

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**THIAGO DANIEL LIEBL
VALQUÍRIA RATES GIBSON**

**MAPEAMENTO DO SOLO DA SEDE ECOVILLE DA UTFPR COM
RELAÇÃO À CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO ^{222}Rn**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

**THIAGO DANIEL LIEBL
VALQUÍRIA RATES GIBSON**

**MAPEAMENTO DO SOLO DA SEDE ECOVILLE DA UTFPR COM
RELAÇÃO À CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO ²²²Rn**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, do Departamento de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Janine Nicolosi Corrêa.

CURITIBA

2016



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Campus Curitiba – Sede Ecoville

Departamento Acadêmico de Construção Civil

Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

MAPEAMENTO DO SOLO DA SEDE ECOVILLE DA UTFPR COM RELAÇÃO À CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO ²²²Rn

Por

**THIAGO DANIEL LIEBL
VALQUÍRIA RATES GIBSON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 23 de novembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

**Prof^a. Orientadora – Janine Nicolosi Corrêa, Dr^a.
UTFPR**

**Prof^a. Eliane Betânia Carvalho Costa, Dr^a.
UTFPR**

**Prof^a. Juliana Lundgren Rose, Dr^a.
UTFPR**

Dedicamos este trabalho às nossas famílias, amigos, colegas de curso e a todos que nos ajudaram de alguma forma a chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer aos nossos familiares, amigos, colegas de turma e professores pelo apoio dado durante todo o nosso curso.

Em especial, agradecemos toda a orientação nos dada pela Prof^a. Dr^a. Janine Nicolosi Corrêa para que fosse possível a realização deste trabalho, além de todas as pessoas que nos deram orientação para realização dos ensaios de laboratório e campo.

RESUMO

LIEBL, Thiago Daniel; GIBSON, Valquíria Rates. Título do trabalho: Mapeamento do solo da sede Ecoville da UTFPR com relação à concentração de radônio ^{222}Rn . 2016. 120 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O radônio (^{222}Rn) é a segunda causa mais comum de câncer de pulmão do mundo, ficando atrás somente do cigarro, sendo que, em não-fumantes, é a principal causa. Resultante do decaimento do urânio, elemento muito presente nos solos, o radônio tem como um de seus isótopos o ^{222}Rn , sendo este um isótopo que possui meia-vida de 3,8 dias, o que pode ser considerada uma meia-vida longa se comparado com os outros isótopos do radônio. Tendo-se que a permeabilidade é um dos principais fatores que controlam a emissão de radônio no solo, é necessário obter valores para os locais onde serão construídas as edificações, bem como o monitoramento dos níveis de radônio. O presente trabalho consistiu na realização de medições de radônio no solo na Sede Ecoville da UTFPR, assim como na realização de ensaios de permeabilidade dos pontos escolhidos.

Palavras-chave: Radônio, solo, permeabilidade, radioatividade natural.

ABSTRACT

LIEBL, Thiago Daniel; GIBSON, Valquíria Rates. **Title of the working:** Soil mapping Ecoville UTFPR headquarters regarding the concentration of radon ^{222}Rn . 2016. 120 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2016.

Radon (^{222}Rn) is the second most common cause of the world of lung cancer, behind cigarette, and, in non-smoking, is the main cause. Resulting from the uranium decay, element that is very much present in the soil, radon has as one of its isotopes ^{222}Rn which is an isotope having a half-life of 3.8 days, which can be considered a long half-life compared with the other isotopes of radon. Having that permeability is one of the main factors that control the radon emanation in the soil, it is necessary to obtain values for the places where the buildings will be built, as well as the monitoring of radon levels above the recommended. This study aims to carry out radon measurements in soil at Headquarters Ecoville UTFPR, as well as obtaining the permeability of the chosen points.

Keywords: Radon, soil, permeability, natural radioactivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais fontes de radiação e suas respectivas porcentagens.....	18
Figura 2 - Exposição do homem à radiação ionizante no ano de 1982 e no ano de 2008.....	19
Figura 3 - Mapa dos EUA com relação às concentrações de radônio.....	21
Figura 4 - Série radioativa do urânio.....	23
Figura 5 - Parâmetros para medida de permeabilidade.....	25
Figura 6 - Representação dos ensaios de permeabilidade.....	26
Figura 7 - Concentração de radônio em relação à profundidade no solo.....	27
Figura 8 - Geologia do escudo paranaense.....	28
Figura 9 - Variação da concentração diurna de radônio e torônio.....	31
Figura 10 - Variação da concentração mensal de radônio e torônio.....	32
Figura 11 - Concentração de ^{222}Rn no Rio de Janeiro, no inverno de 1997.....	33
Figura 12 - Concentração de ^{222}Rn no Rio de Janeiro, no verão de 1997.....	33
Figura 13 - Infiltração de radônio proveniente do solo nos ambientes <i>indoor</i>	34
Figura 14 - Monitor AlphaGUARD (SAPHYMO).....	39
Figura 15 - Equipamentos componentes para a medição de radônio.....	40
Figura 16 - Ilustração do sistema fechado composto pela bomba de ar e pelo AlphaGUARD.....	40
Figura 17 - Ilustração do circuito de equipamentos para medição de radônio do solo com a bomba de ar ligada.....	41
Figura 18 - Ilustração do circuito de equipamentos para medição de radônio do solo com a bomba de ar desligada.....	42
Figura 19 - Picnômetros com solo preenchendo um terço do volume do bulbo.....	48
Figura 20 - Picnômetros com água cobrindo o solo em um terço do volume do bulbo.....	48
Figura 21 - Equipamento para aplicação do vácuo.....	49
Figura 22 - Pressão de vácuo durante o ensaio de determinação da massa específica dos grãos.....	49
Figura 23 - Pesagem dos picnômetros com apenas água destilada.....	50

Figura 24 - Local da medida 01.....	56
Figura 25 - Local da medida 02.....	61
Figura 26 - Local da medida 03.....	66
Figura 27 - Local da medida 04.....	71
Figura 28 - Local da medida 05.....	76
Figura 29 - Local da medida 06.....	81
Figura 30 - Local da medida 07.....	85
Figura 31 - Local da medida 08.....	90
Figura 32 - Local da medida 09.....	95
Figura 33 - Local da medida 10.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atividades dos radionuclídeos em diferentes tipos de rochas.....	29
Tabela 2 – Concentração dos radionuclídeos nos solos de diferentes países.....	29
Tabela 3 – Concentração de radônio no solo em algumas regiões de Curitiba.....	30
Tabela 4 – Concentração de radônio <i>indoor</i> em diferentes países.....	36
Tabela 5 – Viscosidade da água.....	46
Tabela 6 – Razão entre a densidade relativa da água à temperatura (t) e a densidade relativa da água a 20°C.....	51
Tabela 7 – Medida de background 01.....	56
Tabela 8 – Valores calculados de P do background da medida 01.....	57
Tabela 9 – Medida de radônio no solo 01.....	57
Tabela 10 – Valores calculados de P para a medida 01 de radônio no solo.....	58
Tabela 11 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 01.....	59
Tabela 12 – Medida de background 02.....	61
Tabela 13 – Valores calculados de P do background da medida 02.....	62
Tabela 14 – Medida de radônio no solo 02.....	63
Tabela 15 – Valores calculados de P para a medida 02 de radônio no solo.....	63
Tabela 16 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 02.....	64
Tabela 17 – Medida de background 03.....	66
Tabela 18 – Valores calculados de P do background da medida 03.....	67
Tabela 19 – Medida de radônio no solo 03.....	68
Tabela 20 – Valores calculados de P para a medida 03 de radônio no solo.....	68
Tabela 21 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 03.....	69
Tabela 22 – Medida de background 04.....	71
Tabela 23 – Valores calculados de P do background da medida 04.....	72
Tabela 24 – Medida de radônio no solo 04.....	73
Tabela 25 – Valores calculados de P para a medida 04 de radônio no solo.....	74
Tabela 26 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 04.....	75
Tabela 27 – Medida de background 05.....	76
Tabela 28 – Valores calculados de P do background da medida 05.....	77
Tabela 29 – Medida de radônio no solo 05.....	78

Tabela 30 – Valores calculados de P para a medida 05 de radônio no solo.....	79
Tabela 31 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 05.....	80
Tabela 32 – Medida de background 06.....	81
Tabela 33 – Valores calculados de P do background da medida 06.....	82
Tabela 34 – Medida de radônio no solo 06.....	83
Tabela 35 – Valores calculados de P para a medida 06 de radônio no solo.....	84
Tabela 36 – Medida de background 07.....	86
Tabela 37 – Valores calculados de P do background da medida 07.....	86
Tabela 38 – Medida de radônio no solo 07.....	87
Tabela 39 – Valores calculados de P para a medida 07 de radônio no solo.....	88
Tabela 40 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 07.....	89
Tabela 41 – Medida de background 08.....	90
Tabela 42 – Valores calculados de P do background da medida 08.....	91
Tabela 43 – Medida de radônio no solo 08.....	92
Tabela 44 – Valores calculados de P para a medida 08 de radônio no solo.....	92
Tabela 45 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 08.....	93
Tabela 46 – Medida de background 09.....	95
Tabela 47 – Valores calculados de P do background da medida 09.....	96
Tabela 48 – Medida de radônio no solo 09.....	97
Tabela 49 – Valores calculados de P para a medida 09 de radônio no solo.....	97
Tabela 50 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 09.....	98
Tabela 51 – Medida de background 10.....	100
Tabela 52 – Valores calculados de P do background da medida 10.....	101
Tabela 53 – Medida de radônio no solo 10.....	102
Tabela 54 – Valores calculados de P para a medida 10 de radônio no solo.....	102
Tabela 55 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 10.....	103
Tabela 56 – Valores calculados para as concentrações de radônio em cada um dos dez pontos medidos.....	104
Tabela 57 – Apresentação dos dados coletados e dos resultados do peneiramento grosso.....	106
Tabela 58 – Apresentação dos dados coletados e dos resultados do peneiramento fino.....	106
Tabela 59 – Apresentação dos dados coletados e dos resultados ensaio de sedimentação.....	107

Tabela 60 – Composição do solo da Sede Ecoville da UTFPR.....	108
Tabela 61 – Apresentação dos dados coletados e dos resultados do ensaio da massa específica dos grãos.....	108
Tabela 62 – Dados utilizados nos cálculos da permeabilidade do corpo de prova indeformado.....	109
Tabela 63 – Dados e resultado obtido no ensaio de permeabilidade do corpo de prova indeformado.....	109
Tabela 64 – Dados utilizados nos cálculos da permeabilidade do corpo de prova compactado.....	110
Tabela 65 – Dados e resultado obtido no ensaio de permeabilidade do corpo de prova compactado.....	110

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn	60
Gráfico 2 – Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn	65
Gráfico 3 – Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn	70
Gráfico 4 – Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn	75
Gráfico 5 – Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn	80
Gráfico 6 – Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn	89
Gráfico 7 – Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn	94
Gráfico 8 – Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn	99
Gráfico 9 – Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn	104
Gráfico 10 – Curva granulométrica do solo próximo ao local da medida 02.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

