

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA E CONCENTRAÇÕES DE  
RADÔNIO EM SOLOS DA REGIÃO DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI,  
MUNICÍPIOS DE CACHOEIRA DO SUL/ENCRUZILHADA DO SUL, RS**

GIBRAN ROMERO MUJALLI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Ari Roisenberg

Volume I

Porto Alegre - 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA E CONCENTRAÇÕES DE  
RADÔNIO EM SOLOS DA REGIÃO DO MACIÇO SIENÍTICO PIQUIRI,  
MUNICÍPIOS DE CACHOEIRA DO SUL E ENCRUZILHADA DO SUL,  
RS**

GIBRAN ROMERO MUJALLI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Ari Roisenberg

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ruy Paulo Philipp – UFRGS

Profa. Dra. Marcia Boscato Gomes – UFRGS

Prof. Dr. Andre Weissheimer de Borba – UFSM

Dissertação de Mestrado  
apresentada como requisito  
parcial para a obtenção do  
Título de Mestre em  
Geociências

Porto Alegre - 2015

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria agradecer à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Geociências pela oportunidade de realizar este trabalho de mestrado.

À minha família, pelo apoio incondicional embora estejam muito longe.

Ao professor Arí Roisenberg quem permitiu a realização deste projeto, e ajudou muito desde os primeiros dias da estada no Brasil.

À CNEN e ao Físico Carlos Lima pela ajuda prestada nos trabalhos de campo e no empréstimo dos equipamentos.

Às pessoas que trabalham e moram na área de Piquiri que facilitaram o trabalho de campo.

Ao professor Milton Formoso pelo apoio e conhecimentos compartilhados.

## RESUMO

A concentração de radônio no interior das construções está fortemente relacionada com a concentração de urânio das rochas. O Maciço Sienítico Piquiri representa um complexo de intrusão de rochas sieníticas que apresentam altas concentrações de urânio devido a minerais acessórios como zircão, titanita, apatita e outros. O objetivo do presente estudo foi realizar medidas radiométricas e de concentração de Rn nos solos da região do Maciço Sienítico Piquiri, para entender a potencialidade de risco para a saúde das pessoas que vivem nesta região. Para realizar as medidas radiométricas foi feita uma grade de quadrículas de 4 Km<sup>2</sup> de área, usando o equipamento RS-125 para medir *in situ* e obter resultados de contagem por segundo, taxa de dose, concentração de potássio, concentração de equivalente-urânio e concentração de equivalente-tório. Por outro lado, foi utilizado o equipamento AlphaGUARD para fazer medições *in situ* de concentração de Rn no ar dos solos da região, concentrando os pontos de amostragem nas áreas de maiores valores de medidas radiométricas. Os valores de cps obtidos neste estudo variam entre 130 e 1045, os de taxa de dose, entre 28,9 nSv/h e 424,6 nSv/h, as concentrações de K, entre 0,5 % e 8,3 %, as concentrações de eU, entre 0,8 ppm e 25,8 ppm, e as concentrações de eTh, entre 3,0 ppm e 99,2 ppm. A distribuição de K delimita os contatos litológicos do Maciço sienítico Piquiri, enquanto as maiores concentrações de eTh estão na Fácies Principal do sienito, e as maiores concentrações de eU foram medidas na zona norte da Fácies Principal da intrusão. Os resultados de <sup>220</sup>Rn e <sup>222</sup>Rn variam entre 10 KBq/m<sup>3</sup> e 550 KBq/m<sup>3</sup> e entre 5 KBq/m<sup>3</sup> e 400 KBq/m<sup>3</sup>, respectivamente, para a Fácies Principal e a Fácies de Borda do Maciço Sienítico Piquiri. A partir dos resultados de concentração de Rn no ar dos solos e de análise de estruturas, conclui-se que a zona Norte e Sul da Fácies Principal do Maciço Sienítico Piquiri, representam áreas com maior concentração de Rn e, conseqüentemente, com maior risco de incidência de câncer de pulmão para os habitantes.

## ABSTRACT

Indoor radon concentration is strongly related to the uranium concentration in rocks. The Piquiri Syenite Massif represents a syenitic rock complex with high uranium concentrations related to accessory minerals as zircon, sphene, apatite, and others. The main aim of this study was to perform radiometric measurements and determine the Rn concentration in soils of the Piquiri Syenite Massif region, in order to better evaluate the risk to the health of inhabitants who live in this area. To perform radiometric measurements was made a grid with squares of 4 km<sup>2</sup> area, measuring *in situ* the counts per second, dose rate, potassium concentration, equivalent uranium concentration and equivalent thorium concentration, using the gamma spectrometer RS-125. On the other hand, it was used AlphaGUARD equipment to measure *in situ* of Rn concentrations in soil air of the region, locating sampling points according to the same grid and concentrating were the radiometric measurements were higher. The cps values obtained in this study range from 130 to 1045, the dose, range from 28.9 nSv/h to 424.6 nSv/h, K concentrations, from 0.5 % to 8.3 %, the eU concentrations, from 0.8 ppm to 25.8 ppm, and eTh concentrations, from 3.0 ppm to 99.2 ppm. The map of K concentrations defines the lithological contacts of the Piquiri Syenite Massif, while the highest concentrations of eTh were found in the Main Facies, and the highest concentrations of eU were measured in the North of the Main Facies of the intrusion. The <sup>220</sup>Rn and <sup>222</sup>Rn concentrations range between 10 KBq/m<sup>3</sup> and 550 KBq/m<sup>3</sup> and between 5 KBq/m<sup>3</sup> and 400 KBq/m<sup>3</sup>, respectively, to the Main and the Marginal Facies. From the results of Rn concentrations in soils and the analysis of structures, it was concluded that the North and South zone of the Main Facies of Piquiri Syenite Massif, possibly, represents the area with the higher concentrations of indoor Rn and, in consequence, the greatest risk of lung cancer due to this element.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo. ....	- 13 -
Figura 2. Contexto geológico do sul do Brasil. ....	- 14 -
Figura 3. Mapa geológico do Maciço Sienítico Piquiri. ....	- 15 -
Figura 4. Localização dos pontos onde foram realizadas as medidas de radiação gama. ....	- 20 -
Figura 5. Localização dos pontos onde foram feitas as medidas de Rn com AlphaGUARD. ....	- 21 -
Figura 6. Representação esquemática do AlphaGUARD e seus componentes para medição de Rn em solo. ....	- 21 -
Figura 7. Contagem por segundo (cps) e taxa de dose (Dr em nSv/h) das diferentes litologias estudadas. ....	- 24 -
Figura 8. Concentrações de K (%), eU (ppm) e eTh (ppm) das diferentes litologias estudadas. ....	- 24 -
Figura 9. Principais estruturas da área de estudo e pontos de medidas de Rn. ....	- 26 -
Figura 10. Mapa de distribuição da densidade de número de estruturas por área (N/Km <sup>2</sup> ). ....	- 27 -

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Série de decaimento do $^{238}\text{U}$ e tempo de meia-vida dos radionuclídeos.....	- 6 -
Tabela 2. Série de decaimento do $^{232}\text{Th}$ e tempo de meia-vida dos radionuclídeos.....	- 6 -
Tabela 3. Série de decaimento do $^{40}\text{K}$ e tempo de meia-vida dos radionuclídeos.....	- 7 -
Tabela 4. Série de decaimento do $^{235}\text{U}$ e tempo de meia-vida dos radionuclídeos.....	- 7 -
Tabela 5. Concentrações médias de U para alguns tipos de rochas..	- 12 -
Tabela 6. Resultados de concentração de Rn total $^{220}\text{Rn}$ e $^{222}\text{Rn}$ , e valores de umidade para os solos da região do Maciço Sienítico Piquiri.....	- 25 -
Tabela 7. Resultados de radiometria, obtidos pelo método de gama espectrômetro RS-125. Desde o ponto P01 até P34. ....	- 72 -
Tabela 8. Resultados de radiometria, obtidos pelo método de gama espectrômetro RS-125. Desde o ponto P35 até P62. ....	- 73 -

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	- 2 -
1.1. Objetivo geral .....	- 4 -
1.2. Objetivos específicos .....	- 4 -
2. ASPECTOS GERAIS E GEOLOGIA DA ÁREA .....	- 5 -
2.1. Radioatividade e Radônio .....	- 5 -
2.2 Ocorrência de urânio nas rochas e minerais.....	- 10 -
2.3. A área de estudo.....	- 12 -
2.4. Aspectos geológicos da área. ....	- 13 -
2.4.1 Petrografia do Maciço Sienítico Piquiri .....	- 16 -
3. METODOLOGIA.....	- 19 -
3.1. Trabalhos preliminares de laboratório.....	- 19 -
3.2. Trabalhos de campo .....	- 19 -
3.2.1 Medidas de radiação gama.....	- 19 -
3.2.2 Medidas de radônio. ....	- 20 -
3.2.3 Petrografia .....	- 22 -
3.3. Tratamento estatístico dos dados. ....	- 22 -
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	- 23 -
4.1 Radiometria.....	- 23 -
4.2 Radônio e estruturas tectônicas.....	- 24 -
5. TRABALHO SUBMETIDO À PUBLICAÇÃO .....	- 28 -
6. CONCLUSÕES .....	- 64 -
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	- 66 -
ANEXOS .....	- 71 -
Anexo A. Resultados radiométricos da região do Maciço Sienítico Piquiri. ....	- 72 -



### ***Sobre a Estrutura desta Dissertação***

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno de artigo submetido à publicação em uma revista científica. Por conseguinte, sua estrutura organização compreende as seguintes partes:

- 1.- Introdução sobre o tema: onde é descrita a justificativa, a importância e os objetivos do projeto de pesquisa. Seguida do estado da arte sobre o tema.
- 2.- Discussão de resultados: são apresentados alguns dos resultados mais importantes que não foram apresentados no artigo submetido à publicação, e que são pertinentes para o desenvolvimento das conclusões deste trabalho.
- 3.- Artigo submetido à publicação: artigo científico submetido à publicação em uma revista com corpo editorial permanente, escrito pelo autor durante o desenvolvimento do seu mestrado.
- 4.- Anexo: É apresentado dados numéricos em forma de tabelas formando parte dos resultados obtidos neste estudo.

## 1. INTRODUÇÃO

A geoquímica isotópica tem mostrado um desenvolvimento extraordinário nas últimas décadas, graças ao aperfeiçoamento dos métodos analíticos, que permitem a detecção de concentrações cada vez menores, contribuindo para a compreensão da distribuição e evolução dos isótopos nos vários compartimentos naturais.

Isótopos são átomos que contem o mesmo número atômico, mas diferente número de massa, podendo ser classificados em isótopos estáveis e instáveis (radioativos) (Kearey *et al.*, 2002). Estes últimos apresentam um átomo que pode se desintegrar espontaneamente, transformando-se em outro elemento e liberando uma grande quantidade de radiação nuclear (energia ou partículas), em um processo chamado de decaimento nuclear ou desintegração (IAEA, 2003). Existe um grande número de elementos com isótopos radioativos de ocorrência natural, porém, as séries de decaimento do K, U, e Th são as mais estudadas, porque possuem isótopos radioativos que produzem radiação gama suficiente para ser medida com espectrômetros de raios gama. Estas três séries constituem a maior parte da radiação natural emitida pelos minerais (IAEA, 2003). Por outra parte, a série de decaimento do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e do  $^{235}\text{U}$  produz radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) e actinônio ( $^{219}\text{Rn}$ ), respectivamente. O radônio (Rn) é o gás nobre mais pesado, com um número atômico de 86, encontrando-se na natureza confinado nos minerais, dissolvido em águas e também como gás livre na atmosfera (Ferronsky e Polyakov, 2012).

O radônio (Rn) é o único elemento gasoso nas séries de decaimento radioativo do urânio e do tório, sendo naturalmente gerado em rochas, solos e materiais de construção, que continham os átomos-pai, sendo dissipado rapidamente na atmosfera. No entanto, pode ser acumulado em altas concentrações em locais nos quais a ventilação é deficiente (Ferronsky e Polyakov, 2012). Por esta razão, o Rn é considerado o maior contribuidor à exposição da radiação natural (WHO, 2009). Por outro lado, estudos epidemiológicos recentes suportam a relação entre a concentração de Rn em edificações e o câncer de pulmão, sendo considerado o principal causador desta doença em pessoas que nunca fumaram (Appleton, 2005; Pearce & Boyle, 2005; WHO, 2009; Torres-Durán *et al.*, 2014).

A relação entre câncer de pulmão e a concentração de radônio no ar, está gerando um crescente interesse, principalmente nos países desenvolvidos. O conhecimento de sua distribuição no espaço geográfico e em particular, nas edificações permite estabelecer mapas de risco de câncer de pulmão, devido ao registro deste elemento (Appleton, 2005; Smethurst *et al.*, 2008; WHO, 2009; Pereira & Neves, 2012; Scheib *et al.*, 2013; Pasculli *et al.*, 2014).

As altas concentrações de Rn em residências, edifícios e em pavilhões industriais, geralmente, estão diretamente relacionadas com a geologia da área, embora também possa existir importante contribuição a partir de materiais de construção que contenham os elementos-pai do Rn (Appleton, 2005). As principais rochas que podem gerar grandes quantidades de Rn também apresentam altas concentrações de U e Th. Contudo, o torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) tem um tempo de meia-vida pequeno ( $t_{1/2} = 55,6$  segundos). Comparado com o radônio-222 ( $t_{1/2} = 3,8$  dias). Desta forma, este último pode se transportar a maiores distâncias pelas fraturas e pelos poros de materiais naturais e artificiais permeáveis (Appleton, 2005; Ferronsky e Polyakov, 2012). Rochas-intrusivas alcalinas, folhelhos carbonosos e rochas fosfáticas são, em geral, as rochas que apresentam as maiores concentrações de U, podendo gerar importantes quantidades de Rn na atmosfera (Appleton, 2005).

No Brasil o câncer de pulmão é umas das causas mais comuns de mortalidade em homens e mulheres (Castro *et al.*, 2004) e por esta razão é crescente o interesse no conhecimento da relação entre esta doença e o radônio. Nos últimos anos, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) tem realizado estudos para determinar as concentrações de radônio em galerias de minas subterrâneas, em águas subterrâneas, em solos e no ar de edificações, onde pode existir acumulação de radônio (Buffon, 2002; Silva, 2005; Santos, 2008; Fianco *et al.*, 2012).

Na região centro-leste do Estado Rio Grande do Sul, especificamente nos Municípios Cachoeira do Sul e Encruzilhada do Sul, aflora o chamado Maciço Sienítico Piquiri, que representa uma intrusão de rochas com afinidade alcalina com elevadas concentrações de U e de Elementos das Terras Raras Leves-ETRL (Nardi *et al.*, 2007). Além disso, tais rochas constituem um material largamente utilizado

como material ornamental no Brasil e no exterior, para onde é exportado. Portanto, resulta de interesse conhecer a concentração de radônio no ar e nos solos desta região, para avaliar melhor o risco para a saúde das pessoas que vivem na área.

Este trabalho tem como objetivos:

### *1.1. Objetivo geral*

Avaliar a relação entre as medidas de radiação-gama e as concentrações de Rn nos solos da região do Maciço Sienítico Piquiri, RS.

### *1.2. Objetivos específicos*

1. Realizar um mapa dos principais lineamentos tectônicos da região do Maciço Sienítico Piquiri, RS.
- 2- Realizar levantamento de campo com espectrômetro de raios-gama, obtendo-se a contagem por segundo, a taxa de dose e as concentrações de K, U e Th na região do Maciço Sienítico Piquiri.
- 3.- Determinar as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  nos solos da região do Maciço Sienítico Piquiri, utilizando o equipamento AlphaGUARD PQ 2000.

## 2. ASPECTOS GERAIS E GEOLOGIA DA ÁREA

Neste capítulo apresentam-se os fundamentos teóricos relacionados com o tema da dissertação, assim como alguns antecedentes e informações sobre a área de estudo, utilizados para discussão dos resultados obtidos.

### 2.1. Radioatividade e Radônio

Elementos cujos átomos contem o mesmo número atômico (mesmo número de prótons), mas diferente número de massa (número de prótons e nêutrons) são denominados isótopos. Existem numerosos isótopos de elementos, porém, sua abundancia depende da estabilidade de cada átomo e dos processos que controlam sua distribuição na terra. Desta maneira, existem isótopos estáveis e isótopos instáveis. Estes últimos apresentam um átomo que pode se desintegrar espontaneamente, transformando-se em outro elemento produzindo radioatividade de três tipos diferentes (Kearey *et al.*, 2002):

- Partículas alfa: são núcleos de  $^4\text{He}$  produzidos pela desintegração de alguns núcleos que formam outros elementos com uma diferença de número atômico de 2 e uma diferença de número de massa de 4.
- Partículas beta: são elétrons que são produzidos quando um nêutron forma um próton, o nêutron fica no núcleo pelo qual o número atômico do núcleo não varia.
- Radiação gama: Radiação eletromagnéticas emitida durante a desintegração, ou na captação de elétrons.

Os núcleos de isótopos radiativos são os radionuclídeos e o processo é chamado de decaimento nuclear ou desintegração (IAEA, 2003). Existem aproximadamente 50 elementos radiativos de ocorrência natural, a maioria destes elementos são raros ou apresentam uma baixa radioatividade. Por outra parte, o estudo radiométrico é um método geofísico pouco usado porque é muito específico, e seu principal uso na exploração geofísica é nos estudos de sondagens. Os elementos de principal

interesse na exploração radiométrica são o urânio ( $^{238}\text{U}$ ), tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e potássio ( $^{40}\text{K}$ ) (Kearey *et al.*, 2002).

O tempo preciso para que um radionuclídeo decair a metade de sua concentração é conhecido como tempo de meia-vida ( $T_{1/2}$ ), é muito usado nas equações de cinética na realização de datações. Nas tabelas 1, 2, 3 e 4 apresentam-se as series de decaimento do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  e  $^{235}\text{U}$  respectivamente, ressaltando que o radônio é o único elemento gasoso radioativo e forma parte nas séries de decaimento do urânio e do tório.

Tabela 1. Série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  e tempo de meia-vida dos radionuclídeos (modificado de Milsom, 2003).

Nuclídeo	Isótopo filho	T1/2	Nuclídeo	Isótopo filho	T1/2
$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{Th}$	$4,468 \times 10^9$ a	$^{218}\text{Po}$	$^{214}\text{Pb}$	3,05 m
$^{234}\text{Th}$	$^{234}\text{Pa}$	24,1 d	$^{214}\text{Pb}$	$^{214}\text{Bi}$	26,8 m
$^{234}\text{Pa}$	$^{234}\text{U}$	1,18 m	$^{214}\text{Bi}$	$^{214}\text{Po}$	19,7 m
$^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}$	$2,48 \times 10^5$ a	$^{214}\text{Po}$	$^{210}\text{Pb}$	164 $\mu\text{s}$
$^{230}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$7,52 \times 10^4$ a	$^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Bi}$	22 a
$^{226}\text{Ra}$	$^{222}\text{Rn}$	1602 a	$^{210}\text{Bi}$	$^{210}\text{Po}$	5,02 d
$^{222}\text{Rn}$	$^{218}\text{Po}$	3,825 d	$^{210}\text{Po}$	$^{206}\text{Pb}$	138,3 d

Tabela 2. Série de decaimento do  $^{232}\text{Th}$  e tempo de meia-vida dos radionuclídeos (modificado de Milsom, 2003).

Nuclídeo	Isótopo filho	T1/2
$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Ra}$	$1,39 \times 10^{10}$ a
$^{228}\text{Ra}$	$^{228}\text{Ac}$	5,75 a
$^{228}\text{Ac}$	$^{228}\text{Th}$	1,913 a
$^{224}\text{Ra}$	$^{220}\text{Rn}$	3,64 d
$^{220}\text{Rn}$	$^{216}\text{Po}$	55,6 s
$^{216}\text{Po}$	$^{212}\text{Pb}$	0,145 s
$^{212}\text{Pb}$	$^{212}\text{Bi}$	10,64 h
$^{212}\text{Bi}$	$^{212}\text{Po}$ (66 %)	40 m
$^{212}\text{Po}$	$^{208}\text{Pb}$	304 ns
$^{212}\text{Bi}$	$^{208}\text{Tl}$ (34 %)	97,3 m
$^{208}\text{Tl}$	$^{208}\text{Pb}$	3,1 m

Tabela 3. Série de decaimento do  $^{40}\text{K}$  e tempo de meia-vida dos radionuclídeos (modificado de Milsom, 2003).

Nuclídeo	Isótopo filho	T1/2
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{Ca}$ (89 %)	$1,45 \times 10^9$ a
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{Ar}$ (11 %)	$1,17 \times 10^{10}$ a

Tabela 4. Série de decaimento do  $^{235}\text{U}$  e tempo de meia-vida dos radionuclídeos (modificado de IAEA, 2003).

Nuclídeo	Isótopo filho	T1/2
$^{235}\text{U}$	$^{231}\text{Th}$	$7,13 \times 10^8$ a
$^{231}\text{Th}$	$^{231}\text{Pa}$	25,64 h
$^{231}\text{Pa}$	$^{227}\text{Ac}$	$3,43 \times 10^4$ a
$^{227}\text{Ac}$	$^{227}\text{Th}$	22 a
$^{227}\text{Th}$	$^{223}\text{Ra}$	18,17 d
$^{223}\text{Ra}$	$^{219}\text{Rn}$	11,68 d
$^{219}\text{Rn}$	$^{215}\text{Po}$	3,92 s
$^{215}\text{Po}$	$^{211}\text{Pb}$	1,83 ms
$^{211}\text{Pb}$	$^{211}\text{Bi}$	36,1 m
$^{211}\text{Bi}$	$^{207}\text{Tl}$	2,16 m
$^{207}\text{Tl}$	$^{207}\text{Pb}$	4,79 m
$^{210}\text{Pb}$	$^{210}\text{Bi}$	22 a
$^{210}\text{Bi}$	$^{210}\text{Po}$	5,02 d
$^{210}\text{Po}$	$^{206}\text{Pb}$	138,3 d

O radônio (Rn) é o gás nobre mais pesado, com um número atômico de 86, encontrando-se na natureza preso nos minerais, dissolvido em águas subterrâneas e também como gás livre na atmosfera. Existem três isótopos naturais de radônio, o radônio-222 ( $^{222}\text{Rn}$  ou radônio), radônio-220 ( $^{220}\text{Rn}$  ou torônio) e radônio-219 ( $^{219}\text{Rn}$  ou actinônio). Estes três isótopos de radônio proveem do decaimento radioativo de isótopos de radio (radio-226, radio-224 e radio-223 respectivamente) (Ferronsky e Polyakov, 2012). O actinônio ( $^{219}\text{Rn}$ ) apresenta um tempo de meia-vida muito baixo (3,92 segundos), e junto a baixa ocorrência do  $^{235}\text{U}$ , limitam a abundância do  $^{219}\text{Rn}$  natural na atmosfera (Appleton, 2005). No caso do torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) o tempo de meia-vida é um pouco maior do que o actinônio (55,6 segundos), porém, é baixo em relação ao radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), que apresenta um tempo de meia-vida de 3,825 dias. Portanto, na maioria dos estudos ambientais, o isótopo de Rn mais estudado é o  $^{222}\text{Rn}$ , o qual, pode ser transportado por maiores distâncias do que os outros

isótopos de Rn, além disso, sua ocorrência está relacionada com a mobilidade do  $^{226}\text{Ra}$ , que por sua vez está relacionada com o comportamento geoquímico do  $^{238}\text{U}$  (Appleton, 2005).

