)	07	( $1101,9 \pm 45$ )	( $2536,4 \pm 104$ )	Este trabalho

Fonte: Pesquisa dos Autores

Os valores encontrados neste trabalho também estão abaixo da média mundial de atividade específica do  $^{40}\text{K}$  em solos, que é de  $400 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , com variação entre  $140 - 850 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . (UNSCEAR, 2000). A Tabela 5 ilustra os valores de taxa de dose absorvida obtidos para cada valor de atividade específica calculado.

Tabela 5. Valores de taxa de dose absorvida obtidos para cada valor de atividade específica do  $^{40}\text{K}$  calculado experimentalmente

Amostra	Atividade Específica do $^{40}\text{K}$ ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )	Taxa de Dose Absorvida à 1 m ( $\text{nGy.h}^{-1}$ )
A1	1101,9 ± 45	45,9 ± 1,9
A2	(1494,8 ± 61)	62,3 ± 2,5
A3	(2536,4 ± 104)	105,8 ± 4,3
A4	(2294,1 ± 93)	95,7 ± 3,9
A5	(1593,8 ± 65)	66,5 ± 2,7
A6	(1609,9 ± 65)	67,1 ± 2,7
A7	(1511,8 ± 61)	63,0 ± 2,5

Fonte: Pesquisa dos Autores

As taxas de dose absorvida variaram de 45,9 a 105,8  $\text{nGy.h}^{-1}$ , com valor médio de 72,3  $\text{nGy.h}^{-1}$ . Os valores estão dentro da faixa típica de taxa de dose absorvida no ar encontrados no mundo, que é de 10-200  $\text{nGy.h}^{-1}$ .

### Considerações Finais

Os valores de concentração de atividade do  $^{40}\text{K}$  encontrados nos sete afloramentos rochosos analisados se mostraram na mesma faixa de variação de resultados obtidos na literatura, provenientes de amostras de rochas nacionais e internacionais utilizadas como matéria prima para construção civil. Os valores da taxa de dose absorvida no ar a 1 m da superfície estão dentro da faixa típica encontrada no mundo. Isto mostra que a taxa de dose absorvida no ar proveniente do  $^{40}\text{K}$  encontrada em todas as rochas estudadas não apresenta riscos radiológicos aos visitantes destes pontos turísticos do Núcleo Piraquara – Parque Estadual da Pedra Branca/RJ.

## Agradecimentos

Os autores desejam agradecer o apoio e suporte operacional do Instituto Estadual do Ambiente – INEA/RJ, através de suas equipes, e o apoio e suporte financeiro da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, (FAPERJ), Processo E-26/200.028/2019, para o desenvolvimento deste trabalho.

## Referências

ANJOS, R. M.; VEIGA, R.; SOARES, T.; et al. Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. **Radiation Measurements**, v. 39, n°. 3. p.245, 2005.

BASTOS, Rodrigo Oliveira. Radioatividade de rochas provenientes das formações geológicas pertencentes à bacia hidrográfica do rio Tibagi. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2008.

BRASIL. Instituto Estadual do Ambiente - INEA. **Trilhas: Parque Estadual da Pedra Branca**. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

EL-ARABI, A. M. Ra-226, Th-232 and K-40 concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications. **Radiation Measurements**, v.42, nº 1. p. 94, 2006.

FERREIRA, Ademar de Oliveira. Avaliação da radioatividade natural em algumas rochas graníticas do estado do Paraná e sua utilização na construção civil. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2013.

GARCÊZ, Rodrigo Washington Dutra. Determinação das Atividades Específicas do  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  em Amostras de Fertilizantes Minerais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 10703**. Water quality – Determination of the activity concentration of radionuclides – Method by high resolution gamma ray spectrometry. Geneva, Switzerland, 2007.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 11929**. Determination os characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation – Fundamental and applications. Geneva, Switzerland, 2010.

JOURNAL OF THE INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **ICRU REPORT 52**. Particle Counting in Radioactivity Measurements. Bethesda, U.S.A., 1994.

KATHREN, R. L. Norm sources and their origins. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 49. p. 149, 1998.

KNOLL, Glenn F. Radiation Detection and Measurement. 3. Ed. John Wiley & Sons, 2000.

LAVI, N.; GROPP, F.; ALFASSI, Z. B. On the measurement of  $^{40}\text{K}$  in natural and synthetic materials by the method of high-resolution gamma ray spectrometry. **Radiation Measurement**, v. 38, nº.2. p. 139, 2004.

MAROCCHI, M.; RIGHI, S.; BARGOSSO, G. M.; GASPAROTTO, G. 2011. Natural radionuclides content and radiological hazard of commercial ornamental stones, an integrated radiometric and mineralogical-petrographic study. **Radiation Measurements**, v. 46, nº 5. p. 538, 2011.

MOURA, Claudia Lúcia. Radioatividade natural e emissão de Rn-222 em rochas ornamentais provenientes de diferentes séries magmáticas. Tese (Doutorado em Geologia regional), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Rio Claro, São Paulo, 2005.

PIRES, A. C. B. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás – Guarinos, Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, nº 1. p. 61, 1995.

SANTOS JUNIOR, José Araújo de. Avaliação radiométrica do U-238, Ra-226, Th-232 e K-40 em uma área anômala do agreste de Pernambuco. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, 2009.

SILVA, Alex Uema. Caracterização e análise de resistência para as rochas dos emboques do Túnel da Grota Funda – Rio de Janeiro, RJ. Monografia (Graduação em Geologia), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, Rio de Janeiro, 2011.

TURHAN, S. Assessment of the natural radioactivity and radiological hazards in turkish cement and its raw materials. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 50, nº. 3. P. 404, 2008.

TZORTZIS, M.; TSERTOS, H. Determination of thorium, uranium and potassium elemental concentrations in surface soils in Cyprus. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 77, nº3. p. 325, 2004.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **UNSCEAR 2000 Report Vol.1**. Sources and Effects of Ionizing Radiation”, to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York, 2000.