Bq/m³ - Becquerel por metro cúbico

Ci – curies

pCi/L – picoCuries por litro

²²⁶Ra – Rádio 226

²¹⁹Rn – Radônio 219

²²⁰Rn – Radônio 220

²²²Rn – Radônio 222

²³⁸U – Urânio 238

LISTA DE SIGLAS

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria

URSS - União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE ACRÔNIMOS

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry

EPA – Environmental Protection Agency

ICRP – International Commission on Radiological Protection

NCRP – National Council on Radiation Protection & Measurements

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

WHO – World Health Organization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 RADIAÇÃO	16
2.1.1 Radiação Natural	17
2.1.2 Efeitos da Radiação Decorrente do Radônio no Corpo Humano.....	19
2.2 RADÔNIO	22
2.2.1 O isótopo ²²² Rn	23
2.3 RADÔNIO NO SOLO	24
2.3.1 Concentrações Usuais de Radônio e Radionuclídeos no Solo	29
2.4 RADÔNIO EM AMBIENTES DE CONVÍVIO HUMANO (<i>INDOOR</i>)	34
2.4.1 Como Reduzir a Concentração de Radônio nos Ambientes.....	37
3 METODOLOGIA.....	38
3.1 MEDIÇÕES DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO COM O DETECTOR ALPHAGUARD.....	38
3.1.1 Metodologia das Medidas de Background	39
3.1.2 Metodologia das Medidas de Radônio no Solo com a Bomba de Ar Ligada ..	41
3.1.3 Metodologia das Medidas de Radônio no Solo com a Bomba de Ar Desligada para Inferência do Valor de Torônio na Câmara do AlphaGUARD.....	42
3.2 ENSAIO DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	43
3.2.1 Peneiramento Grosso	43
3.2.2 Peneiramento Fino	44
3.2.3 Ensaio de Sedimentação	44
3.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA	47
3.4 ENSAIO LABORATORIAL DE PERMEABILIDADE DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	52
3.4.1 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 RESULTADOS PARA AS MEDIÇÕES DE RADÔNIO.....	54
4.1.1 Resultado da Medida 01	55
4.1.2 Resultado da Medida 02	60
4.1.3 Resultado da Medida 03	65
4.1.4 Resultado da Medida 04.....	70
4.1.5 Resultado da Medida 05	76
4.1.6 Resultado da Medida 06	81
4.1.7 Resultado da Medida 07	85
4.1.8 Resultado da Medida 08	90

4.1.9 Resultado da Medida 09.....	94
4.1.10 Resultado da Medida 10.....	99
4.2 CÁLCULO DA MÉDIA DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NO CAMPUS ECOVILLE DA UTFPR.....	104
4.3 RESULTADOS PARA A GRANULOMETRIA.....	105
4.3.1 Resultados para o Ensaio de Peneiramento Grosso.....	105
4.3.2 Resultados para o Ensaio de Peneiramento Fino.....	106
4.3.3 Resultados para o Ensaio de Sedimentação.....	106
4.3.4 Apresentação da Curva Granulométrica Obtida.....	107
4.4 RESULTADOS PARA O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS.....	108
4.5 RESULTADOS PARA O ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	108
5 CONCLUSÕES.....	111
REFERÊNCIAS.....	112

1 INTRODUÇÃO

As relações entre os agentes físicos e as doenças são objetos de investigação que permeiam diversas áreas de pesquisa. Isto pode ser observado nos documentos da World Health Organization (WHO, 2016), que apresentam resultados de pesquisas em campos da ciência que estão relacionados à saúde.

Atualmente, o câncer de pulmão é o mais frequente na população mundial e o que provoca o maior número de mortes anualmente. O câncer de pulmão tem características específicas em relação ao tipo de lesão que o provoca, sendo possível identificar a causa provável do tumor. Desta forma, a WHO em seus documentos, conclui que o cigarro é o principal causador do câncer de pulmão (WHO, 2014).

Os malefícios causados pelo gás radônio (^{222}Rn) são responsáveis pela segunda causa mais comum do câncer de pulmão. Se forem considerados apenas as pessoas não fumantes, é, inclusive, a principal causa desta doença (WHO, 2014).

O radônio (^{222}Rn) é proveniente do decaimento do Rádio (^{226}Ra) que, por sua vez, é proveniente do decaimento do Urânio (^{238}U). É o único gás da série radioativa do Urânio e se encontra naturalmente no ar atmosférico, em águas subterrâneas, em materiais de construção e também nos solos e rochas (ATSDR, 2000).

O radônio é um elemento gasoso e radioativo, classificado na tabela periódica como gás nobre, tendo como isótopos naturais o ^{219}Rn , o ^{220}Rn e o ^{222}Rn . A meia-vida dos dois primeiros é muito curta. A meia-vida do ^{222}Rn é de aproximadamente 3,8 dias, o que torna este isótopo o mais importante nas investigações sobre câncer de pulmão (UNSCEAR, 2000).

Sendo um gás inodoro e incolor, é imperceptível aos sentidos humanos. Tal fato é causa de grande preocupação, já que, ao ser inalado, entra em contato com os pulmões e seu decaimento, por meio de partículas alfa, e o decaimento de seus filhos de meia-vida curta dentro do pulmão, contribuem para a dose recebida (UNSCEAR, 2000).

O radônio é responsável por cerca de 55% da radiação que um ser humano pode receber ao longo de sua vida, sendo os outros 45% provenientes de raios x, radiação terrestre, medicina nuclear, resíduos de explosões nucleares, entre outros (BUSHONG, 2001).

Mais comum em solos, minas subterrâneas e em ambientes fechados, o radônio (^{222}Rn) pode ter sua concentração facilmente reduzida através de um sistema de ventilação adequado, permitindo a circulação do ar (AMERICAN CANCER SOCIETY, 2015).

Como as pessoas permanecem em locais fechados por mais de 80% de seu tempo, a radiação do ambiente pode provocar situações de exposição prolongada, aumentando os riscos de contaminação. Além disso, a concentração de radônio em ambientes fechados é de 2 a 20 vezes maior que em ambientes com boa ventilação (ICRP, 2005).

As concentrações de radônio em ambientes de convívio humano estão relacionadas, principalmente, à emissão do radônio do solo. Em segundo plano, o radônio advindo dos materiais de construção, principalmente os que contêm rochas graníticas ou fosfogesso em sua composição, contribuem para a concentração nestes ambientes, chamada, no jargão internacional, como concentração *indoor* (UNSCEAR, 2000).

Devido ao pequeno número de medidas de radônio no solo, o que dificulta a efetivação de legislação no Brasil a respeito dos limites *indoor* e, ainda, à falta de informação da população a respeito do assunto, torna-se necessário a realização de estudos que determinem a concentração desse gás no solo, a fim de auxiliar o entendimento sobre sua influência no risco à saúde da população.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo determinar a concentração média de radônio ^{222}Rn no solo do terreno da Sede Ecoville da UTFPR.

1.2 JUSTIFICATIVA

O trabalho se justifica pelos seguintes pontos:

- Como mostrado em diversos estudos, o gás radônio, além de estar presente nos materiais de construção, é emanado principalmente do solo. Sendo assim, quando concentrado em espaços fechados, o gás pode provocar câncer de pulmão, tornando-se um problema para a saúde pública (UNSCEAR, 2000);
- A concentração *indoor* de radônio está correlacionada à permeabilidade do solo, tornando-se a caracterização e a medição da permeabilidade do mesmo importante para auxiliar em futuros estudos (MÄKELÄINEN; ARVELA; VOUTILAINEN, 2001).
- No Brasil, não há um plano geral para a identificação e mapeamento da concentração de radônio no solo. Há trabalhos desenvolvidos pela CNEN e por grupos de pesquisa, mas devido à escassez de dados, tornam-se valiosos os estudos realizados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RADIAÇÃO

Este item 2.1, exceto seus subitens, está baseado nos trabalhos desenvolvidos pela pesquisadora Emiko Okuno (OKUNO, 1998), e publicados em livro que se tornou referência nacional sobre o assunto.

A radiação é uma forma de energia emitida por uma fonte, que se propaga de um ponto a outro, sob a forma de partículas, possuindo ou não carga elétrica, ou ainda sob a forma de ondas eletromagnéticas.

A ocorrência de radiação devido ao decaimento de um determinado elemento químico ocorre, pois, desde a origem do universo. A maioria dos elementos possui núcleos instáveis, que decaem com o passar do tempo, ou seja, perdem prótons e nêutrons de seu núcleo, liberando nesse processo, partículas e energia.

A radiação sob a forma de partículas, conhecida como radiação corpuscular, é constituída de um feixe energético de partículas, sendo que este pode ser de elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons, mésons pi, múons, dêuterons, partículas alfa, entre outras.

Algumas dessas partículas, tais como as partículas alfa, os elétrons e os pósitrons, são emitidas espontaneamente de núcleos atômicos que estão à procura de uma maior estabilidade energética. Tal fenômeno é conhecido como desintegração ou decaimento nuclear, e como resultado dessa emissão, o radionuclídeo pode se transformar em outro elemento.

O primeiro elemento, que não está estável, é chamado de elemento pai e, o elemento para o qual ele decai, de filho. Se o elemento filho ainda não tiver alcançado a estabilidade energética, ele também se desintegrará e assim por diante, até se transformar em um elemento estável. Ao intervalo de tempo no qual metade dos núcleos atômicos de uma amostra radioativa se desintegra, dá-se o nome de meia-vida física.

Quando a radiação possui energia suficiente para arrancar um dos elétrons orbitais de átomos neutros, transformando-os em um par de íons, pode-se denominar esta radiação como ionizante. Logo, pode-se entender como ionização, a

eliminação direta ou indireta de um elétron de um átomo, que se transforma em um íon positivo.

As partículas carregadas produzem ionização diretamente e, as neutras e as ondas eletromagnéticas, ao interagir com os átomos do meio, produzem ionização apenas indiretamente, criando partículas carregadas, que por sua vez podem ionizar.

A radiação ionizante, ou apenas radiação, diz respeito tanto a um feixe de partículas, com ou sem carga elétrica, quanto às ondas eletromagnéticas.

Todo feixe de partículas sem carga e as ondas eletromagnéticas possuem certa probabilidade de passar através de um meio material sem sofrer nenhuma interação e sem perder nenhuma energia, enquanto que uma partícula carregada sempre sofre colisões em um meio, perdendo energia gradativamente.

Se o meio no qual essas partículas passam é o tecido humano, as ionizações dos átomos do corpo podem resultar em quebra molecular e dar origem a alterações graves, como mutações genéticas, morte de células e câncer. Em muitos casos, o tecido vivo tem a propriedade de se recuperar.

2.1.1 Radiação Natural

A radiação natural é toda aquela que não possui origem na atividade humana. Pode ser proveniente do espaço, como os raios cósmicos e a luz, ou da própria crosta terrestre, fruto do decaimento de elementos como o urânio, sendo um desses elementos o radônio (IPEN, 2002 *apud* PETTA; CAMPOS, 2013).

Na figura 1, mostra-se um diagrama com as principais fontes de radiação e suas respectivas porcentagens.

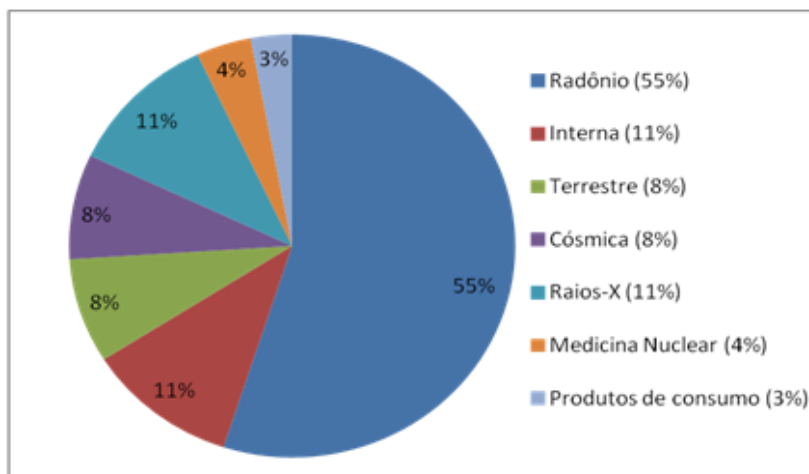


Figura 1: Principais fontes de radiação e suas respectivas porcentagens
Fonte: Adaptado por Corrêa (2011) de UNSCEAR (2008)

A grande maioria da radiação a que o ser humano está exposto provém de fontes naturais. Mais da metade do total provém do radônio, além de significativas quantidades de raios cósmicos, da radiação de rochas e solos (outros, além do radônio) e de radioisótopos que ocorrem naturalmente no corpo (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Já os 18% restantes provêm de fontes artificiais, principalmente raios X e radioisótopos usados na medicina, além de produtos de consumo, principalmente materiais de construção, que correspondem a 3% do total (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Na comparação dos dados publicados de 1982 e 2008 pela UNSCEAR, mostrados na figura 2, percebe-se a evolução da Proteção Radiológica, responsável por diminuir a radiação recebida em tratamentos médicos (UNSCEAR, 2008).