Os níveis relativamente altos de Rn no ar estão relacionados diretamente com a geologia da área, dependendo do tipo de rocha encontrada nessa localidade. Em geral, as rochas metamórficas, granitos, folhelhos carbonosos, e as rochas carbonáticas e fosfáticas com altas concentrações de urânio e rádio. Os folhelhos carbonosos podem acumular grandes quantidades de urânio devido ao seu ambiente de formação redutor, o qual reduz o íon uranilo, encontrado nas águas ( $\text{UO}_2^{2+}$ ), precipitando-o na rocha. Por outra parte, o urânio nas rochas ígneas encontra-se, principalmente, em maior concentração nas rochas intrusivas alcalinas como sienitos, granitos e granodioritos (Appleton, 2005).

A taxa de liberação de Rn de rochas e solos é controlada pela concentração do urânio e pelos tipos de minerais nos quais o urânio encontra-se. A solubilidade, o tamanho de grão e a estrutura interna são os principais fatores mineralógicos que afetam a liberação do Rn. Geralmente, os solos liberam maiores quantidades de Rn do que as rochas, devido principalmente ao seu menor tamanho de grão e também porque estes grãos apresentam-se mais fragmentados (Appleton, 2005). No momento no qual o radônio é liberado dos minerais, sua migração até a atmosfera, e até dentro das construções, vai depender de:

- Características da rocha, como porosidade, permeabilidade e estruturas geológicas (Appleton, 2005).
- A natureza do fluxo pelo qual é transportado o radônio. Como gás, águas subterrâneas ou águas superficiais, que controlam o mecanismo de transporte do Rn (Appleton, 2005).
- O clima, controlando as variações temporais de liberação de Rn na atmosfera. Geralmente, a máxima concentração de Rn é encontrada no amanhecer, e a mínima no anoitecer (Pascale *et al.*, 2014).



- A permeabilidade, porosidade e umidade dos solos. Geralmente, as concentrações de radônio no solo diminui em função do aumento da umidade dos solos (Appleton, 2005).

- Características das construções. Onde as fissuras no chão, a porosidade e permeabilidade do material de construção vão controlar a entrada do Rn nas construções (Appleton, 2005).

- Estruturas geológicas. O Rn pode migrar preferencialmente através de zonas de fraturas, porém, somente nos caminhos cuja permeabilidade tenha sido incrementada pela atividade sísmica (Lombardi & Voltattorni, 2010).

A maior parte do Rn que é liberado até a atmosfera não representa um risco na saúde das pessoas. Contudo, o Rn pode ser acumulado em construções, cavernas e minas, que apresentarem uma baixa circulação de ar, podendo afetar a saúde de pessoas. A radiação gerada pelo Rn pode produzir mudanças em outros átomos ao seu redor, principalmente ionizando-os. O Rn libera principalmente partículas alfa, as quais não podem penetrar por longas distâncias mas têm uma alta capacidade de ionização de átomos, podendo danificar tecidos orgânicos e até alterar o DNA. Por outra parte, o Rn também produz outros radionuclídeos instáveis que por sua vez podem ser precipitados nos pulmões devido a sua afinidade na fase sólida, liberando partículas alfa ao decair (Appleton, 2005). Desta maneira, uma alta exposição ao radônio por um tempo prolongado está relacionada com câncer de pulmão. Não obstante, é possível que o radônio esteja relacionado também com câncer no estômago, pela ingestão de água com altas concentrações de  $^{226}\text{Ra}$  e radônio, e câncer nas vias respiratórias (WHO, 2009).

Buffon (2002) realizou uma integração de dados de neoplasia do estado Rio Grande do Sul com dados aeroradiométricos e de geologia, obtendo boas correlações principalmente nas áreas de intrusões ígneas do escudo Sul-riograndense, nas quais ele supõe que tem um alto risco de câncer devido ao radônio.

Silva (2005) determinou as concentrações de radônio em residências da cidade de São Paulo, usando detectores plásticos LR115 e CR39, encontrando concentrações

de radônio menores ou igual que  $109 \text{ Bq/m}^3$ , sendo concentrações baixas que não representam um risco direto na saúde de pessoas. Também, encontrou que as residências com baixa ventilação, localização em andares térreos e com pisos de cimento ou de cerâmica apresentavam os maiores valores de concentração de radônio, sendo estas características importantes nos estudos de radônio em residências.

Fianco *et al.* (2012) determinaram as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  nas águas subterrâneas e em solos da região de Porto Alegre usando o equipamento AlphaGUARD, eles encontraram localidades onde a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  superava os  $100 \text{ Bq/L}$  e também obtiveram uma boa correlação entre o  $^{222}\text{Rn}$  das águas subterrâneas e o urânio das rochas, sugerindo que o radônio é liberado da rocha e é transportado pelas águas subterrâneas.

## 2.2 Ocorrência de urânio nas rochas e minerais

O urânio é um elemento litófilo e está principalmente confinado à crosta superior félsica, sendo menos abundante que os metais básicos, mas mais abundante que os metais preciosos e outros de uso comum como bismuto, mercúrio e tungstênio. O urânio combina-se como cátion ou anion com ao menos 20 elementos. É um elemento essencial em pelo menos 100 minerais e um constituinte menor em outros 100, em muitos dos quais é acompanhado pelo tório. O urânio também tem afinidade por alguns compostos biogênicos e carbonosos, com os quais associa-se em alguns folhelhos, carvões e derivados de petróleo (Butler & Schnabel, 1956).

O urânio é geralmente um elemento extrínseco na maioria dos minerais formados por processos ígneos tais como zircão, allanita, monazita, apatita, titanita, perovskita, xenotina e baddeleyita, mas é um elemento essencial em aqueles minerais que constituem os depósitos de urânio, sendo a uraninita e a coffinita (silicato de urânio) os minerais de urânio mais comuns em depósitos não oxidados (Butler & Schnabel, 1956). O urânio não ocorre naturalmente como um elemento nativo, pois ao reagir com a água forma um óxido ou hidróxido. O principal composto primário de urânio é o dióxido ( $\text{UO}_2$ ) que ocorre na variedade bem cristalizada uraninita, ou na forma microcristalina pechblenda. Em virtude da solubilidade dos

minerais de urânio, esse elemento pode ser transportado por água superficial ou subterrânea até ambientes redutores onde se precipita na forma de coffinita (Duarte, 2002).

O urânio está presente nas rochas ígneas, sendo comumente mais abundante em rochas félsicas, especialmente em granitos ricos em sódio, sienitos e fonólitos. A concentração média de urânio na maioria dos tipos de rochas ígneas intrusivas varia de menos de 1 ppm em rochas gabróicas a cerca de 4 ppm em rochas graníticas, embora algumas rochas alcalinas apresentem concentrações de urânio de até 300 a 400 ppm. O padrão geral de distribuição em rochas extrusivas é praticamente idêntico ao de suas contrapartes intrusivas (Butler & Schnabel, 1956).

Uma parte considerável do urânio em rochas graníticas e sieníticas está contido nos principais minerais formadores de rochas, mas grande parte dele está concentrado, junto com tório, em minerais acessórios comuns. Parte do urânio nas rochas está fortemente preso em minerais insolúveis, e o urânio facilmente solúvel pode ser removido da rocha durante o intemperismo ou parte dele pode ser localmente reconcentrado para enriquecer partes próximas da superfície da rocha em urânio (Butler & Schnabel, 1956). A Tabela 5 apresenta as concentrações médias de urânio para alguns tipos de rocha.

Tabela 5. Concentrações médias de U para alguns tipos de rochas (modificado de Rogers & Adams, 1969).

Rochas		U (ppm)
Ígneas	Graníticas	4,19
	Gabróides	0,84
	Ultramáficas	0,022
	Eclogitos	0,20
	Intrusivas alcalinas	9,82
	Basálticas	0,43
Sedimentares	Arenitos	1,48
	Folhelhos	3,25
	Bauxita	11,4
	Bentonita	5,0
	Calcários	2,19
	Fosfáticas	50-300
	Evaporitos	<0,1
	Areias	3,0
	Lamas	2,3
Metamórficas	Anfibolito	3,5
	Gnaisse	2,2
	Paragnaisse	4,5
	Granulito	4,9
	Ortognaisse	3,6
	Mármore	0,17
	Filito	1,9
	Xisto	2,5

### 2.3. A área de estudo

O Maciço Sienítico Piquiri localiza-se na região centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul, especificamente na zona leste da Folha Capané (SH.22-Y-A-III-3) e no oeste da Folha Passo das Canas (SH.22-Y-A-III-4). A distância entre o corpo intrusivo e Porto Alegre é de aproximadamente 180 Km. O acesso pode ser feito pela rodovia BR-290, nas imediações de Cachoeira do Sul, através da entrada para a Vila Piquiri (Fig. 1). Outra via de acesso a partir da cidade de Encruzilhada do sul leva à zona sul do corpo intrusivo.

Uma das principais atividades econômicas da região do Piquiri é a extração da rocha para uso ornamental, existindo pedreiras de grande porte. Como a Mineração Serra Geral e a Mineração Cerro dos Peixotos. Estas pedreiras produzem como rejeito

blocos menores distribuídos à população da área, que a utiliza como material de construção local.

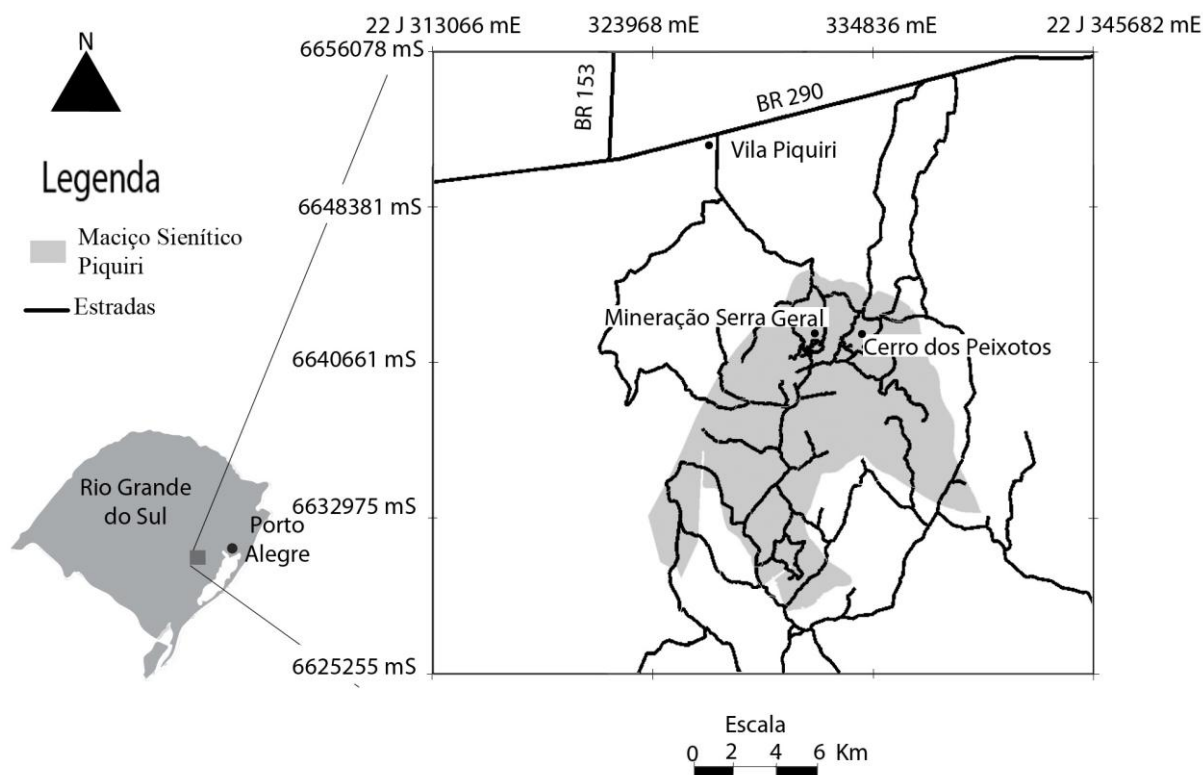


Figura 1. Localização da área de estudo.

#### 2.4. Aspectos geológicos da área.

O Escudo Sul-Rio-Grandense (Fig. 2) é resultante de processos de geração e deformação de crosta continental que ocorreram em dois ciclos orogênicos distintos, o Ciclo Transamazônico (2,26 Ga – 2,00 Ga) e o Ciclo Brasileiro (900 Ma – 535 Ma) (Hartmann *et al.*, 2007). O Ciclo Brasileiro-Pan-Africano está marcado por magmatismo de arco com idades entre 760 Ma e 700 Ma (Babinski *et al.*, 1997) e um magmatismo pós-colisional com idades desde 650 Ma até 550 Ma (Bitencourt & Nardi, 2000).

No estado do Rio Grande do Sul, destaca-se no Escudo Sul-Rio-Grandense o Cinturão Dom Feliciano, que é constituído por três unidades: Terreno São Gabriel, Terreno Tijucas e Batólito Pelotas. Representando um período de retrabalhamento crustal.

O Batólito Pelotas, situado na porção leste do Escudo Sul-Rio-Grandense, consiste predominantemente de rochas graníticas com idades entre 650 Ma e 550 Ma e é constituído por seis suítes graníticas de composição variável e uma suíte sienítica (Philipp *et al.*, 2002).

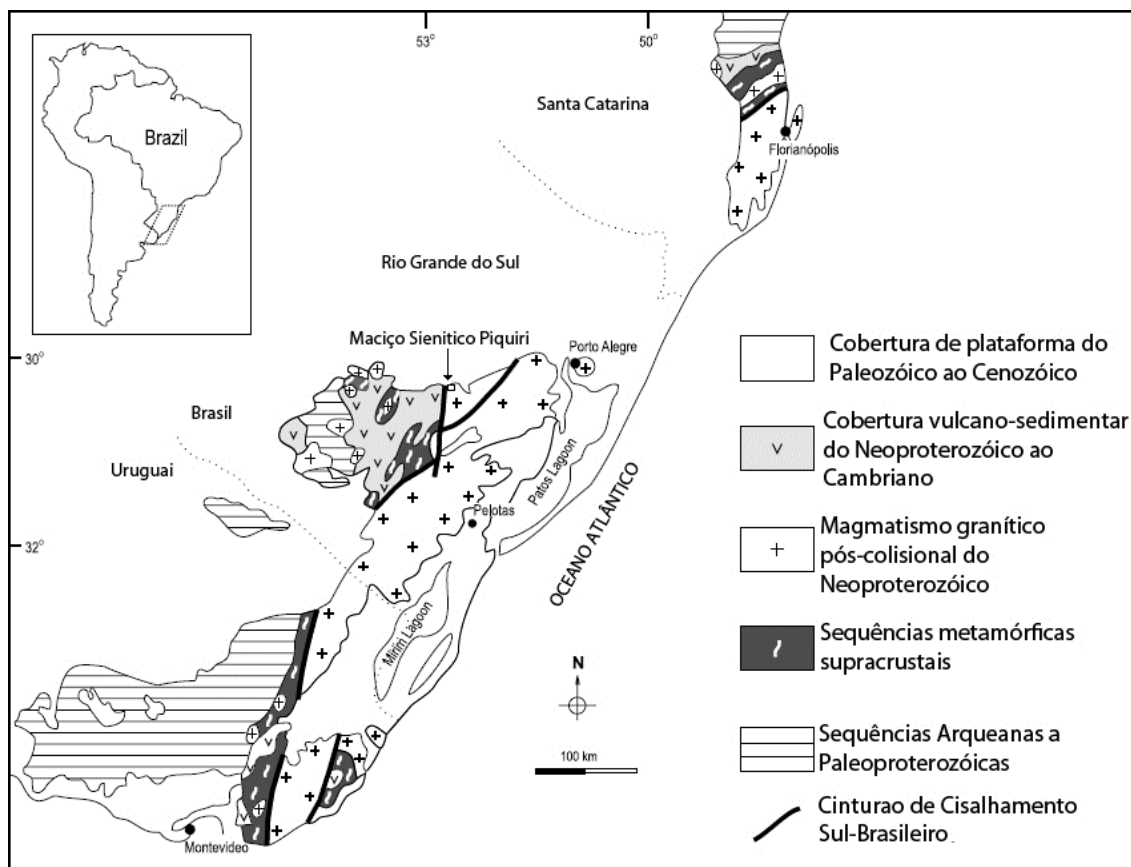


Figura 2. Contexto geológico do sul do Brasil (modificado de Nardi *et al.*, 2008).

O Maciço Sienítico Piquiri (Fig. 3) representa a suíte sienítica do Batólito Pelotas. Possuindo forma semicircular, área aproximada de 150 Km<sup>2</sup> e idades de 611 Ma ± 3 Ma, determinadas pelo método Pb-Pb em cristais de zircão (Philipp *et al.*, 2002). Este complexo é considerado parte do magmatismo pós-colisional do Ciclo Brasileiro e possivelmente formado a partir de magma sienítico de afinidade shoshonítica, sofrendo processos de mistura com magmas lamprofíricos (Stabel *et al.*, 2001; Nardi *et al.*, 2007; Nardi *et al.*, 2008). O Maciço Sienítico Piquiri é intrudido por granitos grosseiros do Complexo Encruzilhada, os quais se projetam, em planta, para o interior do sienito na porção sudeste, conferindo-lhe a forma de ferradura. Por outro lado, as rochas encaixantes do corpo principal do Maciço Sienítico Piquiri apresentam composição, textura, gênese e idades variadas. No leste, nordeste e,

em parte, ao norte, as rochas encaixantes são blastomilonitos derivados de gnaisses estrutural e texturalmente variados e, localmente, de granitos granatíferos (Jost *et al.*, 1985; Philipp *et al.*, 2002; Nardi *et al.*, 2007). No noroeste ocorrem xistos pelíticos e quartzitos. No oeste e sudoeste o Maciço Sienítico Piquiri apresenta um contato por falha com ritmitos do Membro Mangueirão (Proterozoico superior), que estão parcialmente encobertos por conglomerados Eo-Paleozóicos a Permo-Carboníferos. Por outro lado, a Sudoeste, o sienito justapõe-se com uma faixa de milonitos com cerca de 4.000 m de largura (Jost *et al.*, 1985).

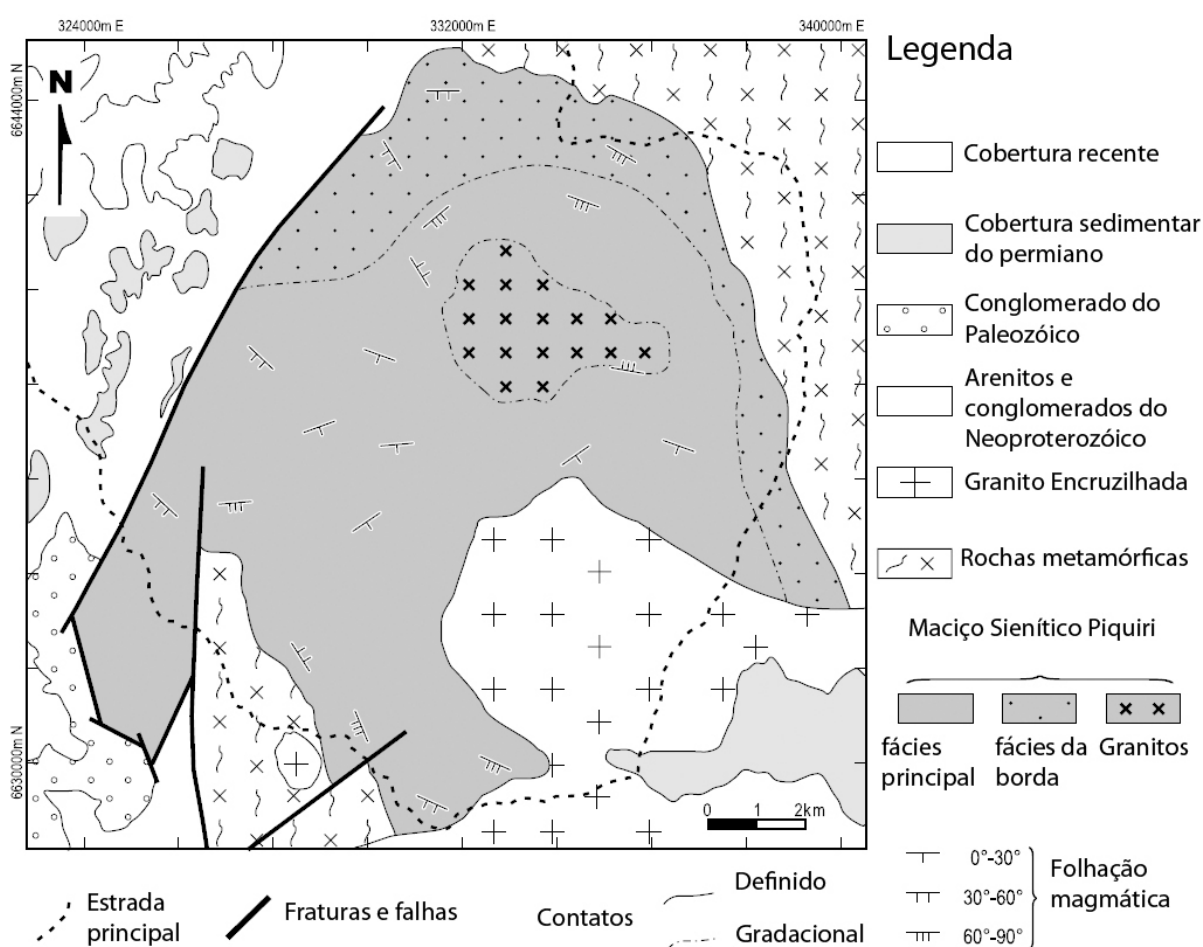


Figura 3. Mapa geológico do Maciço Sienítico Piquiri (Modificado de Nardi *et al.*, 2008).