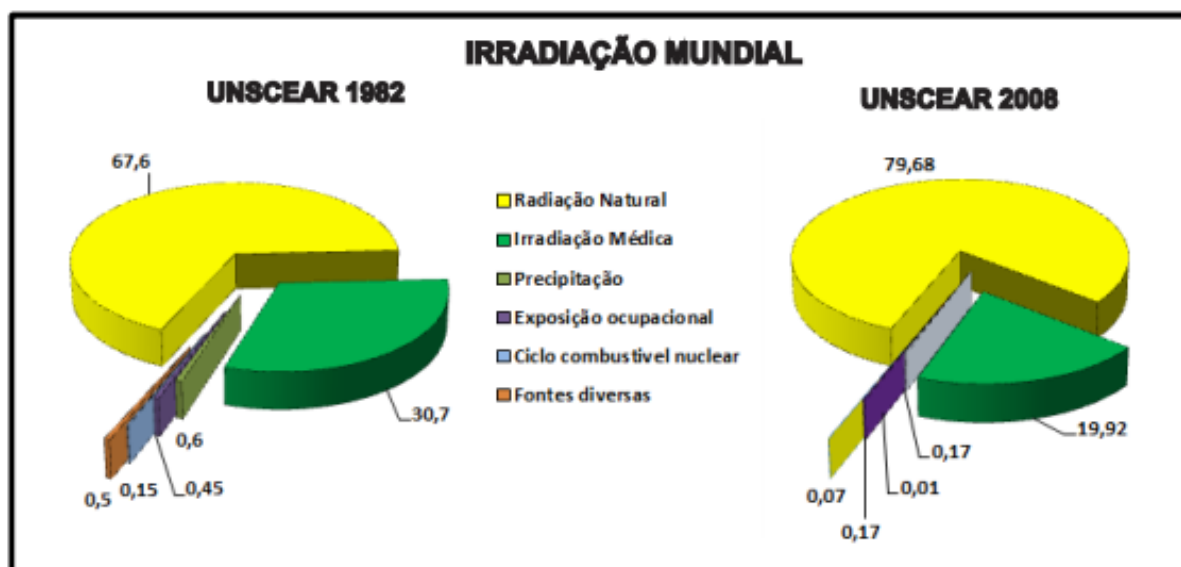


Figura 2: Exposição do homem à radiação ionizante no ano de 1982 e no ano de 2008
 Fonte: Adaptado de UNSCEAR (2008)

As exposições mundiais do homem devido à radiação natural em 1982 contribuíam, em termos relativos, com 67,6% e, em 2008, com 79,68% do total de exposição. Já em 1982, as exposições artificiais, como as exposições médicas, contribuíam com 30,7% e passaram para 19,92% em 2008. A diminuição da contribuição médica deve-se em grande parte a melhoria da tecnologia, principalmente a de proteção. Essa queda leva a percepção de que a quantidade de radiações naturais sofreu aumento na sua quantidade, o que não é real. (UNSCEAR, 2008).

2.1.2 Efeitos da Radiação Decorrente do Radônio no Corpo Humano

O radônio (^{222}Rn) é a segunda causa mais comum de câncer de pulmão do mundo, ficando atrás somente do cigarro. Sendo que, em não-fumantes, é a principal causa (WHO, 2014).

Apesar da descoberta, em 1870, de que os trabalhadores das minas de urânio tinham maior probabilidade de desenvolver câncer de pulmão, devido à concentração de radônio, a mineração continuou até a década de 1950, devido à demanda da até então URSS por urânio, sendo que o radônio foi confirmado como uma das causas do câncer de pulmão na década de 1960 (GREAVES, 2000).

O efeito cancerígeno tem a sua maior parte atribuída ao radônio e a seus filhos. O radônio por si só, sendo um gás não reativo, é expelido dos pulmões com a mesma rapidez que é inalado, sendo que, desta maneira, pouco dele se decompõe nos pulmões (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Entretanto, os filhos do radônio são isótopos de elementos reativos e se incorporam às partículas de pó que se acumulam nas minas, sendo este pó inalado pelos mineradores. Essas partículas se aderem ao revestimento dos pulmões e os filhos radioativos têm, portanto, tempo para provocar sérios danos (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Os produtos resultantes do decaimento de elementos radioativos causam alterações no material genético, ocasionando mutações que, algumas vezes, podem se tornar cancerosas (SCHMID; KUWERT; DREXLER, 2010).

Algumas moléculas biológicas são mais suscetíveis do que outras aos efeitos da radiação ionizante. Os ácidos nucleicos, que constituem o aparato genético das células, são particularmente vulneráveis a estes efeitos (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Se ocorrer uma única ionização no núcleo da célula, ocasionará um erro nas instruções genéticas para a combinação dos componentes protéicos da célula (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Acredita-se que certos tipos ou combinações desses erros transformam as células, que antes eram normais, em células cancerosas, sendo que há uma correlação comprovada entre a exposição à radiação e a incidência de câncer (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

A exposição ao radônio ocasiona uma elevação de 8% a 16% no risco de desenvolvimento de câncer, para cada aumento de 100 Bq/m³ na concentração de radônio, sendo que os níveis de gás radônio variam de acordo com a localidade e com a composição do solo e das rochas (SCHMID, KUWERT e DREXLER, 2010).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency* - EPA) estima que 1 em cada 15 moradias nos Estados Unidos apresente níveis de radônio acima do recomendado por esta agência, que é de 4 pCi/L, o que equivale a 148 Bq/m³ (EPA, 2006).

Na figura 3, pode ser visto o mapa dos EUA, onde estão indicados os níveis das diferentes concentrações de radônio nas residências.

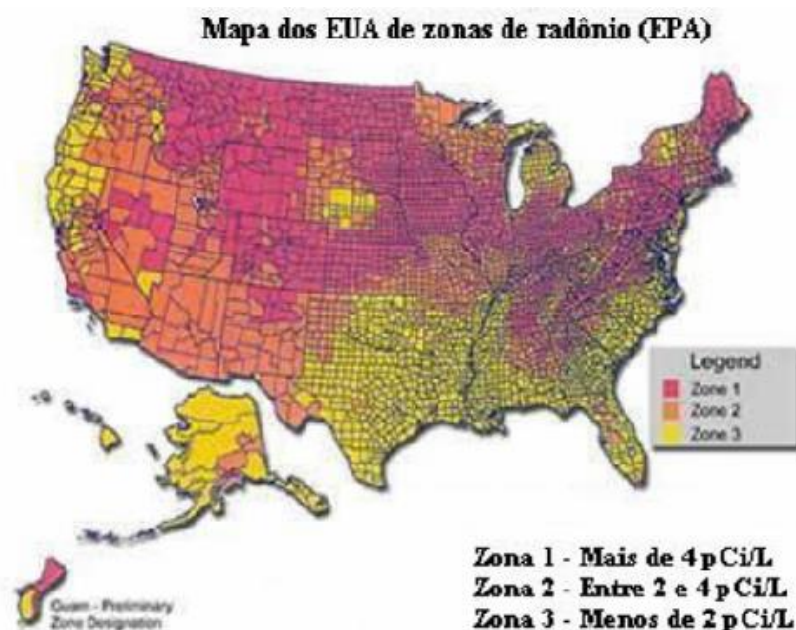


Figura 3: Mapa dos EUA com relação às concentrações de radônio
 Fonte: Corrêa (2006) adaptado de EPA (2005)

Segundo a EPA, Iowa, que possui a concentração média de 8,8 pCi/L, é o estado americano com a maior média de concentração de radônio nos Estados Unidos (FIELD, STECK e SMITH, 2000, *apud* EPA, 2005).

Estudos realizados no local revelaram um risco de câncer de pulmão 50% maior se ocorrer uma exposição prolongada ao radônio acima dos níveis tolerados pela EPA de 4 pCi/L (FIELD *et al.* 2000).

No Brasil, ainda não existe uma legislação específica para o radônio, mas o Ministério da Saúde recomenda um valor limite de radiação alfa de 0,1 Bq/m³ (incluindo o isótopo ²²⁶Ra, precursor do ²²²Rn) e 1 Bq/m³ para a radiação beta (AFONSO, 2009, *apud* Ministério da Saúde).

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) estima que a concentração de radônio na atmosfera no Brasil varie entre 0,6 e 28 Bq/m³. Já a CENEN recomenda um valor limite de até 300 Bq/m³.

2.2 RADÔNIO

O radônio é um elemento químico descoberto por Robert Bowie Owens e Ernest Rutherford em 1899 (*The New York Times*, 1940), e consiste em um gás radioativo, inodoro e incolor (PETTA; CAMPOS, 2013).

Este gás se forma naturalmente a partir do decaimento de outros elementos radioativos, tais como urânio, rádio e tório, encontrados em diferentes quantidades no solo e nas rochas de todo o planeta (WHO, 2004).

Sendo um elemento pertencente à coluna 8A da tabela periódica, é um gás nobre, sendo sua massa atômica 222 e possuindo 136 nêutrons, 86 prótons e 86 elétrons (USBERCO; SALVADOR, 2006).

O átomo de radônio é altamente instável, sendo que todos os seus isótopos têm meias-vidas curtas, com exceção de seu único isótopo naturalmente encontrado, o ^{222}Rn , cuja meia-vida é de aproximadamente 3,82 dias (UNSCEAR, 2006).

Os isótopos de radônio não fazem ligações químicas e são livres para escapar do local onde se formam. O ^{222}Rn pode se deslocar por uma distância considerável antes de decair (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

O radônio apresenta, mais comumente, decaimento alfa, no qual transforma-se no elemento químico polônio, porém, seu isótopo mais pesado pode sofrer decaimento beta, transformando-se no elemento químico frâncio (PETTA; CAMPOS, 2013).

As partículas, principalmente, possuem um potencial considerável de indução de câncer. A rota mais provável de contaminação é pela inalação de partículas de pó, às quais carregam radioisótopos (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Presente no solo e nas rochas, o gás radônio pode mover-se para o ar, para a água superficial e para a água subterrânea, sendo encontrado em níveis mais elevados em casas e edifícios enclausurados, os quais não possuem uma ventilação adequada (AMERICAN CANCER SOCIETY, 2015).

2.2.1 O isótopo ^{222}Rn

O ^{222}Rn é o isótopo mais comum do radônio, sendo assim muitas vezes referenciado apenas como radônio, ele é subproduto do decaimento do urânio-238. O radônio possui outro isótopo, o ^{220}Rn , que é um subproduto do decaimento do tório-232 (UNSCEAR, 2006).

Como os diferentes isótopos do radônio decaem de diferentes fontes, não há relação fixa entre as suas concentrações, sendo necessário analisar a quantidade de urânio e tório nos solos, rochas e materiais de construção (UNSCEAR, 2006).

O ^{222}Rn possui meia-vida de 3,82 dias, o que pode ser considerada longa se comparado à meia-vida do ^{220}Rn , que é de 55 segundos. Sendo assim, o ^{222}Rn possui maior chance de escapar do solo e expor as pessoas à radiação (UNSCEAR, 2006).

A figura 4 mostra a série radioativa do urânio-238 com seus respectivos decaimentos.