O Maciço Sienítico Piquiri está composto por quatro principais tipos litológicos, apresentando contatos internos gradativos. No interior da intrusão predomina o quartzo-feldspato alcalino sienito de granulometria média a grossa, e na região da borda da intrusão predominam sienitos a quartzo monzonitos finos a médios. Também ocorrem fácies de flogopita-diopsídio sienitos, que mostram características

de mistura com feldspato-alcálico sienitos. Um quarto tipo litológico está presente no centro da intrusão e varia de sienogranitos a feldspato-alcálico granitos, representando a etapa final da cristalização, contendo autólitos de sienito (Nardi *et al.*, 2007).

Cinco tipos de xenólitos são registrados no Maciço Sienítico Piquiri: (i) enclaves máficos microgranulares de composição diorítica; (ii) acumulações de autólitos de piroxênios e micas, representando um estágio de cristalização precoce; (iii) fragmentos de sienito da margem resfriada; (iv) xenólitos de rochas metamórficas (Nardi *et al.*, 2007; Nardi *et al.*, 2008); e (v) enclaves microgranulares lamprofíricos que são produto da mistura entre magma sienítico e lamprofírico (Vieira *et al.*, 1989).

Os latossolos e litossolos no Maciço Sienítico Piquiri possuem cor vermelha amarelada e são, em geral, rasos e bem drenados, com espessuras variáveis entre poucos centímetros até poucos metros e horizontes mal definidos. Nas áreas mais elevadas da região, onde a espessura de solos pode ser reduzida, afloramentos de rocha são encontrados misturados com areias feldspáticas a quartzo-feldspáticas grosseiras, com conteúdo menor de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Nas áreas baixas, a espessura dos solos cresce, bem como o conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, aos quais se soma matéria orgânica, localmente abundante.

#### *2.4.1 Petrografia do Maciço Sienítico Piquiri*

As rochas do Maciço Sienítico Piquiri são holocristalinas de cor castanho avermelhado, textura equigranular de fina a grossa e arranjo cristalino, localmente porfírico. As fácies mais finas correspondem à margem resfriada da intrusão. A estrutura apresenta pronunciada orientação magmática, evidenciada pelo arranjo subparalelo dos cristais tabulares de feldspato alcálico.

A mineralogia essencial compreendem feldspato alcálico, anfibólio e piroxenio. O quartzo é mais frequente na fácies de sienogranitos e alcali-feldspato granitos. Os minerais compreendem plagioclásio precoce (andesina), plagioclásio intersticial (albita), biotita, titanita, ilmenita, apatita e zircão. A mineralogia de alteração é



constituída por clorita, epidoto, muscovita e sericita (Jost *et al.*, 1985; Stabel *et al.*, 2001).

O feldspato alcalino ocorre em grosseiros cristais euédricos, pertitizados, com até 2 cm que definem a orientação magmática destas rochas. O maclamento segundo Carlsbad está permanentemente presente, às vezes superposto por maclamento em rede, em particular na fácies da borda, indicando a inversão de ortoclásio para microclínio nas fases finais de cristalização. Inclusões de piroxênios, anfibólios, titanita, ilmenita, plagioclásio precoce, biotita, apatita e quartzo são comuns.

O anfibólio ocorre como cristais euédricos a subédricos, de dimensões variáveis desde poucos milímetros até 1 cm de comprimento, resultando como produto de uralitização de piroxênio e exibindo biotitização frequente. De acordo com estudos de microsonda eletrônica a composição varia de edenita, magnesiohornblenda a actinolita (Stabel *et al.*, 2001). Inclusões de titanita, quartzo, magnetita e ilmenita são comuns. Cloritização é registrada principalmente nos cristais maiores de anfibólio.

São descritos dois tipos de piroxênios nas rochas do Maciço Sienítico Piquiri, diopsídio, que ocorre principalmente na borda da intrusão e augita a aegirina-augita, esta mais comum no centro.

O plagioclásio precoce é escasso e constitui cristais subédricos turvos e alterados de andesina, inclusos no feldspato alcalino. O plagioclásio tardio aparece límpido como resíduos intersticiais de albita exibindo maclamentos nítidos e, não raro, interconectados com pertitas.

O quartzo, nem sempre presente, ocorre em três variedades texturais: cristais globulares eutectóides inclusos em feldspato alcalino, inclusões em anfibólio e como resíduos anédricos de cristalização.

A biotita ocorre como lamelas anédricas isoladas, com até 1 cm de comprimento ou formando agregados de granulação fina, associadas com anfibólios e piroxênios. Stabel *et al.* (2001) identificaram as micas como flogopita, derivada da transformação tardia dos piroxênios e anfibólios.

A titanita é relativamente abundante em todas as fácies e está presente como cristais euédricos cujas dimensões variam entre 0,1 mm e 1,0 mm, ou como inclusões anédricas originadas como subprodutos dos processos de uralitização e biotitização.

Ilmenita, apatita e zircão são os acessórios de forma euédrica características, com dimensões reduzidas, geralmente constituindo inclusões em feldspatos, anfibólio, piroxênio e biotita. Stabel *et al.* (2001) identificaram entre os minerais metálicos, além da ilmenita, galena, pirita, calcopirita e pirrotita.

O epidoto e a muscovita são raros, o primeiro ocorre como fase intersticial ou derivado como produto de alteração do piroxênio e anfibólio, juntamente com a clorita. A muscovita apresenta-se como lamelas deformadas, sugerindo ser parte de uma fase de assimilação de rochas encaixantes.

Por outro lado, os xenólitos presentes no Maciço Sienítico Piquiri possuem formas elipsoidais concordantes com a orientação magmática e com dimensões variáveis entre 10 e 80 cm de comprimento. O contato dos xenólitos com a rocha hospedeira é agudo e marcado por uma delgada camada de minerais máficos na porção sienítica. São, em geral, microgranulares, podendo ter fenocristais de diopsídio e apatita (Vieira *et al.*, 1989).

Mineralogicamente os xenólitos microgranulares são compostos por diopsídio (37 % a 50 %), biotita (25 % a 36 %), apatita (3 % a 5 %), minerais metálicos e zircão (<1 %) conforme Vieira *et al.* (1989). Em outros casos, os xenólitos possuem composição diorítica e resultam como produtos da mistura de magmas lamprofíricos ou de tipo minette com magmas sieníticos (Vieira *et al.*, 1989; Nardi *et al.*, 2007).

### 3. METODOLOGIA

Nesta secção explica-se detalhadamente a metodologia desenvolvida para atender aos objetivos do presente trabalho.

#### 3.1. *Trabalhos preliminares de laboratório*

Inicialmente foi analisada a imagem de satélite extraída do projeto *Shuttle Radar Topography Mission*, SRTM (USGS), sendo marcados os principais lineamentos tectônicos que cortam o Maciço Sienítico Piquiri. A imagem foi trabalhada usando o programa de edição GIMP, gerando um sombreamento com o objetivo de resaltar o relevo, determinando-se a densidade de lineamentos em cada quadrícula de 4 Km<sup>2</sup> de área (2 Km x 2 Km de lado). Com esta malha foi estabelecida a amostragem, totalizando 52 pontos em seu conjunto (Fig. 4).

#### 3.2. *Trabalhos de campo*

##### 3.2.1 *Medidas de radiação gama*

As medições de radiação gama foram feitas utilizando o equipamento gama espectrômetro RS-125 e, realizando-se a análise *in situ* com um tempo de medida de 120 segundos. O detector deste equipamento é um cristal de NaI(Tl) de 103 cm<sup>3</sup>, com capacidade de ler K, U, Th, taxa de dose e contagens totais por segundo (cps). Este equipamento, disponibilizado inicialmente pelo Prof. Dr. Leo Hartmann e pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), discrimina a contagem total, a energia de 2,62 MeV pertencente ao pico do <sup>208</sup>Tl (tório), a energia de 1,76 MeV do <sup>214</sup>Bi (urânio) e a energia de 1,46 MeV do <sup>40</sup>K (potássio). Não obstante, mede uma faixa de energia para cada pico, desde 2,42 MeV até 2,82 MeV, desde 1,66 MeV até 1,86 MeV e desde 1,36 MeV até 1,56 MeV respectivamente. As concentrações de cada elemento pai são estimadas, tendo-se em conta o equilíbrio entre os radioelementos principais com seus filhos (Milsom, 2003).

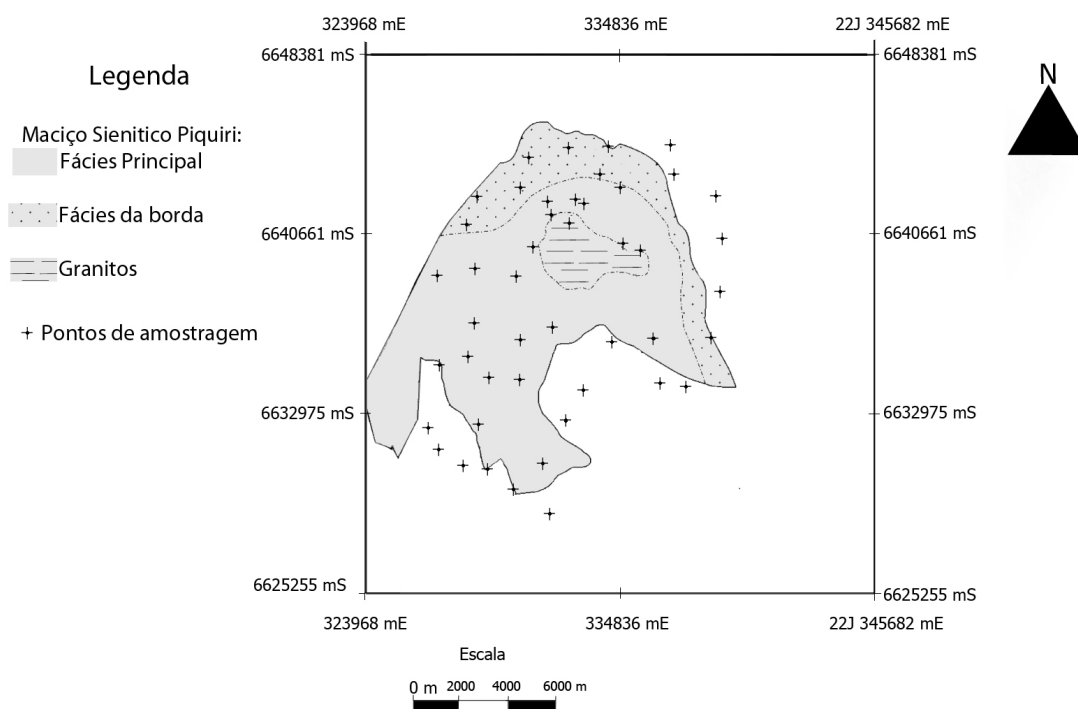


Figura 4. Localização dos pontos onde foram realizadas as medidas de radiação gama.

### 3.2.2 Medidas de radônio.

A partir dos resultados de espectrometria de raios gama, foram seleccionados 20 pontos para determinação de radônio em solo, visando cobrir a área que mostrou maiores valores de radiação de urânio e tório. Os pontos de medição de radônio nem sempre correspondem com o ponto de medição de radiação gama, porém, são próximos (Fig.5). As concentrações de radônio nos solos foram medidas *in situ* utilizando o equipamento AlphaGUARD PQ 2000, disponibilizado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

O equipamento AlphaGUARD conta com uma unidade para determinar radônio no ar do solo. Este equipamento consiste de uma vara de perfuração com ponta intercambiável e uma sonda capilar que está conectada à bomba de sucção. Foram feitas perfurações com aproximadamente 80 cm de profundidade com uso da vara de perfuração, que após é alçada 3 a 5 cm, tendo inserida a sonda capilar até empurrar a ponta intercambiável para liberar a entrada do ar. Com a bomba e o AlphaGUARD conectados em serie, o gás do solo é bombeado através da sonda capilar e é levado à câmara de ionização, onde é determinada a concentração total

de radônio (Fig. 6). Com a finalidade de determinar a concentração de  $^{222}\text{Rn}$ , a câmara de ionização é fechada e a bomba de sucção desligada por aproximadamente 10 minutos, tempo necessário para o  $^{220}\text{Rn}$  decair, ou até chegar a um valor de concentração de Rn estável. Desta maneira o  $^{220}\text{Rn}$  é determinado porque é igual à diferença entre Rn total e  $^{222}\text{Rn}$ .

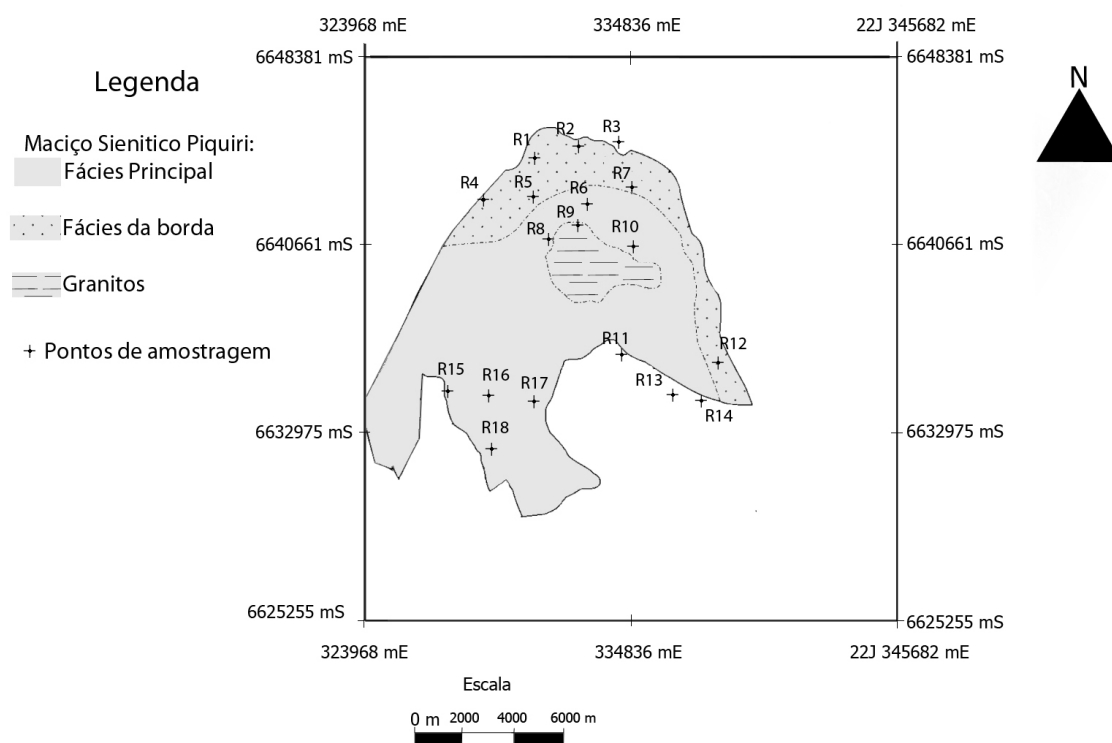


Figura 5. Localização dos pontos onde foram feitas as medidas de Rn com AlphaGUARD.

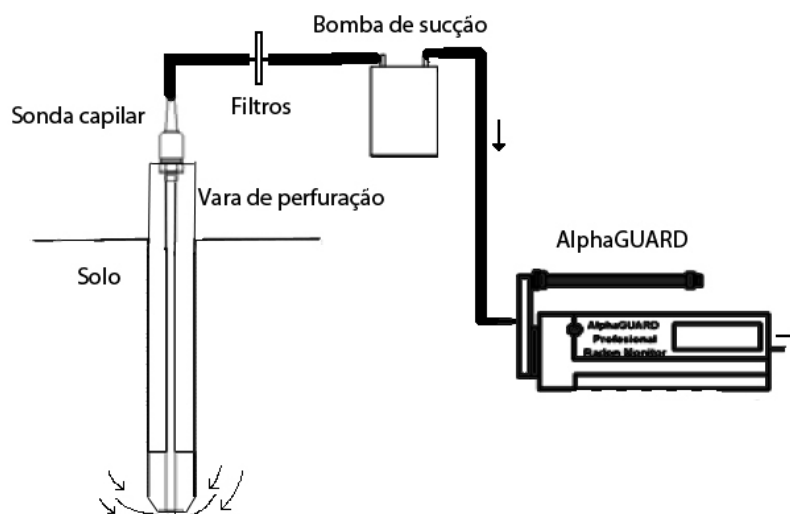


Figura 6. Representação esquemática do AlphaGUARD e seus componentes para medição de Rn em solo.

### *3.2.3 Petrografia*

Amostras foram coletadas nos pontos onde se realizaram determinações de Rn no Maciço Sienítico Piquiri, sendo estudadas ao microscópio petrográfico de polarização, com a finalidade de melhor entender os resultados obtidos.

### *3.3. Tratamento estatístico dos dados.*

Os resultados de densidade de lineamentos tectônicos e os resultados de radiação gama (cps, taxa de dose, % K, ppm de U e Th) foram processados com auxílio do programa Surfer versão 8.02 da Golden Software, com a finalidade de obter mapas de distribuição ou de superfície. Foi utilizado o método de grade geoestatística Kriging, que produz um mapa de tendência que depende dos valores iniciais.

A análise de estatística descritiva dos dados de radiação gama e a concentração de radônio foi realizada com a finalidade de obter os valores máximos, mínimos, média, mediana e desvio padrão para cada litologia da área.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados desta dissertação estão apresentados no artigo submetido à publicação. Não obstante, nesta secção são apresentadas tabelas de resultados de radiometria e concentração de radônio, e os resultados da análise das principais estruturas tectônicas da área.

### 4.1 Radiometria

Os resultados obtidos usando o gama espectrômetro RS-125 são apresentados nas Tabelas 7 e 8 do Anexo A. Os valores radiação gama obtidos no presente estudo variam entre 130 e 1045 cps, os de taxa de dose variam entre 28,9 nSv/h e 424,6 nSv/h, as concentrações de K entre 0,5 % e 8,3 %, as concentrações de eU entre 0,8 ppm e 25,8 ppm, enquanto, as concentrações de eTh obtidas neste estudo oscilam entre 3,0 ppm e 99,2 ppm. Onde a espessura do solo é menor e encontram-se as maiores pedreiras.

A Fácies Principal do Maciço Sienítico Piquiri apresenta a maior radiação gama com uma média de 600 cps e taxa de dose de 250 nSv/h (Fig. 7). Por outro lado, as Fácies da Borda do Maciço Sienítico Piquiri e o Granito Encruzilhada apresentam valores de contagem e taxa de dose similares, enquanto as rochas metamórficas do contato norte do corpo sienítico possuem os menores valores de contagem e taxa de dose.

Na Figura 8, são apresentadas as concentrações de K, eU e eTh das diferentes litologias da área de estudo, observando-se que a Fácies Principal do Maciço Sienítico Piquiri apresenta as maiores concentrações médias de K, eU e eTh, com valores de 5 %, 6 ppm e 40 ppm, respectivamente. A área de sienogranitos não apresenta muita diferença de concentrações destes elementos com respeito à Fácies Principal. O maior contraste dentro do Maciço Sienítico Piquiri, é registrado na Fácies da Borda, com baixas concentrações de K, eU e eTh. Entre as litologias encaixantes, as rochas metamórficas apresentam as menores concentrações de K, eU e eTh correspondendo a baixos valores de radiação gama. Por outro lado, a área do Granito Encruzilhada apresenta concentrações de K e eU similares às da Fácies

da Borda do Maciço Sienítico Piquiri, tendo maiores valores de eTh em relação à esta região do corpo sienítico.

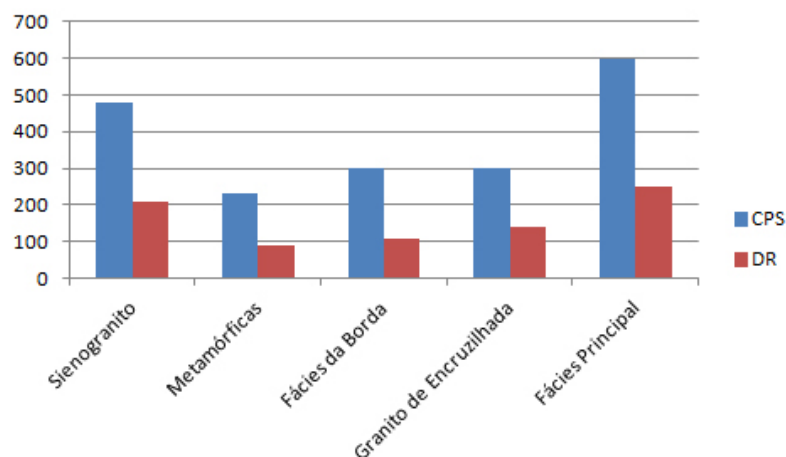


Figura 7. Contagem por segundo (cps) e taxa de dose (Dr em nSv/h) das diferentes litologias estudadas.

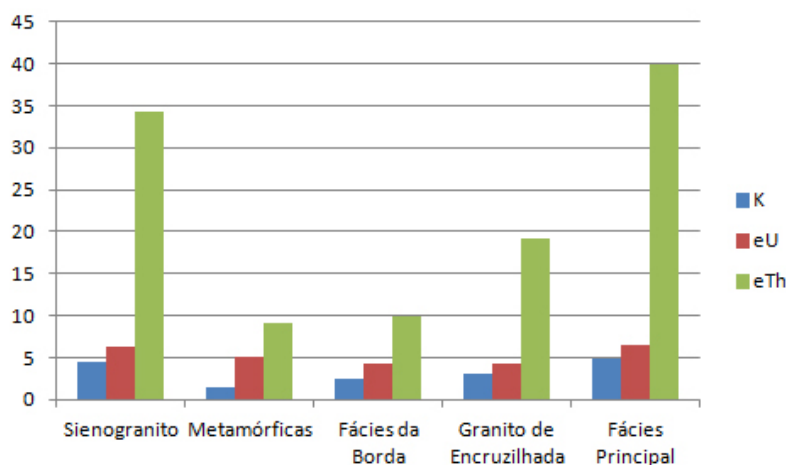


Figura 8. Concentrações de K (%), eU (ppm) e eTh (ppm) das diferentes litologias estudadas.