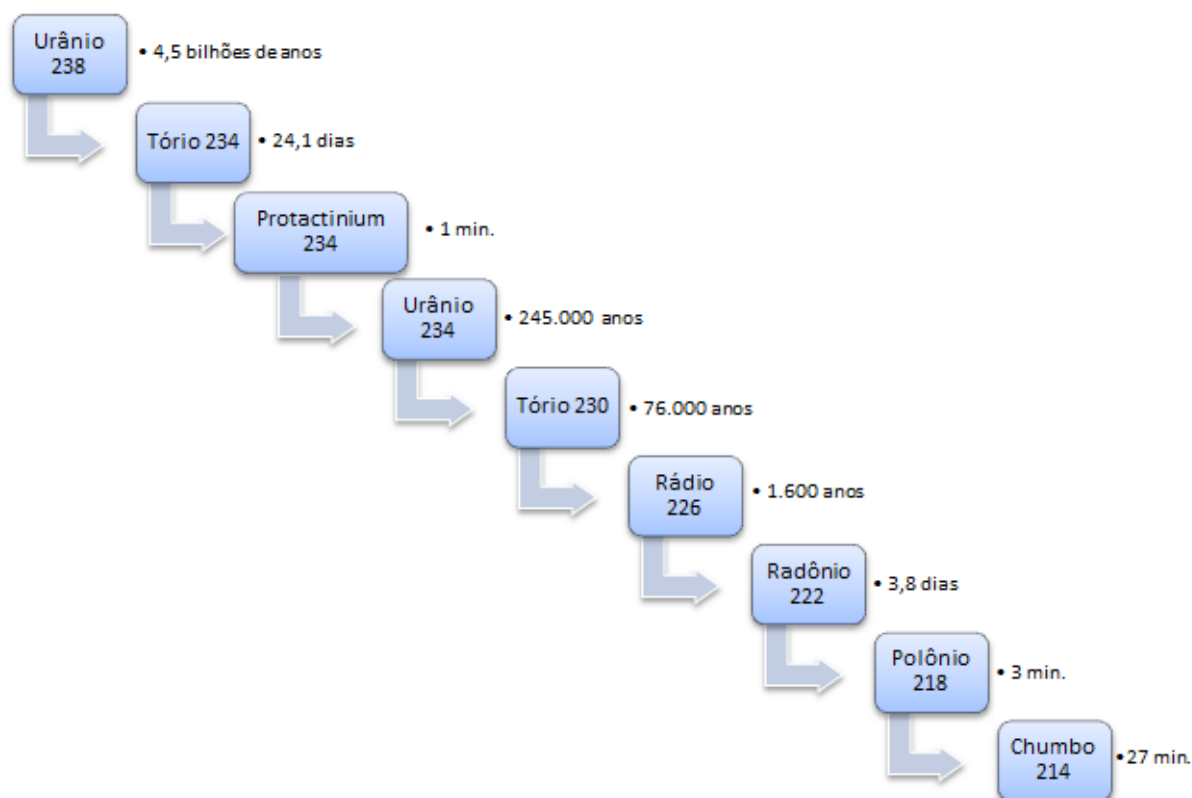


Figura 4: Série radioativa do urânio 238
Fonte: Adaptado de CCNR (2016)

2.3 RADÔNIO NO SOLO

Os solos são materiais constituintes da crosta terrestre, que provêm da decomposição das rochas por agentes físicos e químicos (PINTO, 2002). Possuindo trincas e espaços vazios, muitas vezes podem ser ocupados por gases e líquidos (CRAIG, 2012).

Os fatores que mais influenciam na permeabilidade de um solo são: a granulometria, o índice de vazios, a composição mineral, o tipo de fluido, a temperatura e a estrutura das partículas do solo (CRAIG, 2012).

Tendo-se que a permeabilidade é um dos principais fatores que controlam a emanção de radônio no solo, é necessário obter valores para os locais onde serão construídas as edificações.

A permeabilidade dos solos se dá pela capacidade de um gás ou líquido fluir através dos espaços vazios interconectados (DAS, 2011) e pode ser calculada através da Lei de Darcy:

$$Q = k \frac{h}{L} A \quad (1)$$

Sendo: Q = vazão

k = coeficiente de permeabilidade

$\frac{h}{L}$ = gradiente hidráulico

A = área do permeâmetro

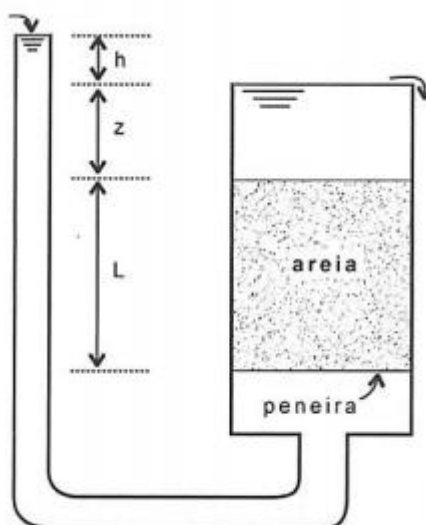


Figura 5: Parâmetros para medida de permeabilidade
Fonte: Pinto (2002)

Um dos índices utilizados para a determinação da permeabilidade do solo é a condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade (k) (DAS, 2011).

Segundo a Lei de Darcy, a velocidade de percolação de uma substância no solo é igual ao coeficiente de permeabilidade vezes o gradiente hidráulico:

$$v = k \cdot i \quad (2)$$

Sendo: k = coeficiente de permeabilidade

i = gradiente hidráulico.

O coeficiente de permeabilidade (k) é influenciado pela viscosidade que, por sua vez, é influenciada pela temperatura. Desta maneira, o valor de “ k ” utilizado para os estudos, que é referente à temperatura de 20°C, tem a necessidade de ser corrigido no caso de estudos laboratoriais (DAS, 2011).

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade podem ser realizados tanto ensaios laboratoriais, quanto ensaios de campo. Quanto aos ensaios laboratoriais, têm-se o ensaio de permeabilidade à carga constante e o ensaio de permeabilidade à carga variável (PINTO, 2002).

O ensaio de permeabilidade à carga constante é indicado para solos com alta permeabilidade, como areias e pedregulhos. Já o ensaio de permeabilidade à carga variável é mais indicado para solos de baixa permeabilidade (PINTO, 2002).

Na figura 6, encontram-se as representações dos dois ensaios laboratoriais.

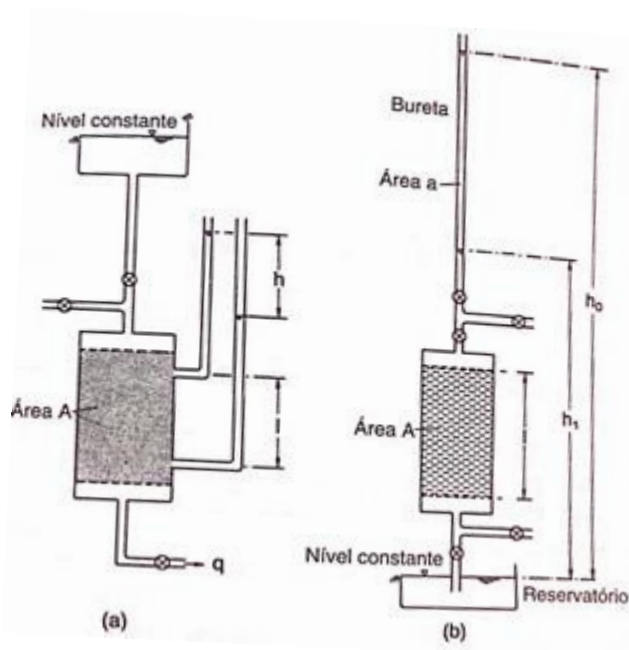


Figura 6: Representação dos ensaios de permeabilidade:
(a) Carga constante e (b) Carga variável
 Fonte: Craig (2012)

O tamanho dos grãos e a sua forma são as principais propriedades que controlam a emanção de radônio no solo (UNSCEAR, 2002).

A emanção de radônio pode ser contabilizada pelo coeficiente de emanção ou fator de emanção, que pode variar entre 0,05 e 0,7 nos solos. Normalmente, este coeficiente é inversamente proporcional ao tamanho dos grãos (UNSCEAR, 2002).

A concentração de radônio na superfície dos solos e a alguns metros de profundidade é de extrema importância para determinar a quantidade de radônio que irá para os poros e, posteriormente, para a atmosfera e para os ambientes internos (UNSCEAR, 2002).

Apresenta-se, na figura 7, a atividade do ^{222}Rn variando de acordo com a profundidade e o período do dia.

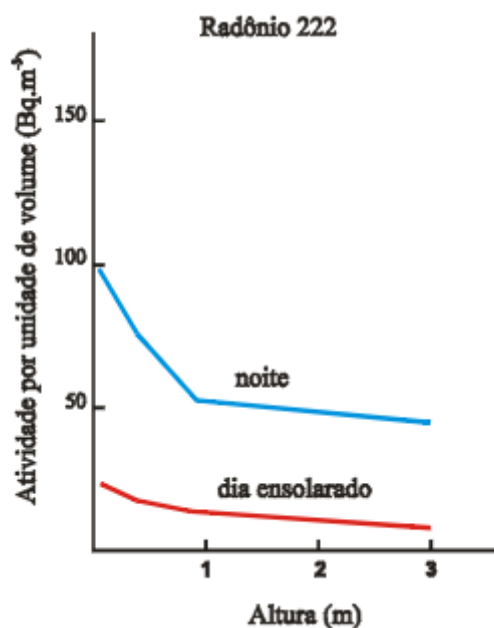


Figura 7: Concentração de radônio em relação à profundidade no solo
Fonte: Tauhata *et al* (2003)

Podendo se infiltrar através das fundações de edifícios e residências, o nível de radônio aumenta quando a fundação está sobre solo poroso e quando a pressão do ar na edificação é menor do que a pressão dos gases no solo (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Essa diferença de pressão, que depende de temperaturas internas e externas, velocidade do vento, entre vários outros fatores, é uma variável primordial e corresponde às grandes variações nos níveis de radônio, mesmo entre casas próximas (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

As concentrações de radônio no solo dependem das concentrações de seus pais, como o urânio e o rádio, presentes no leito de rochas ou nas camadas mais profundas do solo (UNSCEAR, 2002).

Geralmente, granitos têm alta concentração de rádio, que é precursor do radônio. Já as rochas metamórficas possuem concentração média. E, quanto às sedimentares, baixas concentrações (UNSCEAR, 2002).

O substrato do Paraná contém rochas que na maioria são classificadas como metamórficas. Na região há grande variedade de rochas ígneas intrusivas, inclusive granitos (MINEROPAR, 2005).

A partir deste fato, pode-se concluir que o embasamento rochoso do Paraná tem consideráveis contribuições nas concentrações de radônio no solo da região, já

que os granitos têm em sua formação os precursores desse gás (MINEROPAR, 2005).

Na figura 8, está representada a geologia do escudo do Paraná.

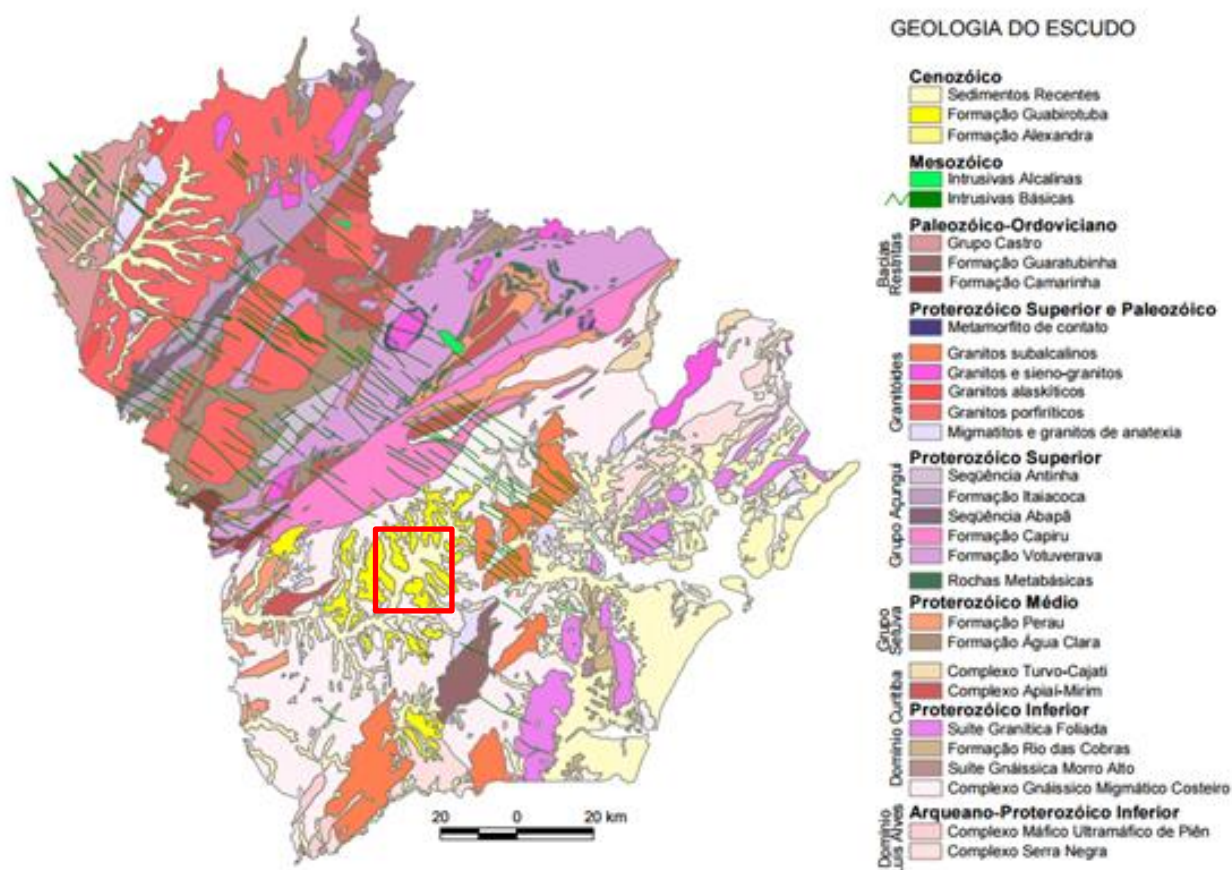


Figura 8: Geologia do escudo paranaense, com Curitiba e parte da região metropolitana em destaque

Fonte: Mineropar (2016)

Os solos de Curitiba e de grande parte de região metropolitana provêm da Formação Guabirotuba, sendo formados por uma camada entre 60 e 80 metros de sedimentos que compreendem sequências litológicas com predominância de argilas e areias arcossianas (20-40% de feldspato). Possui parte basal tendo composição principal de cascalhos e arcósios de granulometria grosseira e, por estarem depositados sobre o Complexo Atuba, embasamento gnáissico-migmatítico e rochas metassedimentares do Grupo Açungui (FELIPE, 2011).

2.3.1 Concentrações Usuais de Radônio e Radionuclídeos no Solo

Como o radônio provém do decaimento de certos radionuclídeos, torna-se importante saber as concentrações usuais desses radionuclídeos nas rochas. Apresentam-se, na tabela 1, valores médios encontrados em alguns tipos de rochas.

Tabela 1 – Atividades dos radionuclídeos em diferentes tipos de rochas

Tipos de rocha		Concentrações em Bq/kg		
		⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th
Rochas ígneas	Basalto	300	7 - 10	10 – 15
	Máfico	70 – 400	50 - 60	60 – 80
	Sáfico	1100 - 1500	50 - 60	60 – 80
	Granito	1000	-	70
Sedimentar	Arenito	800	40	50
	Quartzo Limpo	< 300	< 10	< 8
	Quartzo Sujo	400	40	10 – 25
	Arcóseo	600 – 900	10 - 25	< 8
	Areia de Praia	< 300	40	25
Superfície da Crosta Continental	Média	850	36	44
	Solo	400	66	37
Carbonadas	-	70	25	3

Fonte: Del Claro (2013) citando NCRP (1994) *apud* Araújo (2003)

Devido ao radônio ser derivado do decaimento de ²³⁸U, ²³²Ra e ²³²Th, em vários países, há estudos sobre as concentrações desses radionuclídeos encontrados no solo.

Na tabela 2, são apresentadas as concentrações médias desses radionuclídeos no solo, em diversos países.

Tabela 2 – Concentração dos radionuclídeos nos solos de diferentes países

CONCENTRAÇÃO NATURAL DOS RADIONUCLÍDEOS NO SOLO (Bq/m ³)						
Radionuclídeos	U-238		Ra-232		Th-232	
País	Média	Intervalos	Média	Intervalos	Média	Intervalos
Albânia	23	6 - 96	-	-	24	4 - 160
Alemanha	-	11 - 300	-	5 - 200	-	7 - 134
Argélia	30	2 - 110	50	5 - 180	25	2 - 140
Armênia	46	20 - 78	51	32 - 77	30	26 - 60
Bangladesh	-	-	34	21 - 43	-	-
Bélgica	-	-	26	5 - 50	27	5 - 50
Bulgária	40	8 - 190	45	12 - 210	30	7 - 160
Cazaquistão	37	12 - 120	35	12 - 120	60	10 - 220
China	33	2 - 690	32	2 - 440	41	1 - 360
Chipre	-	-	17	0 - 120	-	-
Costa Rica	46	11 - 130	46	11 - 130	11	1 - 42
Croácia	110	83 - 180	54	21 - 77	45	12 - 65

CONCENTRAÇÃO NATURAL DOS RADIONUCLÍDEOS NO SOLO (Bq/m ³)						
Radionuclídeos	U-238		Ra-232		Th-232	
País	Média	Intervalos	Média	Intervalos	Média	Intervalos
Dinamarca	-	-	17	9 - 29	19	8 - 30
Egito	37	6 - 120	17	5 - 64	18	2 - 96
Eslováquia	32	15 - 130	32	12 - 120	38	12 - 80
Eslovênia	-	-	41	2 - 210	35	2 - 90
Espanha	-	-	32	6 - 250	33	2 - 210
Estados Unidos	35	4 - 140	40	8 - 160	35	4 - 130
Estônia	-	-	35	6 - 310	27	5 - 59
Grécia	25	1 - 240	25	1 - 240	21	1 - 190
Holanda	-	5 - 53	23	6 - 63	-	8 - 77
Hong Kong	84	25 - 130	59	20 - 110	95	16 - 200
Hungria	29	12 - 66	33	14 - 76	28	12 - 45
Índia	29	7 - 81	29	7 - 81	64	14 - 160
Irã	-	-	28	8 - 55	22	5 - 42
Irlanda	37	8 - 120	60	10 - 200	26	3 - 60
Japão	29	2 - 59	33	6 - 98	28	2 - 88
Lituânia	16	3 - 30	-	-	25	9 - 46
Luxemburgo	-	-	35	6 - 52	50	7 - 70
Malásia	76	49 - 86	67	38 - 94	82	63 - 110
Noruega	50	-	50	-	45	-
Polônia	26	5 - 120	26	5 - 120	21	4 - 77
Portugal	49	26 - 82	44	8 - 65	51	22 - 100
Reino Unido	-	2 - 330	37	-	-	1 - 180
Romênia	32	8 - 60	32	8 - 60	28	11 - 75
Rússia	19	0 - 67	27	1 - 76	30	2 - 79
Síria	23	10 - 64	20	13 - 32	20	10 - 32
Suécia	-	-	42	12 - 170	42	14 - 94
Suíça	40	10 - 150	40	10 - 900	25	4 - 70
Tailândia	114	3 - 370	48	11 - 78	51	7 - 120
Média	35	16 - 110	35	17 - 60	30	11 - 64

Fonte: Adaptado UNSCEAR (2000)

Medidas realizadas por Del Claro (2013), em Curitiba, encontraram valores de concentração de ²²²Rn entre 31 ± 2 kBq/m³ e 35 ± 4 kBq/m³. As medidas foram realizadas, respectivamente, nos bairros curitibanos do Xaxim e Ecoville.

Na tabela 3, apresentam-se mais valores encontrados em medidas realizadas na região de Curitiba.

Tabela 3 – Concentração de radônio no solo em algumas regiões de Curitiba

REGIÃO DE CURITIBA DA COLETA DA AMOSTRA	MÉDIA DA CONCENTRAÇÃO DE ²²² Rn NO SOLO (Bq/m ³)
Umbará - Região 1	38523 +/- 2600
Umbará - Região 2	120 +/- 30
Jardim das Américas - Região 1, Campus UFPR	2 +/- 5
Jardim das Américas - Região 2, Campus UFPR	1026 +/- 140
Jardim das Américas - Região 3, Campus UFPR	9 +/- 5
Bom Retiro – Região 1	35300 +/- 3000

Fonte: Adaptado de Paschuk *et al.* (2009)

Em estudos realizados pela UNSCEAR, no ano de 1982, houveram variações significativas para as concentrações de ^{222}Rn de acordo com as diferentes horas do dia (figura 9) bem como para diferentes meses do ano (figura 10).

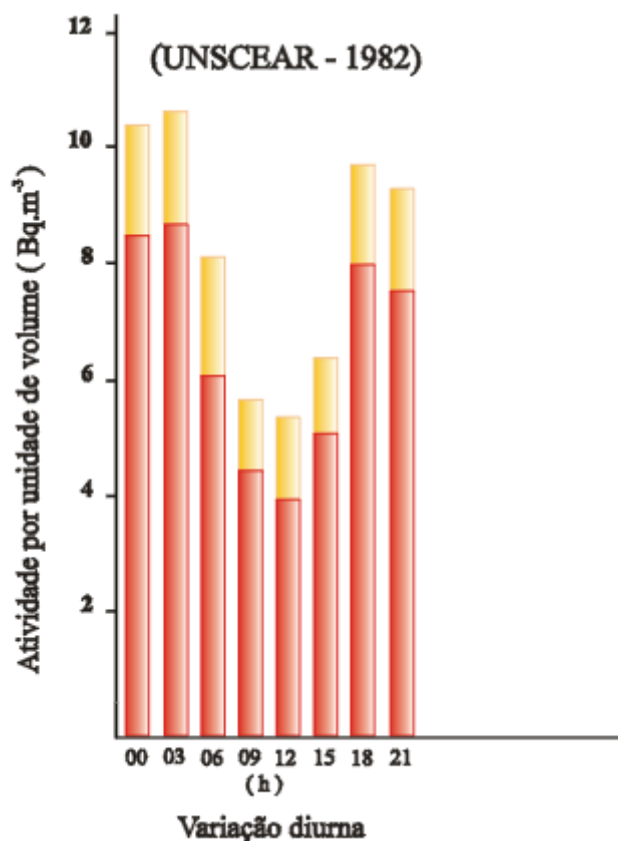


Figura 9: Variação da concentração diária de radônio e torônio
Fonte: UNSCEAR (1982) *apud* Tauhata (2003)

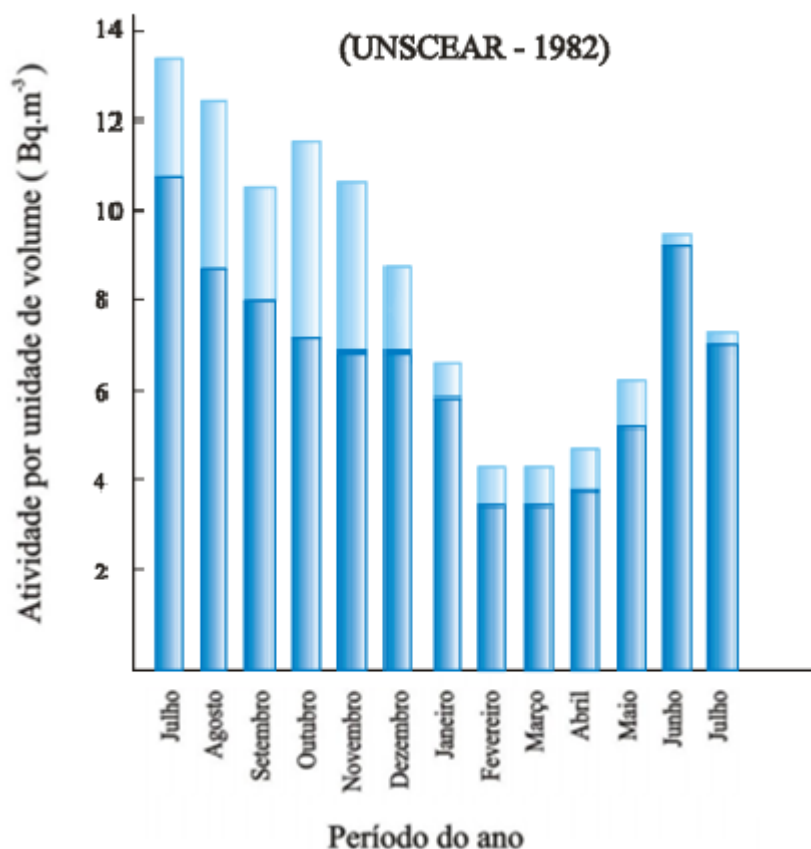


Figura 10: Variação da concentração mensal de radônio e torônio
 Fonte: UNSCEAR (1982) *apud* Tauhata (2003)

As concentrações de ^{222}Rn , além de variarem de acordo com as horas do dia, com a época do ano e com o tipo de composição do solo, variam também de acordo com a sazonalidade.