## 4.2 Radônio e estruturas tectônicas

Os resultados de concentração de Rn obtidas neste trabalho são apresentados na Tabela 6, e foram discutidos no corpo do artigo submetido à publicação. Não obstante, nesta secção é discutida a distribuição de Rn em relação às principais estruturas tectônicas visualizadas na imagem de satélite.



Tabela 6. Resultados de concentração de Rn total  $^{220}\text{Rn}$  e  $^{222}\text{Rn}$ , e valores de umidade para os solos da região do Maciço Sienítico Piquiri.

Ponto	Rn Total (KBq/m <sup>3</sup> )	$^{220}\text{Rn}$ (KBq/m <sup>3</sup> )	$^{222}\text{Rn}$ (KBq/m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Litologia
R1	<1	N.D.	<1	62 ± 2	Fácies da Borda
R2	110 ± 10	20 ± 10	88 ± 8	51 ± 5	Fácies da Borda
R3	55 ± 7	37 ± 9	18 ± 6	44 ± 6	Rochas metamórficas
R4	180 ± 20	130 ± 20	50 ± 20	37 ± 1	Fácies da Borda
R5	40 ± 10	30 ± 10	5 ± 3	54 ± 1	Fácies da Borda
R6	210 ± 20	210 ± 20	<3	37 ± 1	Fácies Principal-Norte
R7	90 ± 20	40 ± 20	52 ± 8	36 ± 2	Fácies da Borda
R8	100 ± 10	10 ± 20	90 ± 20	46 ± 2	Fácies Principal-Norte
R9	<4	<2	<3	32 ± 1	sienogranito
R10	510 ± 80	110 ± 90	400 ± 40	35 ± 2	Fácies Principal-Norte
R11	190 ± 30	140 ± 30	50 ± 10	32 ± 2	Granito Encruzilhada
R12	70 ± 20	70 ± 20	<2	31 ± 2	Fácies da Borda
R13	<1	N.D.	<1	28 ± 1	Granito Encruzilhada
R14	70 ± 10	40 ± 20	30 ± 10	29 ± 1	Granito Encruzilhada
R15	210 ± 40	210 ± 40	<2	48 ± 5	Fácies Principal-Sul
R16	200 ± 20	200 ± 20	<3	33 ± 2	Fácies Principal-Sul
R17	70 ± 10	70 ± 10	<1	34 ± 2	Fácies Principal-Sul
R18	560 ± 50	550 ± 50	8 ± 8	52 ± 4	Fácies Principal-Sul

O fraturamento tectônicos das rochas representa a abertura de caminhos para migração do Rn no maciço rochoso. Desta forma, espera-se que maiores valores de Rn coincidam com a concentração de lineamentos tectônicos. Não obstante, deve-se atentar que algumas dessas estruturas podem apresentar baixa permeabilidade, o que leva a formar “armadilhas” para o fluxo de gases e líquidos, como demonstram Lombardi & Voltattorni (2010) para sistemas de falhas inativas. Ao atravessar a rocha através de fraturas, o gás Rn atinge a camada de solo e passa a ter sua concentração controlada essencialmente pela permeabilidade e umidade desse compartimento.

A Figura 9 mostra os principais lineamentos na área do Maciço Sienítico do Piquiri e a localização dos pontos onde foram analisadas as concentrações de Rn. Pereira (2009) realizou perfis com espaçamento de 20 metros em área da cidade de São Paulo (SP), com a visando localizar estruturas tectônicas e mapear aquíferos fraturados a partir da emanção natural de radônio,. A metodologia mostrou-se eficiente e demonstrou que existem relações entre anomalias de Rn com anomalias

geolétricas, resultando na locação de poços de água subterrânea com elevadas vazões.

A Figura 10 representa a distribuição estatística dos lineamentos no maciço rochoso, sendo distintos três focos com maior concentração de fraturas, alcançando 10 Ne/Km<sup>2</sup> no sudoeste do maciço, enquanto os menores valores são verificados na região sudeste. O cruzamento dessas informações demonstra que à exceção do ponto R11, todos os demais com valores de Rn total elevado (> 200 KBq/m<sup>3</sup>) correspondem a zonas com forte densidade de fraturas, enquanto os de menor valor (< 100 KBq/m<sup>3</sup>) estão em zonas com menos lineamentos.

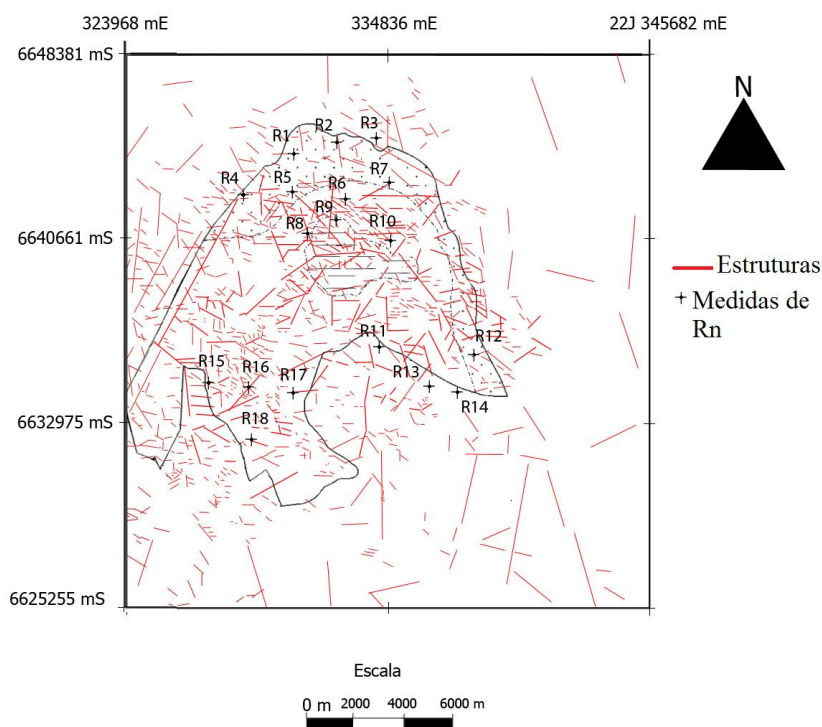


Figura 9. Principais estruturas da área de estudo e pontos de medidas de Rn.

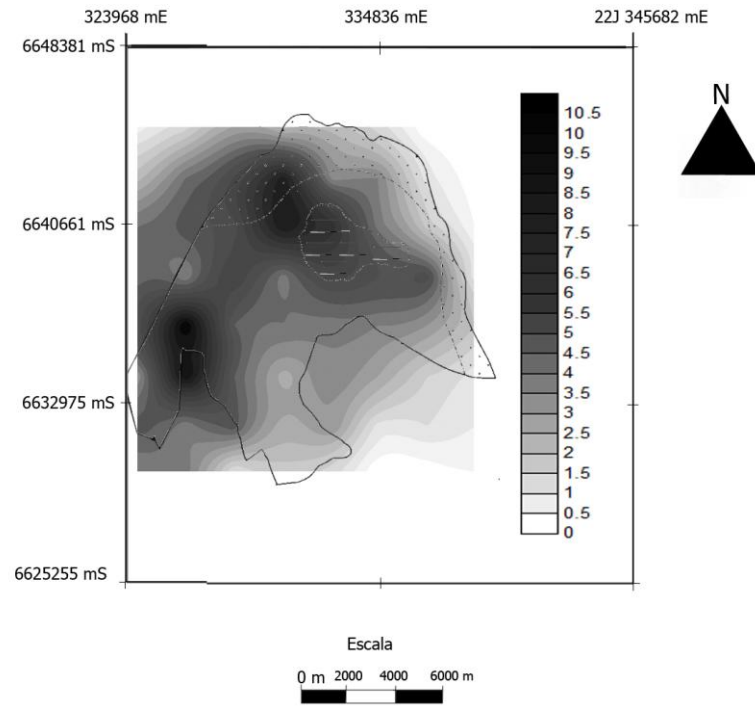


Figura 10. Mapa de distribuição da densidade de número de estruturas por área ( $N/Km^2$ ).

## 5. TRABALHO SUBMETIDO À PUBLICAÇÃO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
*Pesquisas em Geociências*

---

Porto Alegre, 03 de fevereiro de 2015.

Ao  
Gibran Romero-Mujalli

Venho comunicar o recebimento do manuscrito abaixo listado, submetido para publicação em *Pesquisas em Geociências*, órgão de divulgação científica editado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Agradeço a seleção de *Pesquisas em Geociências* para a publicação de sua contribuição. O manuscrito será analisado quanto ao escopo, conteúdo e enquadramento nas normas de preparação, para que seja iniciado o processo de análise por pares.

**Título: Espectrometria de raios gama e emissão de radônio em solos da região do Maciço Sienítico Piquiri, municípios de Cachoeira do Sul/Encruzilhada do Sul, RS.**

**Autores: Gibran Romero-Mujalli & Ari Roisenberg.**

Atenciosamente,

Prof. Dr. Paulo Alves de Souza  
Editor Chefe

---

*Pesquisas em Geociências*

Instituto de Geociências – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia  
Av. Bento Gonçalves, nº 9500 - Bloco 1 - Prédio 43127  
CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.  
Email: paulo.alves.souza@ufrgs.br

## **Espectrometria de raios gama e emissão de radônio em solos da região do Maciço Sienítico Piquiri, Municípios de Cachoeira do Sul/Encruzilhada do Sul, RS.**

### **Gama ray spectrometry and radon emissions in soils from the Piquiri Syenite Massif region, District of Encruzilhada do Sul/Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul State.**

Gibran ROMERO-MUJALLI<sup>\*1</sup> & Ari ROISENBERG<sup>1</sup>

1. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Rio Grande do Sul, Brasil. CEP 91501-970. E-mails: gibrán13@gmail.com, ari.roisenberg@ufrgs.br.

**Resumo** – Foram realizadas medidas de radiação gama e de concentração de radônio em solos da região do Maciço Sienítico Piquiri, região central do Estado do Rio Grande do Sul. Esta intrusão apresenta afinidade alcalina na qual a mineralogia acessória compreende presença relativamente abundante de titanita, apatita e zircão, entre outros minerais que podem conter elevadas concentrações de urânio. As medições de radiação gama foram feitas a partir de uma malha com quadrículas de 2 Km de lado, utilizando o gama Espectrômetro de Raios Gama RS-125, obtendo-se resultados de contagem por segundo (cps), taxa de dose (Dr) e concentrações de K, eU e eTh. As medidas de <sup>220</sup>Rn e <sup>222</sup>Rn no ar dos solos foram feitas com uso do equipamento AlphaGUARD. Os valores de cps obtidos neste estudo variam entre 130 e 1045, os de taxa de dose, entre 28,9 nSv/h e 424,6 nSv/h e as concentrações de K, entre 0,5 % e 8,3 %. As concentrações de eU se situam entre 0,8 ppm e 25,8 ppm, e as concentrações de eTh entre 3,0 ppm e 99,2 ppm. A distribuição de K permite definir com relativa precisão os contatos litológicos do Maciço sienítico Piquiri com as rochas adjacentes e entre as duas fácies (Fácies de Borda e Fácies Principal). As maiores concentrações de eTh estão na Fácies Principal do sienito, e as maiores concentrações de eU foram medidas na zona norte desta Fácies. Os resultados de <sup>220</sup>Rn e <sup>222</sup>Rn para o ar contido no solo variam entre 10 KBq/m<sup>3</sup> e 550 KBq/m<sup>3</sup> e entre 5 KBq/m<sup>3</sup> e 400 KBq/m<sup>3</sup>, respectivamente, para a Fácies Principal e a Fácies de Borda. As elevadas concentrações de Rn na Fácies Principal, podem indicar potencial risco à saúde dos habitantes desta área.

**Palavras-chave:** Radiação gama, Radiometria, Radônio, Rochas sieníticas.

**Abstract** - This study was focused in performing a gamma radiation survey and measurements of radon concentration in soils from the Piquiri Syenite Massif. Intrusion located at central area of the Rio Grande do Sul State. This intrusion has alkaline affiliation with high concentrations of uranium in accessory minerals as zircon, sphene, apatite, and others. The gamma radiation measurements were made considering a grid with squares about 2 km side each, using the gamma spectrometer RS-125, obtaining counts per second (cps), dose rate (DR) and concentrations of K, eU and eTh. Moreover, measurements of  $^{220}\text{Rn}$  and  $^{222}\text{Rn}$  in soil were made using the AlphaGUARD equipment. Counts per second values obtained in this study range from 130 to 1045, the dose rate range from 28.9 nSv/h to 424.6 nSv/h, K concentrations, from 0.5 % to 8.3 %, the eU concentrations, from 0.8 ppm to 25.8 ppm, and eTh concentrations, from 3.0 ppm to 99.2 ppm. The distribution of K defines with relatively precision the lithological contacts of the Piquiri Syenite Massif and between the two main facies of the intrusion. The Main Facies of the syenite contains the highest concentrations of eTh, while the highest concentrations of eU were measured in the north area of this facies. The  $^{220}\text{Rn}$  and  $^{222}\text{Rn}$  concentrations range from 10 KBq/m<sup>3</sup> to 550 KBq/m<sup>3</sup> and between 5 KBq/m<sup>3</sup> to 400 KBq/m<sup>3</sup>, respectively, in the Main and in the Marginal Facies. The high values of radon measured in Main Facies of the Piquiri Syenite Intrusion may indicate high potential risk to the health of inhabitants in the area.

**Key words:** Gamma radiation, Radiometry, Radon, Syenite rocks.

## 1 Introdução

O radônio (Rn) é o gás nobre mais pesado, com um número atômico de 86, encontrando-se na natureza preso nos minerais, dissolvido em águas subterrâneas e também como gás livre na atmosfera. Existem três isótopos naturais de radônio, o radônio-222 ( $^{222}\text{Rn}$  ou radônio), radônio-220 ( $^{220}\text{Rn}$  ou torônio) e radônio-219 ( $^{219}\text{Rn}$  ou actinônio). Estes três isótopos de radônio provêm do decaimento radioativo de isótopos de rádio ( $^{226}\text{radio}$ ,  $^{224}\text{radio}$  e  $^{223}\text{radio}$ , respectivamente) (Ferronsky e Polyakov, 2012). O actinônio ( $^{219}\text{Rn}$ ) apresenta um tempo de vida meia muito baixo (3,92 segundos), e junto à baixa ocorrência do  $^{235}\text{U}$ , limita a abundância do  $^{219}\text{Rn}$  natural na atmosfera (Appleton, 2005). No caso do torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) o tempo de meia-vida é pouco maior do que o actinônio (55,6 segundos), porém, é

baixo em relação ao radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), que apresenta um tempo de vida meia de 3,825 dias. Portanto, na maioria dos estudos ambientais, o isótopo de Rn mais estudado é o  $^{222}\text{Rn}$ , o qual, pode ser transportado por maiores distancias do que os outros isótopos de Rn. Além disso, sua ocorrência está relacionada com a mobilidade do  $^{226}\text{Ra}$ , que por sua vez está relacionada com o comportamento geoquímico do  $^{238}\text{U}$  (Appleton, 2005).

Os níveis relativamente elevados de Rn no ar estão relacionados diretamente com a geologia da área, dependendo do tipo de rocha. Em geral, as rochas metamórficas e magmáticas com afinidade alcalina, folhelhos carbonosos, rochas carbonáticas e rochas fosfáticas possuem elevadas concentrações de urânio e rádio. Os folhelhos carbonosos podem acumular grandes quantidades de urânio devido ao ambiente de formação redutor, o qual reduz o íon uranila, encontrado nas águas ( $\text{UO}_2^{2+}$ ), precipitando-o na rocha. Por outro lado, o urânio nas rochas ígneas é encontrado em maior concentração nas rochas de afinidade alcalina, como sienitos feldspatódicos, granitos e granodioritos, bem como em seus correspondentes extrusivos (Appleton, 2005).

A taxa de liberação de Rn de rochas e solos é controlada pela concentração do urânio e pelo tipo de minerais nos quais o urânio encontra-se. A solubilidade, o tamanho de grão dos cristais e a estrutura interna são os principais fatores que afetam a liberação do Rn. Geralmente, os solos liberam maiores quantidades de Rn do que as rochas, em razão do menor tamanho de grão e por sua porosidade natural (Appleton, 2005). A liberação do radônio a partir dos minerais e sua migração para a atmosfera, depende das características da rocha, da natureza do fluxo pelo qual é transportado, do clima, das características dos solos e das construções (Appleton, 2005; Pascale *et al.*, 2014).

A maior parte do Rn liberado para a atmosfera não representa um risco na saúde das pessoas. Contudo, o Rn pode ser acumulado em construções, cavernas e minas, em razão da baixa circulação de ar, afetando a saúde das pessoas que circulam nestes ambientes pela inalação do gás. A radiação gerada pelo Rn pode produzir mudanças em outros átomos ao seu redor, em decorrência da elevada capacidade de ionização. Assim, o Rn libera partículas alfa que, embora não penetre profundamente nos materiais, provoca a ionização dos átomos, danificando tecidos orgânicos e, em certos casos, alterando o DNA. Por outro lado, o Rn também produz outros radionuclídeos instáveis que, por sua vez, podem ser precipitados nos pulmões, em razão de sua afinidade na fase sólida, liberando partículas

alfa ao decair (Appleton, 2005). Desta maneira, a exposição ao radônio por um tempo prolongado é relacionada ao surgimento de câncer de pulmão (WHO, 2009). Águas minerais consideradas radioativas representam águas com elevadas concentrações de  $^{226}\text{Ra}$  e radônio, podendo acarretar câncer das vias digestivas, devido à sua ingestão (WHO, 2009)

No Brasil o câncer de pulmão é umas das causas mais comuns de mortalidade em homens e em mulheres (Castro *et al.*, 2004), despertando o interesse de pesquisadores sobre o risco associado à emissão de Rn. Nos últimos anos, estudos preliminares tem sido desenvolvidos para determinar as concentrações de radônio em minas subterrâneas, em águas subterrâneas, em solos e no ar, na tentativa de buscar elementos que demonstrem acumulação de Rn (Buffon, 2002; Silva, 2005; Santos, 2008; Fianco *et al.*, 2012). Neste particular, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) vem buscando parcerias e incentivando estudos no meio urbano.

Na região centro-leste do Estado Rio Grande do Sul, entre os municípios de Cachoeira do Sul e Encruzilhada do Sul, aflora o chamado Maciço Sienítico Piquiri, que representa uma intrusão de rochas de afinidade alcalina com altas concentrações de U e de elementos das terras raras leves (Nardi *et al.*, 2007). As rochas que compõem este complexo têm tido uma demanda crescente como material ornamental, tanto no mercado nacional como internacional, onde existem restrições severas em relação à emissão radioativa. Portanto, resulta de interesse conhecer a concentração de Rn no ar contido nos solos da região, na busca de elementos que subsidiem uma análise de risco para a saúde das pessoas que vivem nesta área.

## **2 Área, materiais e métodos**

### *2.1 Localização da área de estudo*

O Maciço Sienítico Piquiri localiza-se no centro-leste do Estado Rio Grande do Sul, aflorando na zona leste da Folha Capané (SH.22-Y-A-III-3) e no oeste da Folha Passo das Canas (SH.22-Y-A-III-4). A distância entre o corpo e a capital do estado é de aproximadamente 180 Km. O acesso desde Porto Alegre pode ser feito pela rodovia BR-290, até Vila Piquiri, no Município de Cachoeira do Sul,



tomando-se a direção para Encruzilhada do Sul (Fig. 1). O lado sul da intrusão pode ser alcançado através desta última localidade.

“INSERIR FIGURA 1”

O Escudo Sul-Rio-Grandense é o resultado, de processos de geração e deformação de crosta continental que aconteceram nos Ciclos Orogênicos Transamazônico e Brasileiro (Hartmann *et al.*, 2007). Este último ciclo está marcado por magmatismo de arco e pós-colisional com idades entre 760 Ma e 550 Ma (Bitencourt & Nardi, 2000). O Batólito Pelotas é uma unidade que faz parte do Ciclo Brasileiro e representa um período de retrabalhamento crustal (Hartmann *et al.*, 2007). Esta unidade está constituída por seis suítes graníticas, de composição variável e uma suíte sienítica com idades entre 650 Ma e 550 Ma (Philipp *et al.*, 2002; Hartmann *et al.*, 2007).

A suíte sienítica do Batólito Pelotas é representada pelo Maciço Sienítico Piquiri, que é uma intrusão semicircular com área aproximada de 150 Km<sup>2</sup> e com idades de 611 Ma ± 3 Ma obtidas pelo método de Pb-Pb em grãos de zircão (Philipp *et al.*, 2002). Esta intrusão possivelmente foi formada a partir de magmatismo sienítico de afinidade shoshonítica, sofrendo processos de mistura com magmas lamprofíricos (Stabel *et al.*, 2001; Nardi *et al.*, 2007; Nardi *et al.*, 2008). O Maciço Sienítico Piquiri é intrudido por granitos grosseiros do Complexo Encruzilhada, os quais se projetam, em planta, para o interior do sienito no sudeste, conferindo-lhe a forma de ferradura (Jost *et al.*, 1985; Philipp *et al.*, 2002; Nardi *et al.*, 2007). As rochas encaixantes do corpo principal do Maciço Sienítico Piquiri apresentam composição, gênese e idades variadas. No leste, nordeste e, em parte, ao norte, as rochas encaixantes são blastomilonitos derivados de gnaisses estrutural e texturalmente variados e, localmente, de granitos granatíferos. No noroeste ocorrem xistos pelíticos e quartzitos do Grupo Cerro dos Madeiras. No oeste e sudoeste a intrusão sienítica apresenta contato por falha com ritmitos do Membro Mangueirão (Proterozoico superior), que são parcialmente recobertos por conglomerados Eo-Paleozóicos, a Permo-Carboníferos.

O Maciço Sienítico Piquiri é representado por quatro tipos litológicos principais que apresentam contatos internos gradativos (Fig. 2). No interior da intrusão predomina o feldspato-alcálico sienito de grão médio a grosso e na região correspondente à borda ou margem resfriada,

sienitos a quartzo monzonitos de granulometria fina a média. Também é registrado flogopita-diopsídio sienitos, que mostra características de mistura com feldspato-alcálico sienito, enquanto o quarto tipo litológico varia entre sienogranitos e feldspato-alcálico granitos, centro da intrusão, representando a etapa final da cristalização, onde são frequentes autólitos de sienito (Nardi *et al.*, 2007).

“INSERIR FIGURA 2”

Os latossolos e litossolos no Maciço Sienítico Piquiri possuem cor vermelha amarelada e são, em geral, rasos e bem drenados, com espessuras variáveis entre poucos centímetros até poucos metros e horizontes mal definidos. Nas áreas mais elevadas da região, onde a espessura de solos pode ser reduzida, afloramentos de rocha são encontrados misturados com areias feldspáticas a quartzo-feldspáticas grosseiras, com conteúdo menor de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Nas áreas baixas, a espessura dos solos cresce, bem como o conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, aos quais se soma matéria orgânica, localmente abundante.

## 2.2 *Materiais e métodos*

A região do Maciço Sienítico Piquiri foi dividida em quadrículas de 2 Km de lado definindo-se pontos de amostragem no centro (Fig. 3). As medidas de radiação gama foram feitas *in situ* com tempo de medida de 120 segundos, usando o equipamento gama espectrômetro RS-125 que contém um detector de um cristal de 103 cm<sup>3</sup> de NaI(Tl), com capacidade de ler taxa de dose e contagens totais por segundo (cps) de K, U e Th. Este equipamento discrimina a contagem total e a energia de 2,62 MeV pertencente ao pico do <sup>208</sup>Tl (na determinação de tório), a energia de 1,76 MeV do <sup>214</sup>Bi (na determinação de urânio) e a energia de 1,46 MeV do <sup>40</sup>K (potássio). Não obstante, este equipamento mede uma faixa de energia para cada pico, desde 2,42 MeV até 2,82 MeV, desde 1,66 MeV até 1,86 MeV e desde 1,36 MeV até 1,56 MeV respectivamente. As concentrações de cada elemento pai são estimadas tendo em conta um equilíbrio entre os radioelementos principais com seus isótopos-filhos (Millsom, 2003).

“INSERIR FIGURA 3”

Foram selecionados 18 pontos da quadrícula para realizar medidas de radônio e torônio *in situ* em solos (Fig. 4). Estes pontos foram distribuídos em função dos resultados de radiometria. Para medir as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  foi usado o equipamento AlphaGUARD PQ 2600. O equipamento AlphaGUARD conta com uma unidade para determinar radônio no ar do solo, que consiste de uma vara de perfuração com uma ponta intercambiável e sonda capilar conectada a uma bomba de sucção. Foram feitas perfurações de aproximadamente 80 cm com a vara de perfuração, que após é alçada 3 a 5 cm, tendo inserida a sonda capilar até empurrar a ponta intercambiável para liberar a entrada de ar. Com a bomba e o equipamento AlphaGUARD conectados em serie, o gás do solo é bombeado através da sonda capilar e levado à câmara de ionização, onde é determinada a média da concentração total de radônio (Fig. 4). Com a finalidade de determinar a concentração de  $^{222}\text{Rn}$ , a câmara de ionização é fechada e desliga-se a bomba de sucção por aproximadamente 10 min, tempo necessário para o  $^{220}\text{Rn}$  decair, ou até chegar a um valor de concentração de Rn estável, onde a média dos valores obtidos neste tempo representa a concentração de  $^{222}\text{Rn}$ . Desta maneira, o  $^{220}\text{Rn}$  é determinado a partir da diferença entre Rn total e o  $^{222}\text{Rn}$ .

“INSERIR FIGURA 4”

Foi realizado estudo estatístico de superfície usando o programa Surfer versão 8.02 de Golden Software para determinar a distribuição espacial das medidas de contagem por segundo (cps), taxa de dose (Dr), concentração de K (%) e concentrações de equivalente tório (eTh) e equivalente urânio (eU) em ppm obtidas com gama espectrômetro. O método usado para a grade geoestatística foi o de Kriging, que produz um mapa de tendência que depende dos valores iniciais. Por outra parte, foi feito um análise de estatística descritiva para os resultados de radiometria e de concentrações de radônio em solos, obtendo-se os valores máximos, mínimos, média e desvio padrão, para determinar a dispersão e intervalo dos dados.

### 3 Resultados

#### 3.1 Resultados de radiometria

Foram realizadas 62 medidas radiométricas, distribuídas em 42 pontos apresentados nas Tabelas 1 e 2. Os resultados demonstraram uma grande variação de valores, como resultado das características próprias de cada litologia aflorante e dos solos originados. Os números estão compreendidos entre 130 e 1045 cps, taxa de dose entre 28,9 nSv/h e 424,6 nSv/h, as concentrações de K entre 0,5 % e 8,3 %, as concentrações de eU entre 0,8 ppm e 25,8 ppm, e as concentrações de eTh entre 3,0 ppm e 99,2 ppm.

“INSERIR TABELA 1”

“INSERIR TABELA 2”

As Figuras 5, 6, 7, 8 e 9 representam mapas de distribuição de cada parâmetro analisado. A área do Maciço Sienítico Piquiri destaca-se pelos elevados valores de radiação gama, em contraste com o Granito Encruzilhada, a sudeste. Não obstante, os valores de radiação gama deste corpo granítico são superiores às demais litologias que circulam o sienito.

O setor norte do Maciço Sienítico Piquiri registra maiores números de radioatividade, como se observa na Figura 5 e na Figura 6. Neste setor a espessura de solos é menor, resultando numa área aflorante maior de rocha sã.

“INSERIR FIGURA 5”

“INSERIR FIGURA 6”

O mapa de distribuição de K (Fig. 7) discrimina nitidamente as mudanças litológicas da área, com valores relativamente baixos próximos aos contatos norte, sul e oeste, e um intervalo intermediário no Granito Encruzilhada ao sudeste. No âmbito do Maciço Sienítico Piquiri o K, destaca a Fácies Principal do sienito, com valores elevados de K, atingindo o ápice na área das pedreiras, onde a espessura do solo é menor. É interessante ressaltar que a margem resfriada da intrusão (Fácies da Borda) apresenta um valor médio de K menor do que a Fácies Principal. O mapa de distribuição % K parece ser uma boa aproximação para delimitar contatos litológicos e pequenas mudanças litológicas (IAEA, 2003) do Maciço Sienítico Piquiri, porque este elemento está relacionado com o feldspato potássico, que é a fase mineral dominante no sienito. Não obstante, deve-se levar em consideração que as características dos solos e das rochas intemperizadas podem interferir nos resultados.

“INSERIR FIGURA 7”

O eTh (Fig. 8) exhibe uma variação similar ao K, havendo um bom contraste com as litologias adjacentes, em razão da presença de minerais radioativos no sienito, como o zircão e esfero, dentre outros. Entre as litologias que estão em contato com o Maciço Sienítico Piquiri, o Granito Encruzilhada é a que apresenta maior concentração de eTh. No interior da intrusão sienítica a Fácies de Borda mostra as menores concentrações de eTh, à exceção de um ponto no noroeste que pode sofrer interferência pelo uso do sienito como material de construção nas proximidades do ponto de amostragem.

“INSERIR FIGURA 8”

Entre os mapas de distribuição Elemental, o do eU (Fig. 9) guarda menos correlação com as litologias, registrando os maiores valores no nordeste do Maciço Sienítico Piquiri, em área correspondente a Fácies Principal, o que pode ter relações com a pequena espessura de solos. A zona ao oeste e sudoeste da intrusão e a zona da Fácies da Borda apresentam, em geral, baixas concentrações de eU. Definindo que ao eU não é um bom marcador litológico, no caso em foco, nota-

se que os sienogranitos não apresentam diferenças na concentração de eU com a Fácies Principal do sienito.

“INSERIR FIGURA 9”

### 3.2 Resultados de concentração de radônio

Os valores de Rn total,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  e umidade de cada ponto são registrados na Tabela 3. Os resultados de concentração de radônio, em geral, apresentam uma forte dispersão, refletida no desvio padrão da média para cada ponto, e uma igualmente forte variação entre os pontos medidos na mesma litologia. O ponto R1, por exemplo, apresenta uma umidade de  $62\% \pm 2\%$ , o que pode interferir no fluxo de radônio diminuindo a concentração do gás no solo (Manohar *et al.*, 2013). Não obstante, os resultados de concentração de Rn obtidos neste estudo não apresentam uma boa correlação com os resultados de umidade, portanto, as baixas concentrações de Rn obtidas nos pontos R9 e R13, e incluso o ponto R1, podem estar relacionadas a outras características destes solos. Somam-se a isto as condições do solo no local, tendo a sonda capilar do equipamento atingido níveis próximos ao lençol freático.

“INSERIR TABELA 3”

Os pontos R15, R16, R17 e R18 pertencentes ao setor sul do Maciço Sienítico Piquiri, apresentam baixa concentração de  $^{222}\text{Rn}$  em relação ao  $^{220}\text{Rn}$ , refletindo uma dependência das concentrações de eU que são menores ao Sul da Fácies Principal do que no Norte (Fig. 9).

O ponto R18 registra a maior concentração de Rn total dos pontos amostrados, correspondendo a  $560 \text{ KBq/m}^3 \pm 50 \text{ KBq/m}^3$ . Neste ponto, a concentração de  $^{220}\text{Rn}$  representa a quase totalidade da concentração total de Rn. O ponto R12 pertencente à Fácies da Borda possui baixa concentração de eU e, correspondentemente, um valor baixo de Rn total. Situação similar é registrada

no ponto R6 que pertence à Fácies Principal da intrusão, que apresenta uma baixa concentração de  $^{222}\text{Rn}$ .

O ponto R3 é o único ponto analisado pertencente às rochas metamórficas da área norte da intrusão sienítica. No local, foi verificado que os solos apresentam baixa concentração de Rn em relação aos solos do Maciço Sienítico Piquiri. Os solos do Granito Encruzilhada, na região estudada, possuem concentração de Rn total compreendida entre  $70 \text{ KBq/m}^3$  e  $190 \text{ KBq/m}^3$ .

Na Figura 10 estão representados os valores médios de concentração de Rn com relação à litologia local, desconsiderando-se os pontos com concentração de Rn total menor que  $10 \text{ KBq/m}^3$ , já que a variação dos resultados e o limite de detecção do equipamento não permitiram a quantificação da concentração de Rn. A zona de maior concentração de Rn situa-se na Fácies Principal do Maciço Sienítico Piquiri, enquanto a Fácies da Borda apresenta concentrações bem menores de  $^{220}\text{Rn}$ . No setor sul (Fácies Principal-Sul) e no setor norte (Fácies Principal-Norte) registram-se as maiores concentrações de Rn total, contrastando pela contribuição expressiva de  $^{220}\text{Rn}$  na zona meridional.

“INSERIR FIGURA 10”

Na Figura 11 são representados os valores de Rn total vs. eTh e Rn total vs. eU no corpo sienítico, mostrando que a correlação de concentração de Rn com resultados radiométricos não é uma correlação linear simples, como mostrado em situação similar por Smethurst *et al.* (2008) ao comparar as concentrações de Rn no interior de casas com o eU obtido por métodos radiométricos na região de Oslofjord (Noruega). Inobstante, é observado que existe correlação direta do Rn nos solos com as concentrações de eU e eTh. Representações gráficas mostraram que a dispersão de valores é ainda maior entre as concentrações de  $^{220}\text{Rn}$  e eTh e de  $^{222}\text{Rn}$  e eU, mesmo sabendo-se que os isótopos  $^{220}\text{Rn}$  e  $^{222}\text{Rn}$  são produtos do decaimento radioativo do  $^{232}\text{Th}$  e do  $^{238}\text{U}$ , respectivamente (Milsom, 2003).

“INSERIR FIGURA 11”

A Figura 12 mostra os principais lineamentos tectônicos no Maciço Sienítico do Piquiri e a localização dos pontos de análise de Rn. Observa-se que os pontos R1, R2, R5, R7 e R17 estão em área de baixa densidade de fraturas, o que pode inibir a migração de radônio para a superfície. Pereira (2009) realizou perfis com espaçamento de 20 metros em área da cidade de São Paulo (SP), com a visando localizar estruturas tectônicas e mapear aquíferos fraturados a partir da emissão natural de radônio. A metodologia mostrou-se eficiente e demonstrou que existem relações entre anomalias de Rn com anomalias geoeletricas, resultando na locação de poços de água subterrânea com elevadas vazões.

“INSERIR FIGURA 12”

#### 4 Discussão dos resultados

As concentrações de K, eU e eTh obtidas pelo método radiométrico no Maciço Sienítico Piquiri possuem correspondência com os resultados obtidos por Nardi *et al.* (2007, 2008) utilizando os métodos de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) e Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). O mapa de distribuição de K obtido pelo método radiométrico serviu para delimitar com relativa precisão contatos litológicos do Maciço Sienítico Piquiri, possibilitando utilizar esta ferramenta em áreas com poucos afloramentos.

A análise dos resultados de Rn mostrou registro de pontos com concentração de Rn total menor que  $5 \text{ KBq/m}^3$ , que sugerem “falsos negativos”, como demonstrou Kitto & Green (2008) e Fianco *et al.* (2012) ao estudar solos argilosos com baixa permeabilidade, que inibem a migração do Rn para a superfície.

Não foram encontradas correlações significativas entre as concentrações de Rn e os valores radiométricos. Entretanto, abstraindo os pontos situados em áreas com baixa densidade de fraturas a correlação de Rn total com o eTh melhora sensivelmente, o mesmo não acontecendo no caso do eU (Fig. 13).



A baixa correlação entre as concentrações de Rn total e eU e eTh, no presente caso, pode ser atribuída a diversos fatores: (i) a concentração de Rn no solo pode oscilar ao longo do dia, como decorrência de fatores climáticos e, inclusive, a umidade relativa do solo, como reportado por Pascale *et al.* (2014); (ii) variações na densidade de fraturas pode favorecer ou limitar a migração do radônio até a superfície; (iii) a distribuição heterogênea de minerais radioativos na rocha e nos solos residuais, em decorrência de núcleos cumuláticos de acessórios (zircão, apatita, alanita e outros), por exemplo, pode contribuir para variações locais expressivas de U, Th, Ra e Rn; e (iv) a permeabilidade não homogênea dos solos, pode exercer um controle estreito sobre a emissão de Rn. Assim, solos com baixa permeabilidade ou solos argilosos servem como “armadilhas” ou “tampões” que impedem a percolação de Rn.

“INSERIR FIGURA 13”

As concentrações de  $^{220}\text{Rn}$  e  $^{222}\text{Rn}$  no ar dos solos do Maciço Sienítico Piquiri (Tab. 1) são elevadas se comparadas às concentrações reportadas em outros países (Shweikani & Hushari, 2005; Gomes *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014) e, igualmente, maiores que as concentrações determinadas por Fianco *et al.* (2012) em solos da região de Porto Alegre (RS), nos quais o valor máximo registrado foi de  $31 \text{ KBq/m}^3 \pm 1 \text{ KBq/m}^3$ .

Varley & Flowers (1998) encontraram concentrações de Rn em residências 10 a 1000 vezes menores que a concentração de Rn nos solos do sudoeste da Inglaterra. Esta situação, no entanto, não pode ser generalizada para a área do Maciço Sienítico Piquiri, em particular por se situar em região de clima frio no hemisfério norte, onde a ventilação do ar é restrita durante o inverno. O valor máximo de concentração de radônio no ar de residências recomendado pela WHO (*World Health Organization*) é de  $100 \text{ KBq/m}^3$ , enquanto a HPA (*Health Protection Agency*) define como nível de remediação o valor de  $200 \text{ Bq/m}^3$ .

## 5 Conclusões

A Fácies da Borda do Maciço Sienítico Piquiri apresenta menores valores de radiação gama, concentração de K, eU e eTh do que a Fácies Principal do corpo sienítico. O mapa de distribuição de concentração de K obtido a partir do método radiométrico delimita os contatos litológicos do Maciço Sienítico Piquiri, porque está associado ao feldspato potássico, mineral principal destas rochas sieníticas. Por outra parte, as maiores concentrações de e Th obtidas neste trabalho são apresentadas na zona norte e sul da Fácies Principal do Maciço Sienítico Piquiri, e os solos e rochas desta zona apresentam altos valores de eU, onde as maiores concentrações alcançadas apresentam-se na zona norte da Fácies Principal.

Os solos do Maciço Sienítico Piquiri apresentam elevadas concentrações de Rn, localizando-se as menores concentrações na Fácies da Borda enquanto as maiores concentrações na Fácies Principal do corpo sienítico. Aliás, as altas concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  estão localizadas na zona norte da Fácies Principal podendo estar relacionado com a alta concentração de eU, e as maiores concentrações de  $^{220}\text{Rn}$  estão presentes na zona Sul da Fácies Principal do Maciço Sienítico Piquiri, relacionados à alta concentração de eTh destes solos.

Na localidade do Maciço Sienítico Piquiri é possível que exista um potencial risco de câncer de pulmão devido ao Rn, apresentando-se o maior risco na zona norte da Fácies Principal do corpo sienítico. Não obstante, é preciso determinar a concentração do gás Rn dentro de casas e construções desta área, para saber se existe uma alta probabilidade de que as pessoas que vivem na localidade apresentem câncer de pulmão.

**Agradecimentos** – O primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de mestrado, ao CNEN por facilitar os equipamentos usados na metodologia deste trabalho e ao programa de pós-graduação de geociências da UFRGS pela ajuda na realização deste trabalho.

## **Referências**

- Appleton, J.D. 2005. Radon in air and water. In: Selinus, O. & Smedley, P. (Eds). *Essentials of medical geology: impacts of the natural environment on public health*. Londres, British Geological Survey. NERC, p. 227 – 262.
- Bitencourt, M.F., & Nardi, L.V.S. 2000. Tectonic setting and sources of magmatism related to the southern Brazilian Shear Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 184 – 187.
- Buffon, S.A. 2002. *Integração de dados geofísicos e geológicos na avaliação ambiental e epidemiológica de radiações naturais (radônio) no escudo Sul-Riograndense (RS - Brasil)*. Porto Alegre, 150p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Castro, M.S.M., Vieira, V.A. & Assunção, R.M. 2004. Padrões espaço-temporais da mortalidade por câncer de pulmão no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, 7(2): 131 – 143.
- Ferronsky, V.I. & Polyakov, V.A. 2012. *Isotopes of the Earth's Hydrosphere*. Londres, Springer, 625p.
- Fianco, A.C.B., Roisenberg, A. & Bonotto, D.M. 2012. Radon emissions related to the granitic Precambrian shield in southern Brazil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 48(1): 122 – 131.
- Gomes, M.E.P., Martins, L.M.O., Neves, L.J.P.F. & Pereira, A.J.C.S. 2013. Natural radiation and geochemical data for rocks and soils, in the North International Douro Cliffs (NE Portugal). *Journal of Geochemical Exploration*, 130: 60- 64.
- Hartmann, L.A., Chemale Jr F. & Philipp R.P. 2007. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Iannuzzi R. & Frantz J.C. (Eds.). *50 anos de Geologia: Instituto de Geociências: Contribuições*. Brasil. Editora Comunicação e Identidade, p, 97 - 123.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. 2002. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Viena, IAEA-TECDOC-1363, 179p.
- Immé, G., Catalano, R., Mangano, G. & Morelli, D. 2014. Radon exhalation measurements for environmental and geophysics study. *Radiation Physics and Chemistry*, 95: 349 – 351.

- Jost, H., Brod, J.A., Holz, M., Kuhn, A., Flor, M.A., Kronbauer, A. & Dillenburg, S. 1985. Geologia estrutural, petrografia e ptrologia do Sienito Piquiri (Proterozóico superior), Rio Grande do Sul. In: Anais do II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 2, Florianópolis, SC, Brasil, SBG, p. 63 – 80.
- Kitto, M.E. & Green J.G. 2008. Mapping the indoor radon potential in New York at the township level. *Atmospheric Environment* 42: 8007 – 8014.
- Manohar, S.N., Meijer, H.A.J. & Herber, M.A. 2013. Radon flux maps for the Netherlands and Europe using terrestrial gamma radiation derived from soil radionuclides. *Atmospheric Environment*, 81: 399 – 412.
- Milsom, J. 2003. *Field Geophysics*. 3ra edição, Chichester, Inglaterra, John Wiley & Sons Ltd, 232p.
- Nardi, L.V.S., Cid, J.P. & Bitencourt, M.F. 2007. Minette mafic microgranular enclaves and their relationship to host syenites in systems formed at mantle pressures: major and trace element evidence from the Piquiri Syenite Massif, southernmost Brazil. *Mineralogy and Petrology*, 91: 101 – 116.
- Nardi, L.V.S., Plá-Cid, J., Bitencourt, M.F. & Stabel, L.Z. 2008. Geochemistry and petrogenesis of post-collisional ultrapotassic syenites and granites from southernmost Brazil: the Piquiri Syenite Massif. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 80(2): 353 – 371.
- Pascale, F.T., Francesco, S., Carbone, P., Cuoco, E. & Tedesco, D. 2014. Dry soil diurnal quase-periodic oscillations in soil <sup>222</sup>Rn concentrations. *Radiation Measurements*, 66: 31 – 41.
- Pereira, C.M.A. 2009. *Mapeamento de aquíferos fraturados empregando métodos geoeletricos e emanação natural de radônio*. São Paulo, 63p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Philipp, R.P., Machado, R., Nardi, L.V.S. & Lafon, J.M. 2002. O magmatismo granítico neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: Novos dados e Revisão da geocronologia regional. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(2): 277 – 290.
- Santos, C.E.L. 2008. *Determinação dos processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas de fluorita e carvão do estado de santa catarina: critérios para avaliação dos riscos radiológicos*. Porto Alegre, 137p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Silva, A.A.R. 2005. *Radônio e filhos em residências da cidade de São Paulo*. São Paulo, 119p. Tese de Doutorado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo.
- Shweikani, R. & Hushari, M. 2005. The correlations between radon in soil gas and its exhalation and concentration in air in the southern part of Syria. *Radiation Measurements*, 40: 699 – 703.
- Smethurst, M.A., Strand, T., Sundal, A.V. & Rudjord, A.L. 2008. Large-scale radon hazard evaluation in the Oslofjord region of Norway utilizing indoor radon concentrations, airborne gamma ray spectrometry and geological mapping. *Science of the Total Environment*, 407: 379 – 393.
- Stabel, L.Z., Nardi, L.V.S. & Cid, J.P. 2001. Química mineral e evolução petrológica do sienito Piquiri magmatismo shoshonítico, neoproterozóico, pós-colisional no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(2): 211 – 222.
- Varley, N.R. & Flowers, A.G. 1998. Indoor radon prediction from soil gas measurements. *Health Physics*, 74(6): 714 – 718.
- Wang, X., Li, Y., Du, J. & Zhou, X. 2014. Correlations between radon in soil gas and the activity of seismogenic faults in the Tangshan area, North China. *Radiations Measurements*, 60: 8 – 14.
- WHO, World Health Organization. 2009. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Genebra, WHO, 95p.