Em medições realizadas no Rio de Janeiro, em 1997, por Maísa Magalhães do IRD, observou-se que os valores de concentração de ^{222}Rn no inverno são de 10 a 20 vezes maiores que os observados durante o verão, sendo que as concentrações mais significativas estão nos ambientes externos. Já no verão, ocorre o contrário, sendo que o ambiente interno apresentou as maiores concentrações, como pode ser verificado nas figuras 11 e 12.

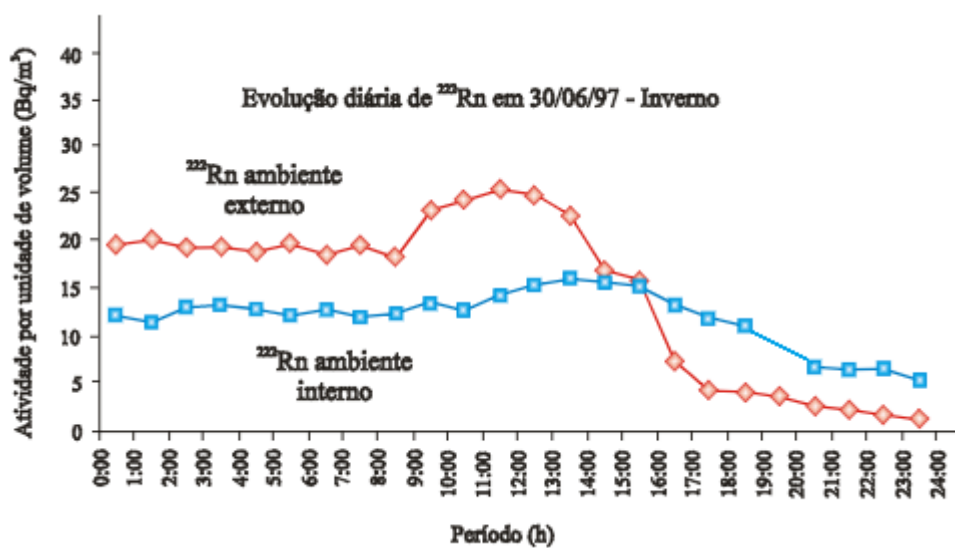


Figura 11: Concentração de ^{222}Rn no Rio de Janeiro, no inverno de 1997
 Fonte: IRD (1997) *apud* Tauhata (2003)

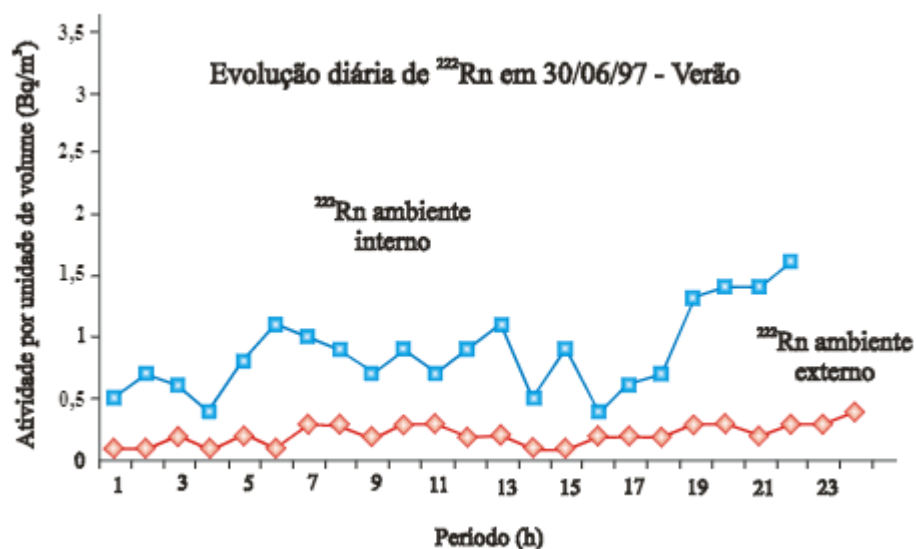


Figura 12: Concentração de ^{222}Rn no Rio de Janeiro, no verão de 1997
 Fonte: IRD (1997) *apud* Tauhata (2003)

2.4 RADÔNIO EM AMBIENTES DE CONVÍVIO HUMANO (*INDOOR*)

O radônio presente nos ambientes de convívio humano, ou *indoor*, tem como maior fonte o radônio presente no solo que se infiltra nas construções, sendo também uma pequena parte, em torno de 3%, proveniente dos materiais de construção usados para produzir o ambiente (WHO, 2009).

O radônio consegue penetrar nos ambientes através de rachaduras em paredes, pisos sólidos e pisos suspensos, espaços entre encanamentos, vazios e espaços em paredes (EPA, 2012).

Quando infiltrado, ele se acumula no ambiente, sendo a concentração elevada a principal causadora de contaminação (EPA, 2012).

Além das concentrações presentes no solo, a variação de temperatura, o clima, o comportamento dos habitantes e a ventilação também são fatores que influenciam na concentração de radônio *indoor* (CRAMERI e BURKART, 1998).

Na figura 13, estão representados os principais locais por onde o radônio pode se infiltrar nos ambientes *indoor*.

O radônio entra por:

1. Rachaduras em pisos sólidos.
2. Juntas.
3. Rachaduras em paredes
4. Espaços em pisos suspensos.
5. Espaços entre encanamentos.
6. Vazios e espaços em paredes.
7. Suprimento de água.

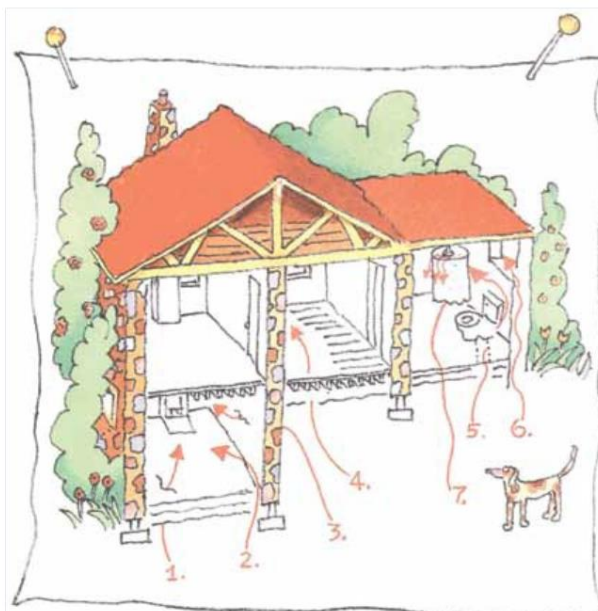


Figura 13: Infiltração de radônio proveniente do solo nos ambientes *indoor*
Fonte: Adaptado de EPA (2012)

No ano de 1984, um operário que trabalhava em uma usina nuclear, na Pensilvânia, fez disparar um alarme de monitoramento de radiação ao entrar para trabalhar. As roupas do operário estavam radioativas, e se identificou que a fonte da contaminação era a sua casa, onde se encontrou uma alta concentração de radônio (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Esse incidente levou ao reconhecimento de que acúmulos naturais de radônio podem estabelecer um risco considerável de radiação e contaminação (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Ainda, segundo os autores, como o urânio, que decai para radônio, constitui um elemento relativamente comum e é amplamente distribuído na crosta terrestre, o problema é disseminado. Sendo que altos níveis de radônio podem se acumular em casas construídas sobre rocha com elevado teor de urânio e onde o solo é arenoso e, conseqüentemente, permeável a gases.

Nos níveis constatados em algumas residências, e considerando-se que o período passado em casa é mais longo que o período passado pelos trabalhadores nas minas, calcula-se que a exposição ao radônio esteja próxima do nível inferior detectado em minas de urânio. Essa é a principal preocupação sobre o potencial cancerígeno do radônio nas residências (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

De fato, a extrapolação das concentrações que sabidamente causam câncer (concentrações encontradas em minas de urânio) para aquelas comumente encontradas pela população em geral (nas edificações) é menor do que para qualquer outro cancerígeno conhecido ou suspeito (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Porém, o ceticismo persiste quanto à magnitude do risco, porque uma associação entre níveis de radônio em domicílios e a incidência de câncer ainda não foi comprovada. Especula-se, com frequência, que a ocorrência de câncer em mineradores de urânio não é um guia confiável, devido às minas possuírem mais pó do que as casas. No entanto, as evidências se revelam constantemente equivocadas, e as extrapolações a exposições usuais são incertas, levando os pesquisadores a avaliarem os riscos de formas muito diferentes (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

O que realmente está provado é que em torno de 20.000 pessoas morrem por ano, devido ao radônio (EPA, 2006).

Na tabela 4, encontram-se alguns valores de concentração de radônio em ambientes de convívio humano, por país.

Tabela 4 – Concentração de radônio *indoor* em diferentes países

CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO <i>INDOOR</i> (Bq/m³)				
País	População em 1996 (10⁶)	Média Aritmética	Valor Máximo	Desvio Padrão
Albânia	3,40	120	270	2,0
Alemanha	81,92	50	> 10000	1,9
Argélia	28,78	30	140	-
Argentina	35,22	37	211	2,2
Austrália	18,06	11	420	2,1
Áustria	8,11	-	190	-
Bélgica	10,16	48	12000	2,0
Bulgária	8,47	-	250	-
Canadá	29,68	34	1720	3,6
Cazaquistão	16,82	10	6000	-
Chile	14,42	25	86	-
China	1232	24	380	2,2
Chipre	0,76	7	78	2,6
Croácia	4,50	35	92	-
Dinamarca	5,24	53	600	2,2
Egito	63,27	9	24	-
Eslováquia	5,35	87	3750	-
Eslovênia	1,92	87	1330	2,2
Espanha	39,67	86	15400	3,7
Estados Unidos	269,4	46	-	3,1
Estônia	1,47	120	1390	-
Finlândia	5,13	120	20000	2,1
França	58,33	62	4690	2,7
Gana	17,83	-	340	-
Grécia	10,49	73	490	-
Holanda	15,58	23	380	1,6
Hong Kong	6,19	41	140	-
Hungria	10,05	107	1990	2,7
Índia	944,6	57	210	2,2
Indonésia	200,45	12	120	-
Irlanda	3,55	-	1700	-
Itália	57,23	75	1040	2,0
Japão	125,4	16	310	1,8
Lituânia	3,73	55	1860	-
Luxemburgo	0,41	110	2500	2,0
Malásia	20,58	14	20	-
Noruega	4,35	73	50000	-
Nova Zelândia	3,60	20	90	-
Paquistão	140,0	30	83	-
Paraguai	4,96	28	51	-
Polônia	38,60	41	432	2,0
Portugal	9,81	62	2700	2,2
Reino Unido	58,14	20	10000	-
República Tcheca	10,25	140	20000	-
Romênia	22,66	45	1025	-
Suécia	8,82	108	85000	-
Suíça	7,22	70	10000	-
Tailândia	58,7	23	480	1,2

Fonte: Adaptado UNSCEAR (2000)

Novamente, observa-se a falta de dados para o Brasil.

2.4.1 Como Reduzir a Concentração de Radônio nos Ambientes

As desintegrações radioativas são medidas em *curies* (Ci), sendo que 1 Ci é igual a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

No caso do radônio nos domicílios, a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA) estabeleceu um limite máximo de até 4 pCi/L de concentração, correspondendo a 0,15 desintegrações por segundo para cada litro de ar em casa (EPA, 2006 *apud* SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Para locais onde a concentração supera 4 pCi/L tem-se, como método usual, a colocação de dutos de ventilação, próximos ou sob o edifício, para realizar o bombeamento do radônio do solo diretamente para a atmosfera através de exaustores (SPIRO; STIGLIANI, 2009).

Existem outras medidas que são apresentadas no Manual do Usuário para a Redução da Concentração do Radônio, publicado pela EPA em 2013, e encontrado no seu site, que são: o selamento de rachaduras, fissuras, trincas, e aberturas nas fundações, a pressurização da casa ou dos cômodos (devido ao radônio penetrar na casa pela diferença de pressão), aumento da ventilação natural, abrindo janelas e portas existentes ou instalando mais delas, bem como claraboias.