## Lista de ilustrações

Figura 1: Localização da área de estudo.

Figura 2: Mapa geológico do Maciço Sienítico Piquiri (Modificado de Nardi *et al.*, 2008).

Figura 3: Localização dos pontos onde foram feitas as medidas de radiação gama.

Figura 4: Localização dos pontos onde foram feitas as medidas de Rn com AlphaGUARD.

Tabela 1. Resultados de radiometria, obtidos pelo método de gama espectrômetro RS-125. Desde o ponto P01 até P34.

Tabela 2. Resultados de radiometria, obtidos pelo método de gama espectrômetro RS-125. Desde o ponto P35 até P62.

Figura 5: Mapa radiométrico de distribuição de contas por segundo (cps).

Figura 6: Mapa de distribuição de taxa de dose (Dr) de radiação gama em nSv/h.

Figura 7: Mapa de distribuição da concentração de potássio em porcentagem.

Figura 8: Mapa de distribuição da concentração de equivalente tório em ppm.

Figura 9: Mapa de distribuição da concentração de equivalente urânio em ppm.

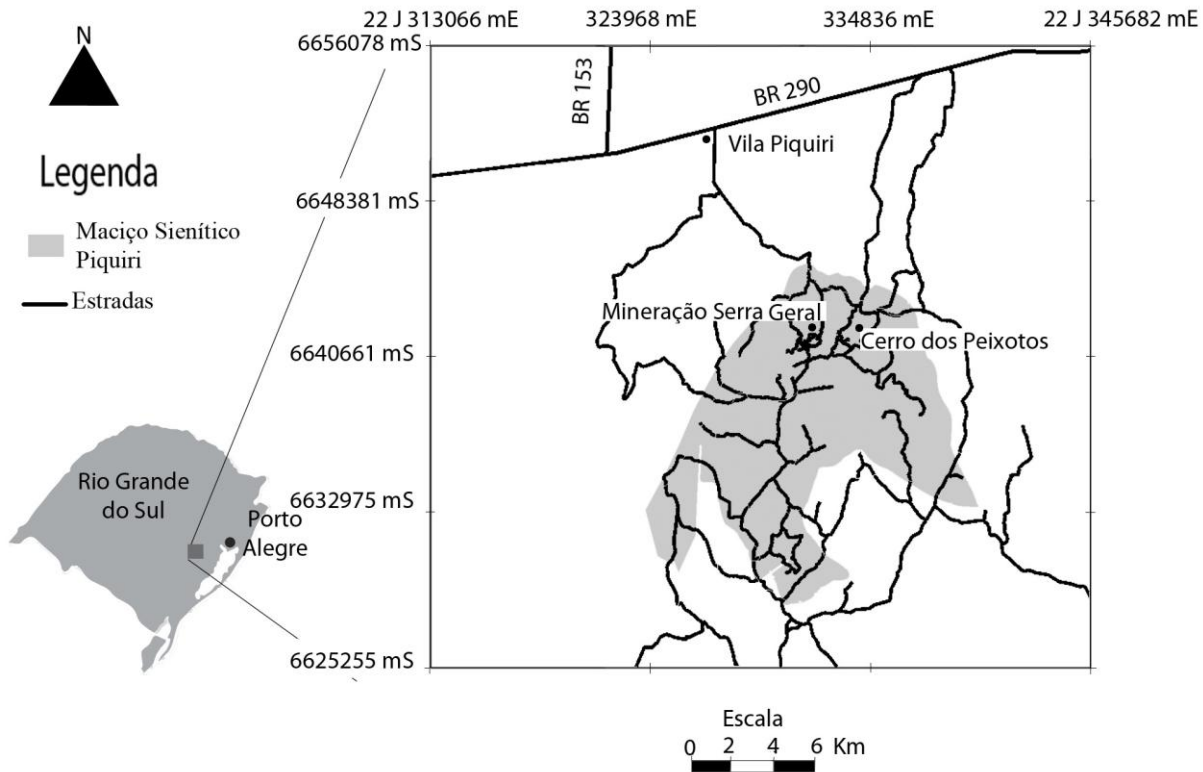
Tabela 3: Resultados de Rn total,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  e umidade de cada ponto amostrado, incluindo a geologia do ponto. N.D. - não detectado.

Figura 10: Média de concentrações de  $^{220}\text{Rn}$  e  $^{222}\text{Rn}$  na fácies principal e da borda do Maciço Sienítico Piquiri, solos de rochas metamórficas do contato norte e solos do Granito Encruzilhada do contato sudeste.

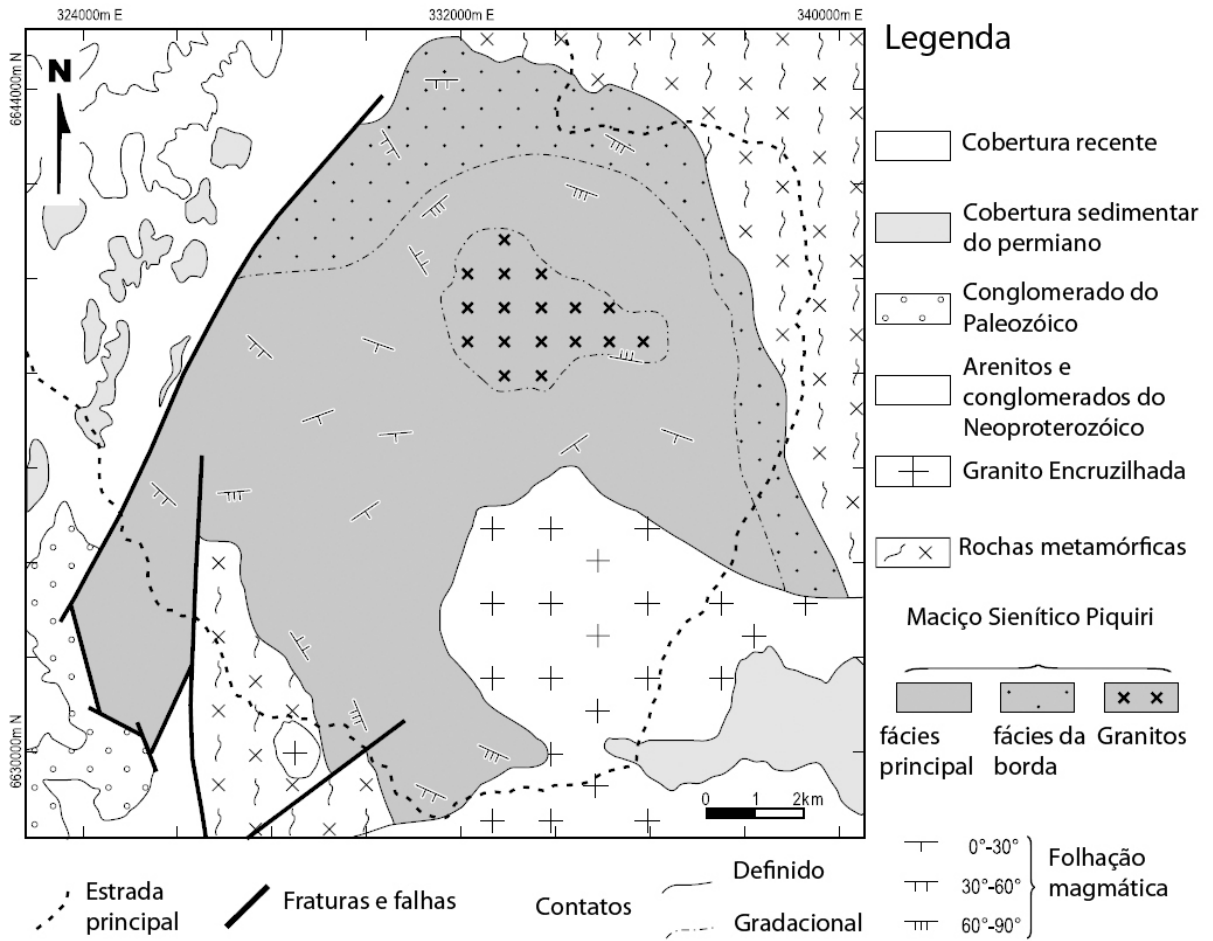
Figura 11: Correlação de Rn total vs. eU e Rn total vs. eTh.

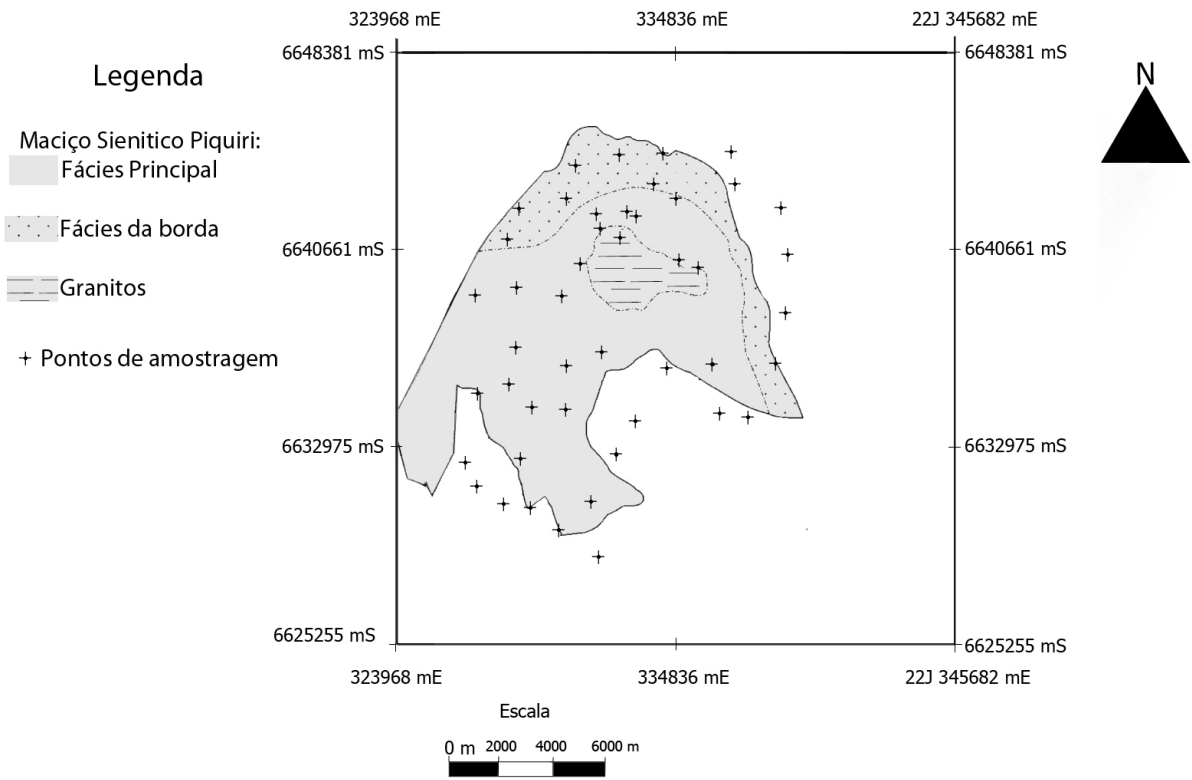
Figura 12: Principais estruturas da área de estudo e localização dos pontos de medida de Rn.

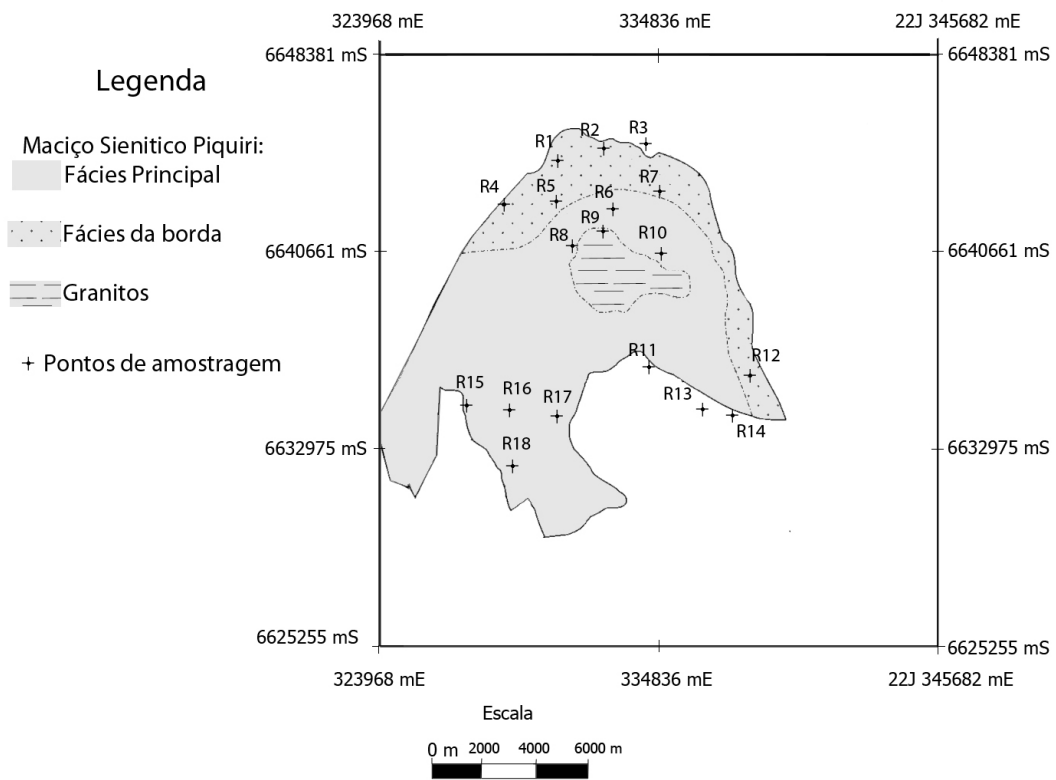
Figura 13: Correlação de Rn total vs. eU e Rn total vs. eTh determinadas nas áreas com alta densidade de estruturas.





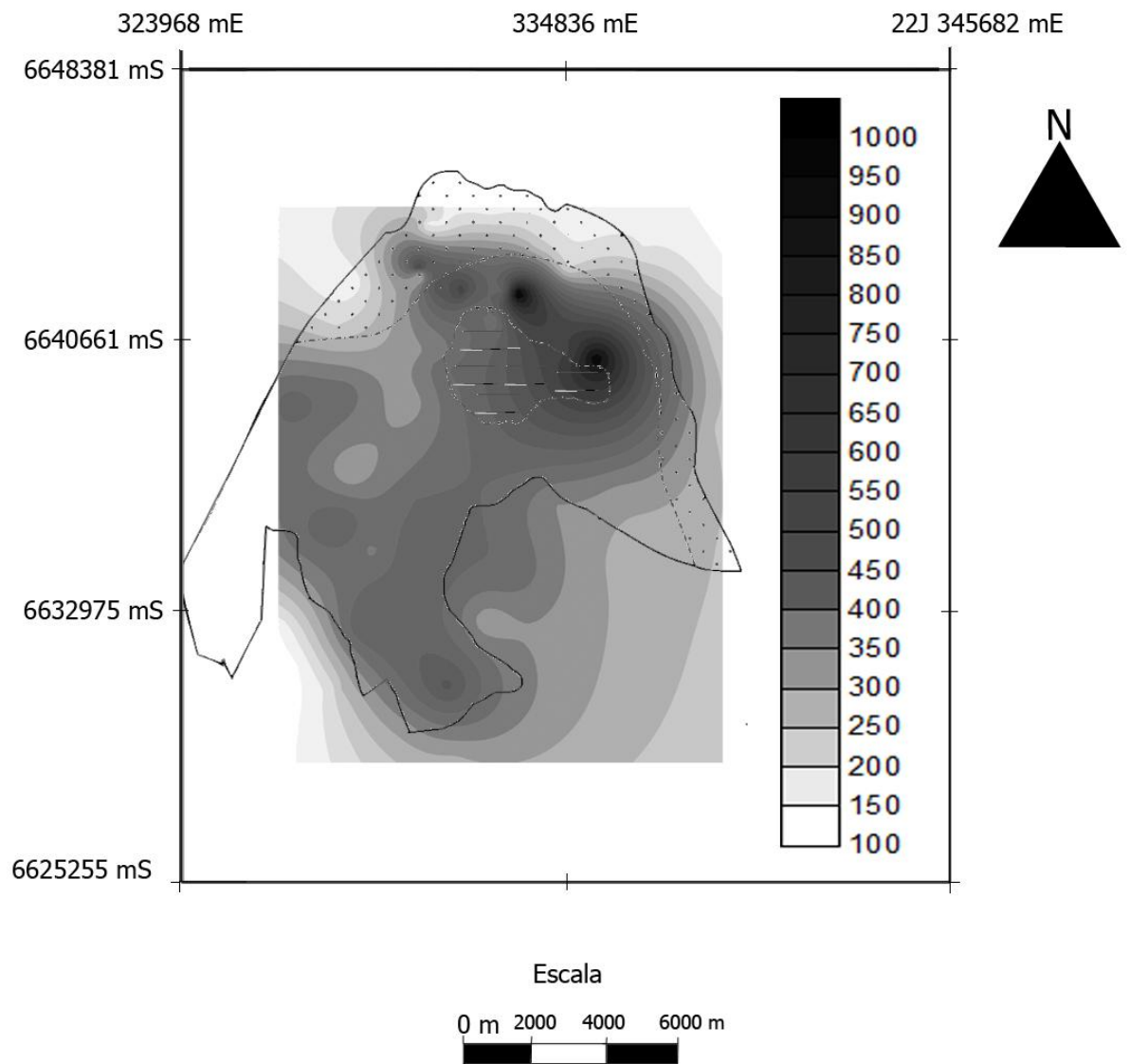


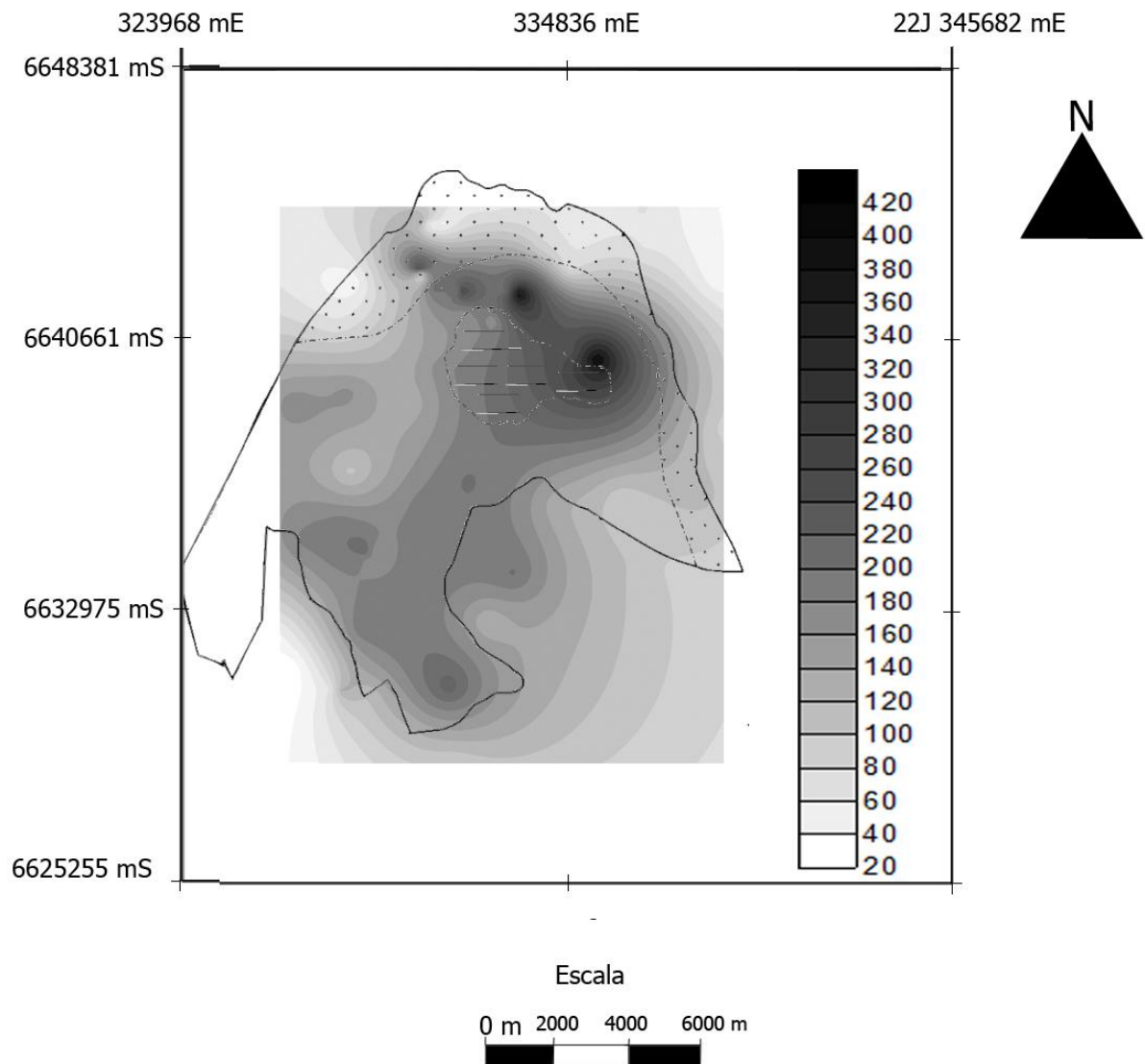


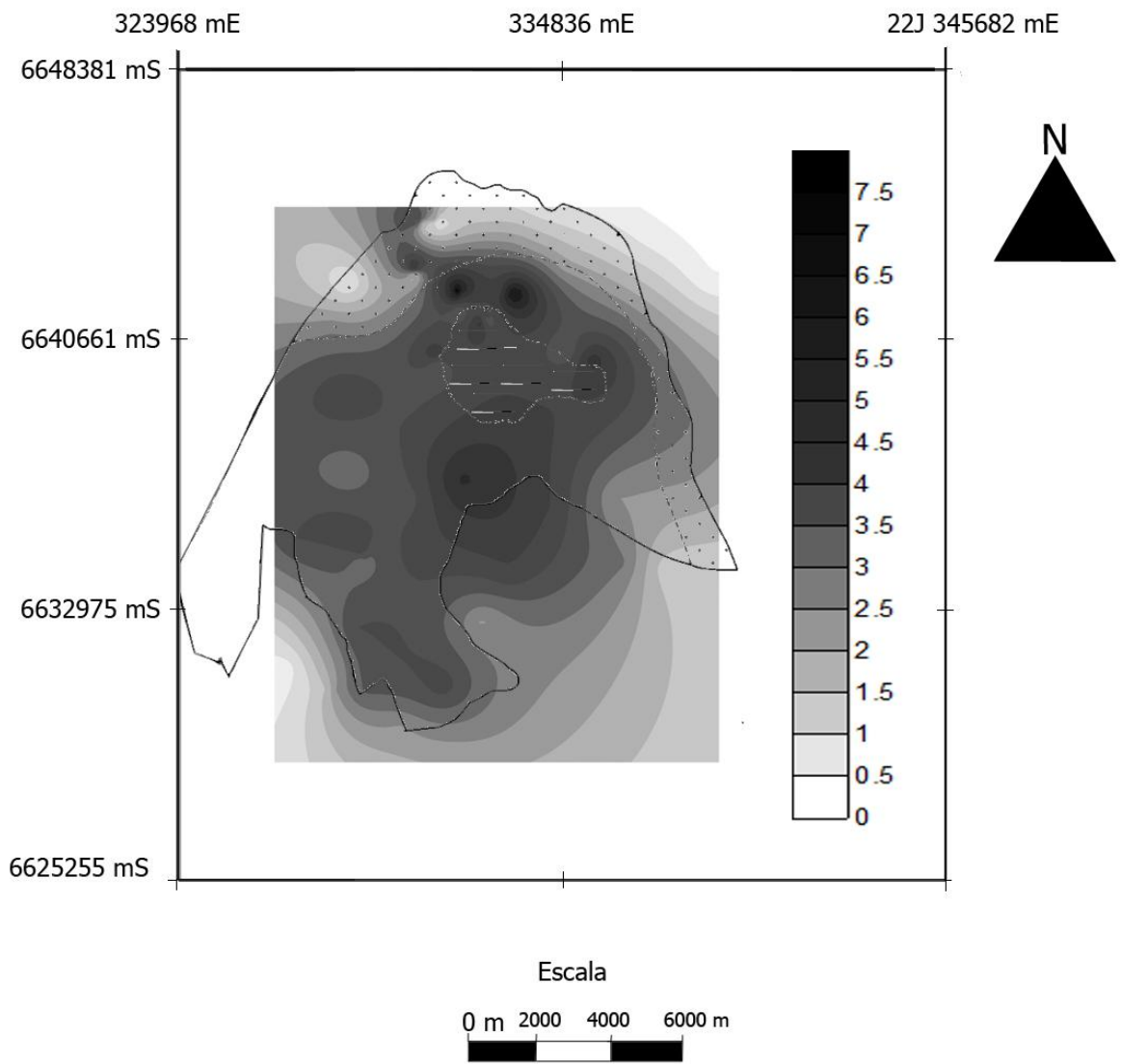


Ponto	Coordenadas		Cps	Dr (nSv/h)	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
	mE 22J	mS					
P01	332717	6644335	180	78,2	1,6	3,1	10
P02	334356	6644446	185	77	1,1	3,7	10,7
P03	334020	6643237	300	120,6	2,9	5,2	12,2
P04	334866	6642685	250	92,2	2,9	0,8	12,7
P05	334954	6640329	750	312,3	4	7,2	61,8
P06	335684	6640127	1000	424,6	5,8	14	73,8
P07	332666	6641165	400	189,4	3,9	4,8	29,3
P08	333072	6642072	550	254	5,1	5	43
P09	331235	6640206	400	194,8	5,4	3,6	26,5
P10	330683	6642621	800	401,3	4,7	25,8	48,3
P11	330922	6643943	180	67,8	1,7	1,2	9,9
P12	328838	6642300	160	45	0,9	1,3	6,9
P13	328364	6641057	250	87,2	3,3	1,5	7,8
P14	330463	6638854	370	166,4	4,4	2,8	24
P15	328669	6639166	480	207	4,9	3,1	33,9
P16	327131	6638935	530	210,8	4,3	3,4	37,1
P17	327131	6638935	760	351,2	6,1	4,7	68,8
P18	328753	6636895	350	132,9	3,6	2,6	18,1
P19	330575	6636128	500	223	4,3	6,1	35,4
P20	331994	6636699	500	242,4	6,1	8,6	27,5
P21	329157	6634445	460	219,9	3,8	5,3	38,4
P22	328437	6635473	560	231,2	4,7	4,9	38,2
P23	329026	6632477	550	235,6	4,5	4,9	40,4
P24	329241	6630595	370	140,1	4	3,2	17,3
P25	330677	6642693	720	320,0	5,8	5,8	78,8
P26	331773	6642046	684	243,6	6,3	8,2	43,4
P27	331787	6642044	827	340,4	8,3	16,6	52,4
P28	332622	6641152	516	227,5	5,9	8,1	39,6
P29	333455	6641981	1045	424,4	7,3	16,3	99,2
P30	331709	6628644	330	120,3	2,5	1,3	22,3
P31	330328	6629730	390	161,4	3	6,6	21,7
P32	328519	6630714	300	163,6	3,1	6	23
P33	328200	6630761	220	81,7	2	1,6	11,9
P34	327136	6631371	130	28,9	0,8	1	3

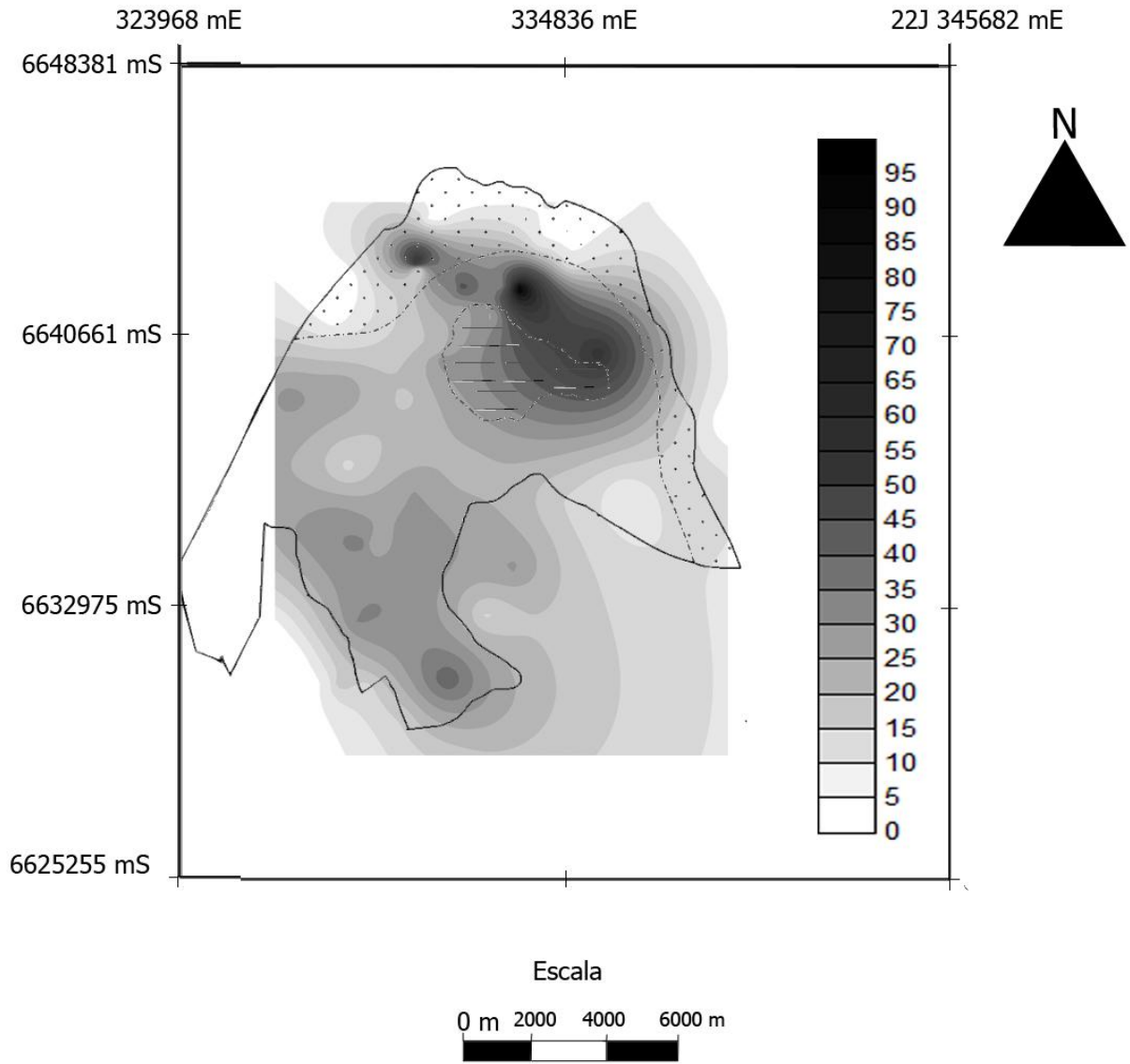
Ponto	Coordenadas		Cps	Dr (nSv/h)	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
	mE 22J	mS					
P35	326760	6632437	150	63,8	1,6	1,6	8,7
P36	327313	6634977	480	223,8	4,5	5,8	35,4
P37	329316	6634669	430	199,8	4,1	5,5	30,5
P38	329304	6634669	450	271,0	5,4	6,8	43,1
P39	330612	6634474	550	237,8	4,7	5,2	39,5
P40	331305	6640011	500	216,8	4,1	4,9	36,7
P41	331955	6641485	530	211,2	3,9	6	33,7
P42	332008	6641917	630	300,8	5,7	6,9	50,6
P43	331017	6642159	600	248,2	4,1	9,1	38,2
P44	330693	6642561	250	77,8	1,8	1,3	12,4
P45	336994	6644455	200	82,6	0,5	6,2	10,2
P46	337018	6643285	200	78,8	1,1	2,8	13
P47	338943	6642362	180	48,0	0,6	2,7	6,6
P48	339238	6640383	260	114,0	2,3	7,2	9,6
P49	339101	6638160	290	116,7	3,3	6,7	6,2
P50	338652	6636244	330	149,1	2,8	5,9	20
P51	337708	6634165	330	117,3	1,7	6,1	15,5
P52	336330	6636209	370	126,6	3	6,4	11,1
P53	336530	6634334	330	139,4	3,6	4,7	15,7
P54	334510	6636006	400	166,2	5	3,1	20,6
P55	333342	6633995	500	244,0	4,9	7,5	36,1
P56	332573	6632665	360	159,7	2,9	8,2	18,6
P57	331501	6630810	620	275,5	4,8	5,6	49,8
P58	331297	6644080	170	47,4	1	1,8	5,9
P59	331271	6644100	230	95,1	2,8	3	9,4
P60	331166	6644016	180	65,4	2	1,6	7
P61	330837	6644031	300	151,9	4,6	4,4	15,3
P62	330887	6643962	200	85,7	2,6	1,1	11,5

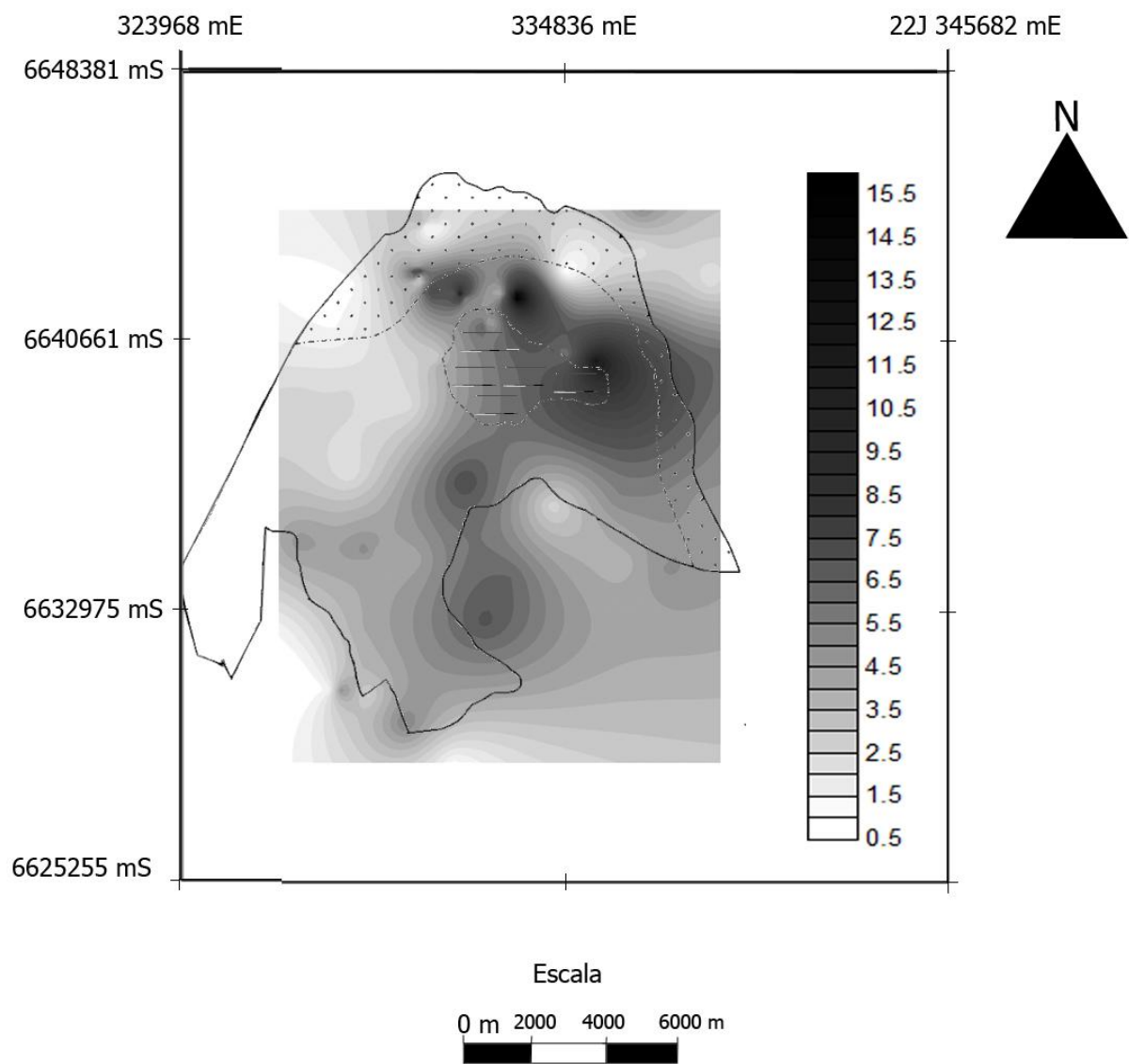




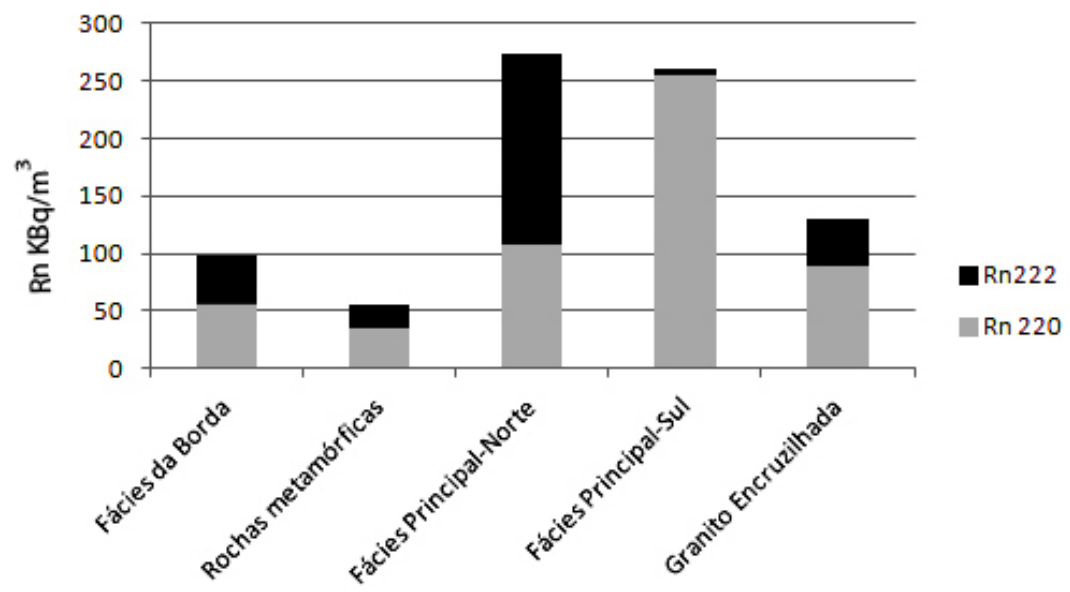


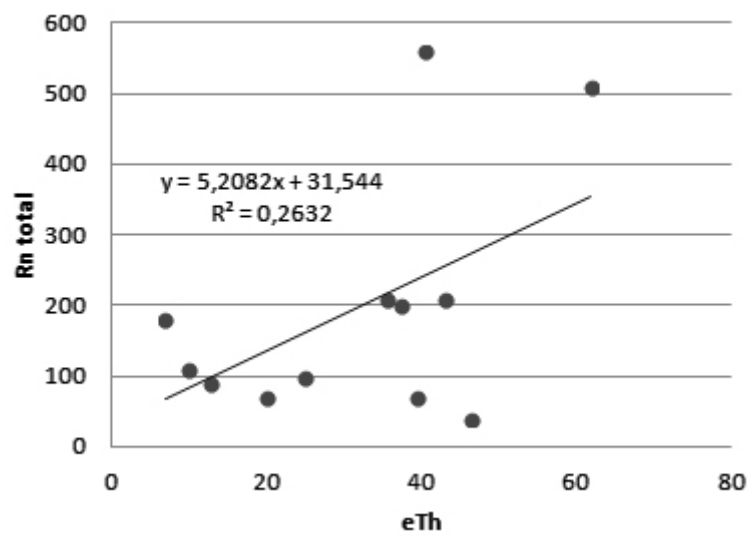
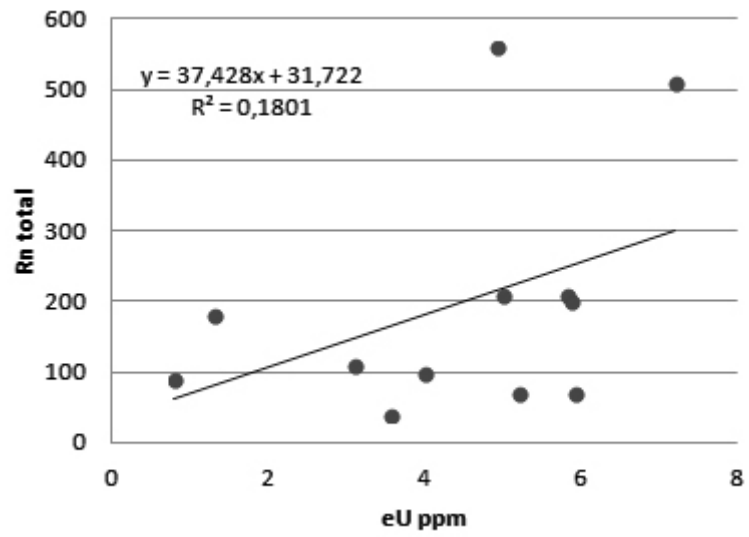