Em áreas, por exemplo, como Guarda, Viseu e Vila Real em Portugal e Cornwall, no Reino Unido, que apresentam um substrato granítico, o gás radônio é um problema grave, de tal forma que muitas das construções apresentam valores deste gás muito elevados, precisando ser ventiladas com ventiladores especiais para diminuir as concentrações do gás radônio (EPA, 2006).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste na definição de 10 pontos de medida, na caracterização do tipo do solo e sua permeabilidade, na medição das concentrações de radônio destes locais e na verificação dos pontos com relação à sua influência nos limites *indoor* estabelecidos.

O local, no qual foram realizadas as medições, foi o terreno da sede Ecoville da UTFPR, localizado na Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, no Campo Comprido, Curitiba - PR.

O interesse neste local vem da relação deste trabalho com trabalhos de medidas de concentração *indoor* feitas pelo Laboratório de Física Nuclear Aplicada nas sedes da UTFPR.

As medidas de radônio foram realizadas por meio do monitor AlphaGUARD (SAPHYMO), que é um equipamento que mede as concentrações de radônio de forma ativa, através de uma câmara de difusão e um detector sensível às partículas alfa emitidas advindas do ar retirado do solo.

As medições foram feitas baseadas no método estabelecido pelo Laboratório de Radiações Ionizantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, que por sua vez, trabalha de forma conjunta com o CDTN/CNEN. O método utilizado é parte de metodologia internacional e consolidada pela UNSCEAR (2000).

3.1 MEDIÇÕES DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO COM O DETECTOR AlphaGUARD

Para a realização das medidas da concentração do gás ^{222}Rn foi utilizado o detector portátil AlphaGUARD.

Este equipamento opera com sensibilidade na faixa de 2 – 2.000.000 Bq/m³, além de fornecer os valores de temperatura, umidade e pressão. O AlphaGUARD pode ser utilizado para a medição de radônio em diversos ambientes, como minas, laboratórios e também para investigações complementares em edifícios. As medições podem ser realizadas no ar, na água e no solo, devido a uma grande variedade de acessórios e sondas externas (SAPHYMO, 2016).

Na figura 14, observa-se a imagem do equipamento AlphaGUARD da SAPHYMO.



Figura 14: Monitor AlphaGUARD (SAPHYMO)
Fonte: Saphymo (2016)

Para realização das medidas de radônio, foram escolhidos 10 pontos na Sede Ecoville. As medições de radônio no solo foram realizadas sempre em dias não chuvosos, pois este fator influencia nas medições da concentração de radônio no solo, devido à infiltração de água no mesmo.

3.1.1 Metodologia das Medidas de Background

Antes de se realizar qualquer medição de radônio no solo, realizou-se a medição de background do equipamento, na qual se obtém a quantidade de radônio e torônio presente no equipamento que fará a medição no solo. Tal medida de background será subtraída das medidas que serão, posteriormente, realizadas no solo.

O equipamento para medição de radônio consiste em: sonda, filtro, bomba, monitor AlphaGUARD, rotâmetro e balão de ar. Tais equipamentos são mostrados na figura 15.



Figura 15: Equipamentos componentes para a medição de radônio: (1) Monitor AlphaGUARD; (2) Balão de ar; (3) Haste metálica pra inserir a sonda no solo; (4) Rotâmetro; (5) Mangueira de conexão; (6) Sonda; (7) Haste metálica

Fonte: Autoria própria

A medição foi realizada conectando-se a bomba de ar e o AlphaGUARD em sistema fechado, como pode ser observado no esquema da figura 16.

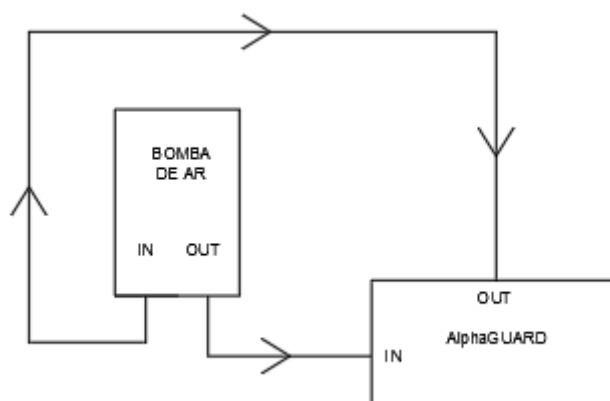


Figura 16: Ilustração do sistema fechado composto pela bomba de ar e pelo AlphaGUARD

Fonte: Laboratório de Física Aplicada da UTFPR

Após a medição do background, ligou-se o aparelho AlphaGUARD e esperou-se em torno de 2 minutos para que o equipamento começasse a operar. Em seguida, ligou-se a bomba de ar.

Anotou-se, então, o horário de início da medida, que estava presente no visor do aparelho.

A medida de background dura, aproximadamente, 10 minutos. Após o término da realização da medida, anotou-se o horário final.

Esse mesmo procedimento ocorreu para as medidas de background realizadas posteriormente.

3.1.2 Metodologia das Medidas de Radônio no Solo com a Bomba de Ar Ligada

Para a realização desta medição, inseriu-se a haste de perfuração no solo com, aproximadamente, um metro de profundidade.

Retirou-se, então, a haste de perfuração e, em seu lugar, inseriu-se a sonda, também a um metro de profundidade.

Após isso, puxou-se a sonda 5 centímetros para cima.

Conectou-se então a sonda com a bomba e, conseqüentemente, com o circuito de medida mostrado na figura 17.

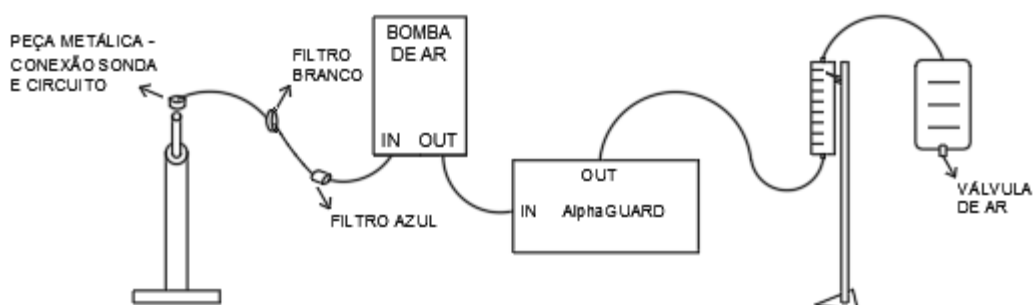


Figura 17: Ilustração do circuito de equipamentos para medição de radônio do solo com a bomba de ar ligada

Fonte: Laboratório de Física Aplicada da UTFPR

Em seguida, foi verificado se a válvula do balão de ar estava fechada, e se o mesmo estava completamente vazio.

Ligou-se, então, o AlphaGUARD e aguardou-se dois minutos. Após isso, ligou-se a bomba de ar.

Verificou-se o fluxo de ar mostrado pelo rotâmetro. Quando o balão atingiu um preenchimento de 1 litro de ar, aproximadamente, abriu-se a válvula para que o ar saísse para o ambiente.

A medida de radônio no solo com a bomba de ar ligada dura em torno de 10 minutos.

Esse mesmo procedimento ocorreu para as medidas realizadas posteriormente.

3.1.3 Metodologia das Medidas de Radônio no Solo com a Bomba de Ar Desligada para Inferência do Valor de Torônio na Câmara do AlphaGUARD

Esta medida é a continuação da medida do solo com a bomba de ar ligada.

Nesta fase, passando-se 10 minutos, desliga-se a bomba de ar e anota-se o horário.

O equipamento fez a medição com a bomba de ar desligada por, aproximadamente, 10 minutos, como o esquema ilustrado da figura 18.

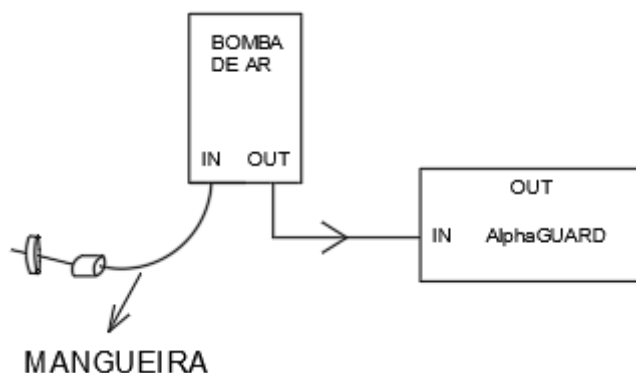


Figura 18: Ilustração do circuito de equipamentos para medição de radônio do solo com a bomba de ar desligada

Fonte: Laboratório de Física Aplicada da UTFPR

Como o AlphaGUARD não consegue diferenciar o radônio (^{222}Rn) do torônio (^{220}Rn), tem-se que: se a medida decai rapidamente com o desligamento da bomba, então, há mais torônio; se essa medida decai lentamente, há mais radônio.

Para diferenciar o radônio do torônio, serão apresentados gráficos na parte dos resultados deste trabalho.

3.2 ENSAIO DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para a realização dos ensaios de granulometria, adotou-se como referência a metodologia estabelecida pela norma NBR 7181 (ABNT, 1987).

Para a obtenção da composição granulométrica, realizaram-se os ensaios de peneiramento grosso, sedimentação e peneiramento fino. O resultado final será apresentado graficamente, no qual os diâmetros das partículas, em escala logarítmica, compõem as abscissas e, em escala aritmética, nas ordenadas, encontram-se as porcentagens das partículas menores que os diâmetros considerados.

3.2.1 Peneiramento Grosso

Primeiramente, retirou-se uma amostra de solo do Campus Ecoville da UTFPR, no mesmo ponto onde havia sido realizada uma medição de radônio.

Esta amostra de solo permaneceu na estufa pelo período mínimo de 24 horas, à temperatura de 105°C . Após as 24 horas, a amostra foi retirada da estufa e foi, então, realizado o processo de destorroamento do solo.

Após este procedimento, pesou-se 500 gramas para a realização do peneiramento do solo, através das peneiras descritas pela norma NBR 7217 (ABNT, 1987).

Para a determinação da composição granulométrica do solo, submeteu-se a amostra de 500 gramas à passagem pelas peneiras de 4,75 mm, 2,00 mm, 1,20 mm, 0,6 mm, 0,425 mm, 0,297 mm, 0,15 mm, 0,075 mm e fundo.

Após o depósito da amostra nas peneiras, o conjunto de peneiras foi submetido a um vibrador especial durante 5 minutos a vibrações de 40%.

O material foi retirado do vibrador e iniciou-se, então, a pesagem do material retido em cada uma das peneiras. Para a total retirada do material, a peneira foi virada e, com o auxílio de um pincel, os grãos presos nas aberturas das peneiras foram empurrados.

Nesta etapa, considerou-se apenas o material retido na peneira de 2,0 mm para o peneiramento grosso.

Considerou-se o restante do material como resultado preliminar para definição do ensaio de permeabilidade a ser utilizado, assim como, para definição da quantidade de solo a ser reservada para o ensaio de sedimentação.

Lavou-se, então, o material passante na peneira de 2,0 mm e o levou-se para a estufa à temperatura de 105°C pelo período de 24 horas.

Após este período na estufa, o material foi novamente pesado e dele retiraram-se 90 g para a realização do ensaio de sedimentação.

3.2.2 Peneiramento Fino

O ensaio de peneiramento fino foi realizado passando-se o material final da sedimentação pelas peneiras de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,297 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.

Pesou-se o material retido em cada peneira e usou-se a equação 3 para o cálculo da porcentagem retida.

$$Q_g = (M_s - M_i) * \frac{100}{M_s} \quad (3)$$

Sendo:

Q_g = porcentagem de material passado em cada peneira (%);

M_s = massa total da amostra seca (g);

M_i = massa retida acumulada em cada peneira (g).

3.2.3 Ensaio de Sedimentação

Retiraram-se do peneiramento grosso 90 g, medidos em balança com erro de 0,01 g, do material passante na peneira de 2,00 mm.