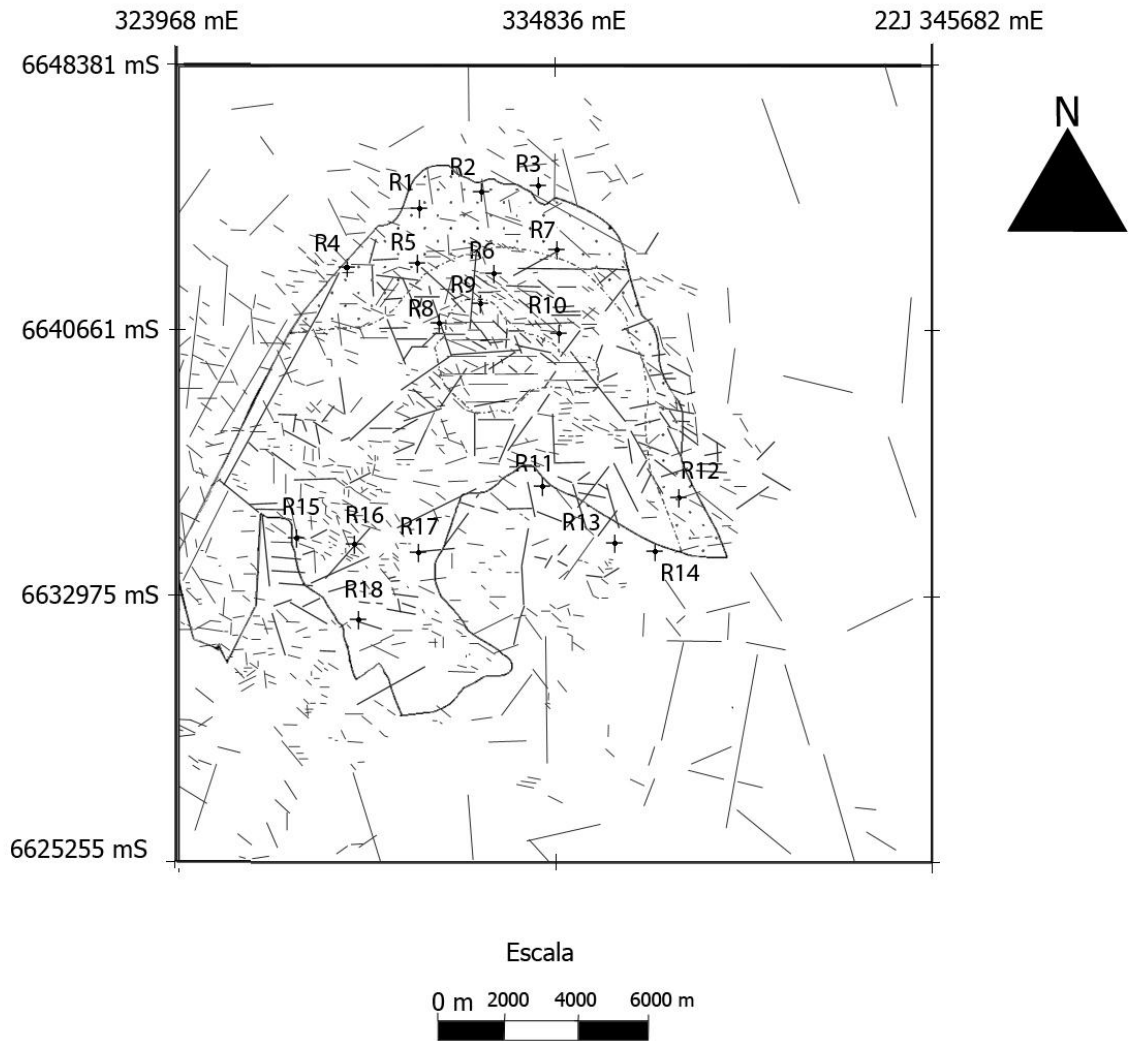


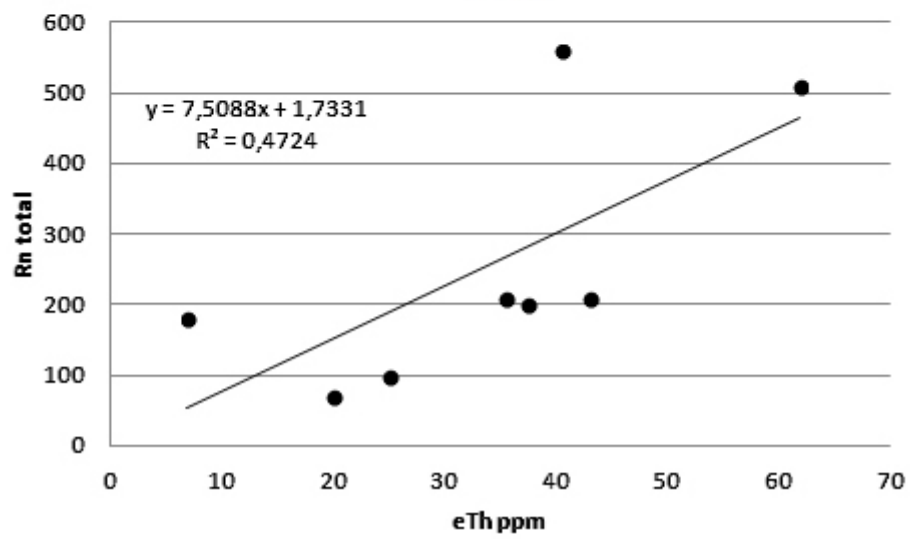
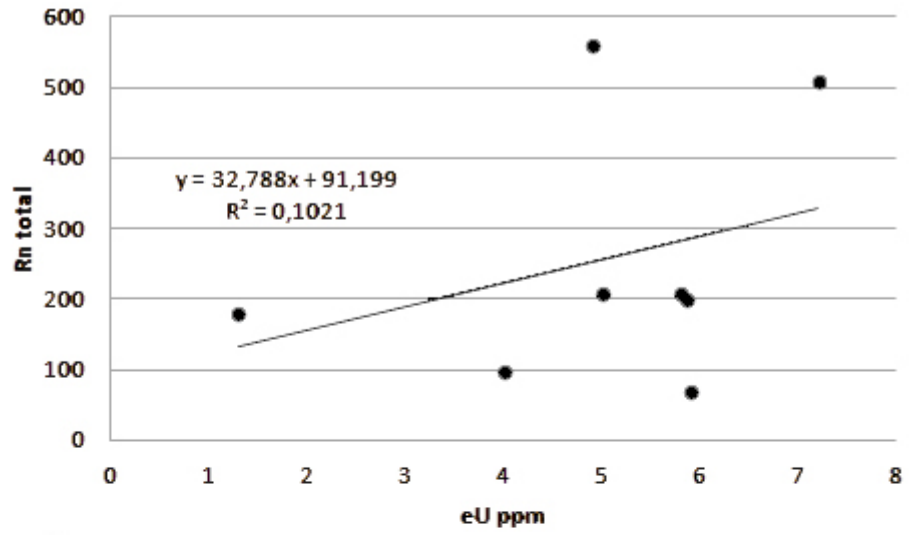


Ponto	Rn Total (KBq/m <sup>3</sup> )	<sup>220</sup> Rn (KBq/m <sup>3</sup> )	<sup>222</sup> Rn (KBq/m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Litologia
R1	<1	N.D.	<1	62 ± 2	Fácies da Borda
R2	110 ± 10	20 ± 10	88 ± 8	51 ± 5	Fácies da Borda
R3	55 ± 7	37 ± 9	18 ± 6	44 ± 6	Rochas metamórficas
R4	180 ± 20	130 ± 20	50 ± 20	37 ± 1	Fácies da Borda
R5	40 ± 10	30 ± 10	5 ± 3	54 ± 1	Fácies da Borda
R6	210 ± 20	210 ± 20	<3	37 ± 1	Fácies Principal-Norte
R7	90 ± 20	40 ± 20	52 ± 8	36 ± 2	Fácies da Borda
R8	100 ± 10	10 ± 20	90 ± 20	46 ± 2	Fácies Principal-Norte
R9	<4	<2	<3	32 ± 1	sienogranito
R10	510 ± 80	110 ± 90	400 ± 40	35 ± 2	Fácies Principal-Norte
R11	190 ± 30	140 ± 30	50 ± 10	32 ± 2	Granito Encruzilhada
R12	70 ± 20	70 ± 20	<2	31 ± 2	Fácies da Borda
R13	<1	N.D.	<1	28 ± 1	Granito Encruzilhada
R14	70 ± 10	40 ± 20	30 ± 10	29 ± 1	Granito Encruzilhada
R15	210 ± 40	210 ± 40	<2	48 ± 5	Fácies Principal-Sul
R16	200 ± 20	200 ± 20	<3	33 ± 2	Fácies Principal-Sul
R17	70 ± 10	70 ± 10	<1	34 ± 2	Fácies Principal-Sul
R18	560 ± 50	550 ± 50	8 ± 8	52 ± 4	Fácies Principal-Sul









## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho representa um estudo exploratório para entender os níveis de radiação gama na área do Maciço Sienítico Piquiri e as concentrações de Rn no ar contido nos poros dos solos. Com isto espera-se contribuir para o conhecimento das relações entre a geologia da área e o risco à saúde das pessoas que vivem na região.

O Maciço Sienítico Piquiri apresenta três fácies distintas a saber: a Fácies da borda, a Fácies Principal e a Fácies dominada por sienogranitos. A distribuição de K medido através do Espectrômetro de Radiação Gama revela claramente os contatos da Fácies da Borda com a Fácies Principal. A mineralogia do sienito indica clara tendência de afinidade alcalina, que se reflete pela presença relativamente abundante de minerais acessórios como zircão, titanita e apatita.

A Fácies Principal do Maciço Sienítico Piquiri apresenta os maiores valores de contagens por segundo e taxa de dose (radiação gama), com médias de 600 e 250 nSv/h, respectivamente. Esta fácies também apresenta as maiores concentrações médias de K (5 %), eU (6ppm) e eTh (40 ppm). Por outra lado, a Fácies da Borda registra os menores níveis de radiação gama, com médias de 300 cps e 110 nSv/h (taxa de dose), e relativamente baixas concentrações de K, eU e eTh, com médias de 2 %, 4 ppm e 10 ppm, respectivamente.

O ar contido nos solos da Fácies Principal do Maciço Sienítico Piquiri apresenta valores máximos de  $510 \text{ KBq/m}^3 \pm 80 \text{ KBq/m}^3$  ao Norte, e de  $560 \text{ KBq/m}^3 \pm 50 \text{ KBq/m}^3$  ao Sul. Estes valores são muito maiores que os valores recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para recintos fechados ( $100 \text{ Bq/m}^3$  a  $200 \text{ KBq/m}^3$ ), significando potencial risco de câncer de pulmão. Outro fator importante a considerar é a influência da densidade de fraturas na mobilidade do Rn até a superfície do terreno, o que determina haver registro de maiores teores de Rn em áreas mais fraturadas.

A maior densidade de fraturas é encontrada na zona sul da Fácies Principal, com densidade de  $10 \text{ Ne/Km}^2$ , no entanto, a região norte desta fácies também apresenta



elevados valores de densidade de fraturas. Por outro lado, os menores valores são verificados na região sudeste. Neste estudo, foi encontrado que existe uma relação direta entre a densidade de fraturas e as elevadas concentração de Rn nos solos (maior que 200 KBq/m<sup>3</sup>).

A maior parte do Rn da zona sul da Fácies Principal corresponde ao isótopo <sup>220</sup>Rn, podendo estar relacionado com a alta concentração de eTh nesta área. O <sup>220</sup>Rn possui uma mobilidade reduzida em relação ao isótopo <sup>222</sup>Rn, já que este possui um tempo de meia-vida menor. Por outro lado, a parte Norte da Fácies Principal apresenta maiores concentrações de <sup>222</sup>Rn no ar dos solos, tendo ligeira relação com a alta concentração de eU desta zona. Neste caso, sua mobilidade até a superfície pode ser facilitada pela alta densidade de fraturas desta área.

Os resultados deste trabalho indicam que as pessoas que vivem na região da Fácies Principal do Maciço Sienítico Piquiri podem apresentar um potencial risco ao câncer de pulmão devido à emissão de Rn. Por outro lado, a zona Sul da Fácies Principal possui um risco menor de câncer de pulmão, devido ao Rn. Portanto, é recomendável realizar medidas de radônio no ar das residências desta localidade para determinar o risco de câncer de pulmão, e de ser necessário, monitorar o Rn no ar das residências.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appleton, J.D. 2005. Radon in air and water. In: Selinus, O. & Smedley, P. (Eds). *Essentials of medical geology: impacts of the natural environment on public health*. Londres, British Geological Survey. NERC, p. 227 – 262.
- Babinski, M., Chemale Jr, F., Schmus, W.R.V., Hartmann, L.A. & Silva, L.C. 1997. U-Pb and Sm-Nd geochronology of the Neoproterozoic granitic-gneissic Dom Feliciano Belt, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 10, 263 – 274.
- Bitencourt, M.F., & Nardi, L.V.S. 2000. Tectonic setting and sources of magmatism related to the southern Brazilian Shear Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 184 – 187.
- Buffon, S.A. 2002. *Integração de dados geofísicos e geológicos na avaliação ambiental e epidemiológica de radiações naturais (radônio) no escudo Sul-Riograndense (RS - Brasil)*. Porto Alegre, 150p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Butler, A.P. & Schnabel, R.W. 1956. Distribution and general features of uranium occurrences in the United States. In: Page, L.R., Stocking, H.E. & Smith, H.B. (Eds.) *contributions to the geology of uranium and thorium by the United States Geological Survey and Atomic Energy Commission for the United Nations International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, Suíça, 1955. USGS Professional Paper, 300, p, 27 – 40.
- Castro, M.S.M., Vieira, V.A. & Assunção, R.M. 2004. Padrões espaço-temporais da mortalidade por câncer de pulmão no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, 7 (2), 131 – 143.

- Duarte, C.R. 2002. Radioelementos naturais na área do projeto Rio Preto (GO). Tese de doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade de São Paulo, Rio Claro, 169 p.
- Ferronsky, V.I. & Polyakov, V.A. 2012. *Isotopes of the Earth's Hydrosphere*. Londres, Springer, 625p.
- Fianco, A.C.B., Roisenberg, A. & Bonotto, D.M. 2012. Radon emissions related to the granitic Precambrian shield in southern Brazil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 48 (1), 122 – 131.
- Hartmann, L.A., Chemale Jr F. & Philipp R.P. 2007. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Iannuzzi R. & Frantz J.C. (Eds.). *50 anos de Geologia: Instituto de Geociências: Contribuições*. Brasil. Editora Comunicação e Identidade, p, 97 - 123.
- Hartmann, L.A., Nardi, L.V.S., Formoso, M.L.L., Remus, M.U.D., Lima, E.F. & Mexias, A. 1999. Magmatism and metallogeny in the crustal evolution of Rio Grande do Sul shield, Brazil. *Pesquisas em Geociências (UFRGS)*, 26: 45 – 63.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. 2002. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Viena, IAEA-TECDOC-1363, 179p.
- Jost, H., Brod, J.A., Holz, M., Kuhn, A., Flor, M.A., Kronbauer, A. & Dillenburg, S. 1985. Geologia estrutural, petrografia e ptrologia do Sienito Piquiri (Proterozóico superior), Rio Grande do Sul. In: *Anais do II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, 2, Florianópolis, SC, Brasil, SBG, p. 63 – 80.
- Kearey, P., Brooks, M. & Hill, I. 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3ra edição, Oxford, Blackwell Science, 281p.
- Lombardi, S. & Voltattorni, N. 2010. Rn, He and CO<sub>2</sub> soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults. *Applied Geochemistry*, 25, 1206 – 1220.

- Milsom, J. 2003. *Field Geophysics*. 3ra edição, Chichester, Inglaterra, John Wiley & Sons Ltd, 232p.
- Nardi, L.V.S., Cid, J.P. & Bitencourt, M.F. 2007. Minette mafic microgranular enclaves and their relationship to host syenites in systems formed at mantle pressures: major and trace element evidence from the Piquiri Syenite Massif, southernmost Brazil. *Mineralogy and Petrology*, 91, 101 – 116.
- Nardi, L.V.S., Plá-Cid, J., Bitencourt, M.F. & Stabel, L.Z. 2008. Geochemistry and petrogenesis of post-collisional ultrapotassic syenites and granites from southernmost Brazil: the Piquiri Syenite Massif. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 80 (2), 353 – 371.
- Pascale, F.T., Francesco, S., Carbone, P., Cuoco, E. & Tedesco, D. 2014. Dry soil diurnal quase-periodic oscillations in soil  $^{222}\text{Rn}$  concentrations. *Radiation Measurements*, 66, 31 – 41.
- Pasculli, A., Palermi, S., Sarra, A., Piacentini, T. & Miccadei, E. 2014. A modelling methodology for the analysis of radon potential based on environmental geology and geographically weighted regression. *Environmental Modeling & Software*, 54, 165 – 181.
- Pearce, J. & Boyle, P. 2005. Examining the relationship between lung cancer and radon in small areas across Scotland. *Health & Place*, 11, 275 – 282.
- Pereira, C.M.A. 2009. Mapeamento de aquíferos fraturados empregando métodos geoeletricos e emanção natural de radônio. São Paulo, 63p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Pereira, A.J.S.C. & Neves, L.J.P.F. 2012. Estimation of the radiological background and dose assessment in areas with naturally occurring uranium geochemical anomalies-a case study in the Iberian Massif (Central Portugal). *Journal of Environmental Radioactivity*, 112, 96 -107.

- Philipp, R.P., Machado, R., Nardi, L.V.S. & Lafon, J.M. 2002. O magmatismo granítico neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: Novos dados e Revisão da geocronologia regional. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(2), 277 – 290.
- Rogers, J.J.W. & Adams, J.A.S. 1969. Uranium. *In: Wedepohl, K.H. (Ed.). Handbook of geochemistry*. New York, Springer-Verlag, v. 2, p, 92B - 920.
- Santos, C.E.L. 2008. *Determinação dos processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas de fluorita e carvão do estado de santa catarina: critérios para avaliação dos riscos radiológicos*. Porto Alegre, 137p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Scheib, C., Appleton, J.D., Miles, J.C.H. & Hodgkinson, E. 2013. Geological controls on radon potential in England. *Proceedings of the Geologists' Association*, 124, 910 – 928.
- Silva, A.A.R. 2005. *Radônio e filhos em residências da cidade de São Paulo*. São Paulo, 119p. Tese de Doutorado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo.
- Smethurst, M.A., Strand, T., Sundal, A.V. & Rudjord, A.L. 2008. Large-scale radon hazard evaluation in the Oslofjord region of Norway utilizing indoor radon concentrations, airborne gamma ray spectrometry and geological mapping. *Science of the Total Environment*, 407, 379 – 393.
- Stabel, L.Z., Nardi, L.V.S. & Cid, J.P. 2001. Química mineral e evolução petrológica do sienito Piquiri magmatismo shoshonítico, neoproterozóico, pós-colisional no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 31 (2), 211 – 222.
- Torres-Durán, M., Barros-Dios, J.M., Fernández-Villar, A. & Ruano-Ravina, A. 2014. Residential radon and lung cancer in never smokers. A systematic review. *Cancer Letters*, 345, 21 – 26.

USGS. United States Geological Survey. Shuttle Radar Topography Mission.  
Disponível em: <http://srtm.usgs.gov/index.php>. Acesso em: 7 abr. 2014.

Vieira Jr, N., Fernandes, L.A.D., Koester, E. & Scherer, C.S. 1989. Enclaves microgranulares do Maciço Sienítico Piquiri-RS. Acta Geológica Leopoldensia, 29, 185 – 206.

WHO, World Health Organization. 2009. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Genebra, WHO, 95p.

## **ANEXOS**

## Anexo A. Resultados radiométricos da região do Maciço Sienítico Piquiri.

Tabela 7. Resultados de radiometria, obtidos pelo método de gama espectrômetro RS-125. Desde o ponto P01 até P34.

Ponto	Coordenadas		Cps	Dr (nSv/h)	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
	mE 22J	mS					
P01	332717	6644335	180	78,2	1,6	3,1	10
P02	334356	6644446	185	77	1,1	3,7	10,7
P03	334020	6643237	300	120,6	2,9	5,2	12,2
P04	334866	6642685	250	92,2	2,9	0,8	12,7
P05	334954	6640329	750	312,3	4	7,2	61,8
P06	335684	6640127	1000	424,6	5,8	14	73,8
P07	332666	6641165	400	189,4	3,9	4,8	29,3
P08	333072	6642072	550	254	5,1	5	43
P09	331235	6640206	400	194,8	5,4	3,6	26,5
P10	330683	6642621	800	401,3	4,7	25,8	48,3
P11	330922	6643943	180	67,8	1,7	1,2	9,9
P12	328838	6642300	160	45	0,9	1,3	6,9
P13	328364	6641057	250	87,2	3,3	1,5	7,8
P14	330463	6638854	370	166,4	4,4	2,8	24
P15	328669	6639166	480	207	4,9	3,1	33,9
P16	327131	6638935	530	210,8	4,3	3,4	37,1
P17	327131	6638935	760	351,2	6,1	4,7	68,8
P18	328753	6636895	350	132,9	3,6	2,6	18,1
P19	330575	6636128	500	223	4,3	6,1	35,4
P20	331994	6636699	500	242,4	6,1	8,6	27,5
P21	329157	6634445	460	219,9	3,8	5,3	38,4
P22	328437	6635473	560	231,2	4,7	4,9	38,2
P23	329026	6632477	550	235,6	4,5	4,9	40,4
P24	329241	6630595	370	140,1	4	3,2	17,3
P25	330677	6642693	720	320,0	5,8	5,8	78,8
P26	331773	6642046	684	243,6	6,3	8,2	43,4
P27	331787	6642044	827	340,4	8,3	16,6	52,4
P28	332622	6641152	516	227,5	5,9	8,1	39,6
P29	333455	6641981	1045	424,4	7,3	16,3	99,2
P30	331709	6628644	330	120,3	2,5	1,3	22,3
P31	330328	6629730	390	161,4	3	6,6	21,7
P32	328519	6630714	300	163,6	3,1	6	23
P33	328200	6630761	220	81,7	2	1,6	11,9
P34	327136	6631371	130	28,9	0,8	1	3



Tabela 8. Resultados de radiometria, obtidos pelo método de gama espectrômetro RS-125. Desde o ponto P35 até P62.

Ponto	Coordenadas		Cps	Dr (nSv/h)	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
	mE 22J	mS					
P35	326760	6632437	150	63,8	1,6	1,6	8,7
P36	327313	6634977	480	223,8	4,5	5,8	35,4
P37	329316	6634669	430	199,8	4,1	5,5	30,5
P38	329304	6634669	450	271,0	5,4	6,8	43,1
P39	330612	6634474	550	237,8	4,7	5,2	39,5
P40	331305	6640011	500	216,8	4,1	4,9	36,7
P41	331955	6641485	530	211,2	3,9	6	33,7
P42	332008	6641917	630	300,8	5,7	6,9	50,6
P43	331017	6642159	600	248,2	4,1	9,1	38,2
P44	330693	6642561	250	77,8	1,8	1,3	12,4
P45	336994	6644455	200	82,6	0,5	6,2	10,2
P46	337018	6643285	200	78,8	1,1	2,8	13
P47	338943	6642362	180	48,0	0,6	2,7	6,6
P48	339238	6640383	260	114,0	2,3	7,2	9,6
P49	339101	6638160	290	116,7	3,3	6,7	6,2
P50	338652	6636244	330	149,1	2,8	5,9	20
P51	337708	6634165	330	117,3	1,7	6,1	15,5
P52	336330	6636209	370	126,6	3	6,4	11,1
P53	336530	6634334	330	139,4	3,6	4,7	15,7
P54	334510	6636006	400	166,2	5	3,1	20,6
P55	333342	6633995	500	244,0	4,9	7,5	36,1
P56	332573	6632665	360	159,7	2,9	8,2	18,6
P57	331501	6630810	620	275,5	4,8	5,6	49,8
P58	331297	6644080	170	47,4	1	1,8	5,9
P59	331271	6644100	230	95,1	2,8	3	9,4
P60	331166	6644016	180	65,4	2	1,6	7
P61	330837	6644031	300	151,9	4,6	4,4	15,3
P62	330887	6643962	200	85,7	2,6	1,1	11,5