Colocaram-se estes 90 g de solo em um béquer de 250 cm³. Após isso, com auxílio de uma proveta de vidro, adicionou-se o defloculante, solução de hexametáfosfato de sódio, conforme indicado na norma NBR 7181 (ABNT, 2016). Então, realizou-se a mistura até que todo o solo estivesse imerso, deixando-o assim pelo período de 12 horas.

Após este tempo, verteu-se a mistura em um copo de dispersão, utilizando-se água destilada para retirar o material aderido no béquer. Adicionou-se, então, água, de modo que ela ficasse 5 centímetros abaixo da borda do copo de dispersão. Após isso, submeteu-se o conjunto à ação do aparelho dispersor pelo período de 15 minutos.

Passados 15 minutos, transferiu-se toda a mistura para uma proveta de vidro, com o auxílio de uma bisnaga com água destilada. Acrescentou-se, então, mais água destilada, até que a marca correspondente a 1.000 cm³ fosse atingida.

Posteriormente, colocou-se a mistura em um tanque de água com a temperatura de, aproximadamente, 24°C. Mexeu-se, então, a mistura com bagueta de modo a, tanto quanto o possível, manter as partículas em suspensão. Esperou-se até a mistura atingir a temperatura de equilíbrio.

Depois de ter atingido a temperatura de equilíbrio, a amostra foi agitada durante 1 minuto, no qual mexeu-se a proveta com movimentos energéticos, de modo que a boca da proveta passasse de cima para baixo e vice-versa, mantendo-se sempre uma das mãos na abertura da proveta para evitar o vazamento da mistura.

Imediatamente após a agitação, colocou-se a proveta sobre a bancada, anotando-se o tempo exato do início da sedimentação e mergulhando-se o densímetro na dispersão.

Realizaram-se três medidas, sendo a primeira aos 30 segundos, a segunda após 1 minuto e a terceira aos 2 minutos. Estas medidas foram realizadas para, posteriormente, calcular-se uma média.

Após isso, colocou-se a proveta no banho e realizaram-se as leituras do densímetro nos tempos seguintes de 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 24 horas, a contar do início da sedimentação.

Depois de cada leitura do densímetro, mediu-se a temperatura da dispersão, exceto das duas primeiras leituras.

Realizada a última medida, verteu-se todo o material da proveta em uma peneira de 0,075 mm e lavou-se o material com água potável, à baixa pressão. Depois, secou-se o material retido em uma estufa à temperatura de 105°C para, posteriormente, realizar o peneiramento fino.

Após a coleta dos dados, utilizaram-se as equações 4 e 5 para o cálculo do diâmetro das partículas em suspensão e para a porcentagem do material em suspensão, respectivamente.

$$d = \sqrt{\frac{1800 \cdot n}{\delta - \delta_d} * \frac{a}{t}} \quad (4)$$

Sendo:

d = diâmetro máximo das partículas (mm);

n = coeficiente de viscosidade do meio dispersor à temperatura de ensaio (g.s/cm²);

a = altura de queda das partículas (cm), conforme anexo NBR 7181/84 (ABNT, 1984);

t = tempo de sedimentação (s);

δ = massa específica dos grãos dos solos (g/cm³);

δ_d = massa específica do meio dispersor à temperatura de ensaio (g/cm³), conforme a tabela 5.

Tabela 5 – Viscosidade da água (valores em 10⁻⁶ g.s/cm²)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	13,36	12,99	12,63	12,30	11,98	11,68	11,30	11,09	10,81	10,54
20	10,29	10,03	9,80	9,56	9,34	9,13	8,92	8,72	8,52	8,34
30	8,16	7,98	7,82	7,66	7,50	7,45	7,20	7,06	6,92	6,79

Fonte: NBR 7181 (ABNT, 2016)

$$Q_s = N * \frac{\delta}{(\delta - \delta_d)} * \frac{(V * \delta_c * (L - L_d))}{M} \quad (5)$$

Sendo:

Q_s = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro (%);

N = porcentagem do material que passa na peneira de 2,0 mm (%);

δ = massa específica dos grãos do solo (g/cm^3);

δ_d = massa específica do meio dispersor (g/cm^3);

V = volume da mistura em suspensão (cm^3);

δ_c = massa específica da água à temperatura de calibração do densímetro de 20°C (g/cm^3);

L = leitura do densímetro na suspensão (cm);

L_d = leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura da suspensão (cm);

M = massa do material submetido à sedimentação (g).

Nestes cálculos, se faz necessário ter o valor da massa específica dos grãos.

3.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

A metodologia deste ensaio se baseia na norma NBR 6508 (ABNT, 1984).

Inicialmente, escolheu-se e separou-se os materiais necessários para o ensaio. Numeraram-se três picnômetros distintos a serem utilizados e pesaram-se estes picnômetros vazios, através de uma balança digital.

Em seguida, colocou-se uma amostra de solo, seca em estufa à 110°C pelo período de 24 horas, em cada picnômetro da maneira descrita a seguir.

A amostra foi alocada dentro dos picnômetros, com o auxílio de uma espátula e de um funil, até atingir, no máximo, um terço da altura da redoma, como mostrado na figura 19.

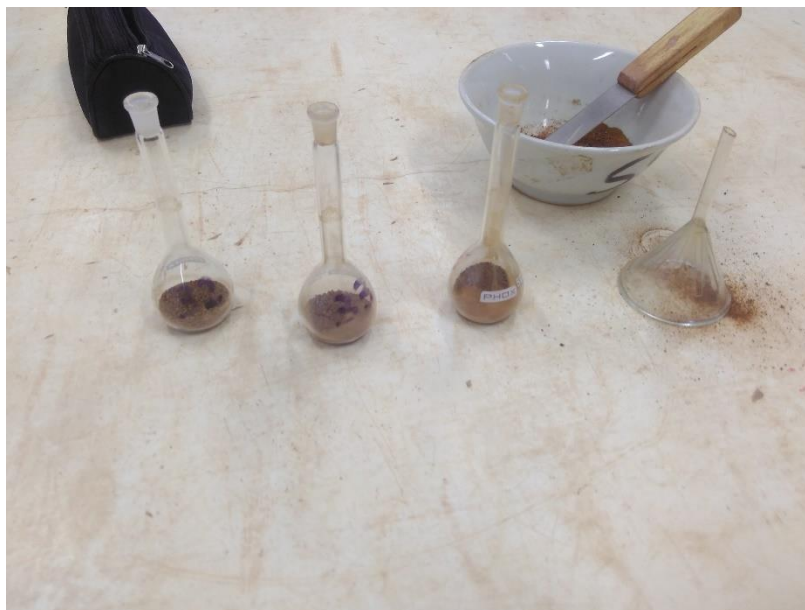


Figura 19: Pichômetros com solo preenchendo um terço do volume do bulbo

Fonte: Aatoria própria

Pesou-se, então, cada picnômetro com sua respectiva amostra de solo e anotou-se os valores obtidos. Em seguida, a água destilada foi acrescentada aos picnômetros somente até encobrir a amostra de solo, como ilustrado na figura 20. Nessa etapa, a amostra não é pesada.



Figura 20: Pichômetros com água cobrindo o solo em um terço do volume do bulbo

Fonte: Aatoria própria

Posteriormente, colocaram-se os conjuntos de picnômetro, solo e água dentro de um recipiente de vidro, ligado a uma bomba de vácuo, para que esta forçasse o ar dos vazios das amostras para fora. Vazios estes que foram ocupados, exclusivamente, pela água destilada já presente nos picnômetros. Este procedimento pode ser visto nas figuras 21 e 22.



Figura 21: Equipamento para aplicação do vácuo
Fonte: Autoria própria

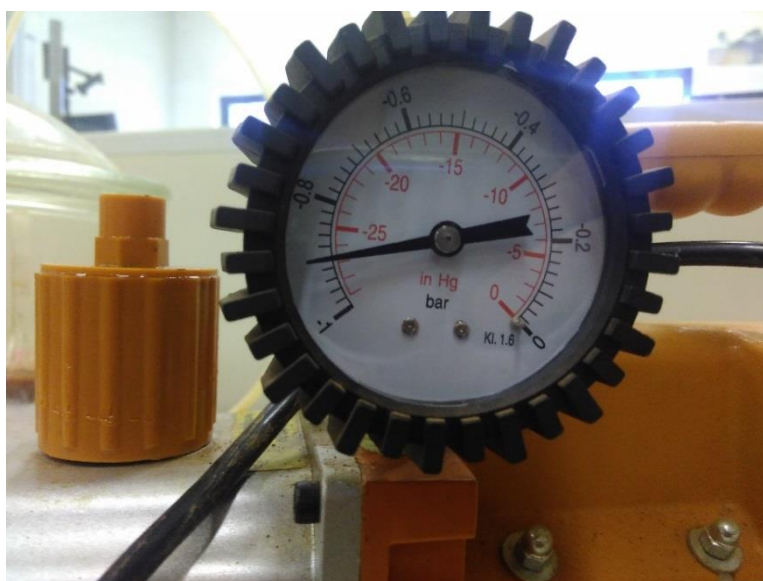


Figura 22: Pressão de vácuo durante o ensaio de determinação da massa específica dos grãos
Fonte: Autoria própria

Terminada essa etapa do ensaio, acrescentou-se água destilada no picnômetro até a altura da linha de marcação, com a parte de baixo do menisco sobre ela, e aferiu-se a temperatura das amostras, que foram, então, pesadas novamente.

Após isso, retiraram-se as amostras de solo dos respectivos picnômetros com água corrente, sendo estes secos com papel e algodão.

Com os picnômetros secos e limpos, acrescentou-se água destilada até a altura previamente estabelecida. Controlou-se a temperatura dessa nova amostra de água e, assim que igualada a temperatura entre a amostra exclusiva de água destilada e a mistura de água e solo anterior, pesou-se o conjunto e anotaram-se os valores obtidos.

A pesagem do picnômetro com a água destilada pode ser visto na figura 23, a seguir.



Figura 23: Pesagem dos picnômetros com apenas água destilada
Fonte: Autoria própria

Com os valores obtidos, utilizou-se a equação 6 para o cálculo da massa específica dos grãos ou densidade real dos grãos (Gs).

$$G_s = \frac{P_d}{P_1 + P_d - P_2} \quad (6)$$

P_d = peso do solo seco (g);

P_1 = peso do conjunto picnômetro + água (g);

P_2 = peso do conjunto picnômetro + solo + água (g);

Posteriormente, necessitou-se realizar a correção de temperatura de G_s , através do fator de correção presente na tabela 6.

Tabela 6 – Razão entre a densidade relativa da água à temperatura (t) e a densidade relativa da água a 20°C

Temperaturas t em °C	Densidade relativa da água	Fator de correção k_{20}	Temperaturas t em °C	Densidade relativa da água	Fator de correção k_{20}
4	1,0000	1,0018	19	0,9984	1,0002
5	1,0000	1,0018	20	0,9982	1,0000
6	0,9999	1,0017	21	0,9980	0,9998
7	0,9999	1,0017	22	0,9978	0,9996
8	0,9999	1,0017	23	0,9976	0,9993
9	0,9998	1,0016	24	0,9973	0,9991
10	0,9997	1,0015	25	0,9971	0,9989
11	0,9996	1,0014	26	0,9968	0,9986
12	0,9995	1,0013	27	0,9965	0,9983
13	0,9994	1,0012	28	0,9963	0,9980
14	0,9993	1,0011	29	0,9960	0,9977
15	0,9991	1,0009	30	0,9957	0,9974
16	0,9990	1,0008	31	0,9954	0,9972
17	0,9998	1,0006	32	0,9951	0,9969
18	0,9986	1,0004	33	0,9947	0,9965

Fonte: DNER (1994)

Este valor do G_s é denominado $G_{s(20)}$ e pode ser calculado a partir da equação 7, mostrada a seguir.

$$G_{s(20)} = k_{20} \cdot G_{s(t)} \quad (7)$$

Sendo:

k_{20} = fator de correção retirado da tabela 6, conforme a temperatura da água no momento do ensaio;

$G_s(t)$ = densidade relativa dos grãos calculada na temperatura t , que é a temperatura no momento do ensaio;

Utiliza-se este valor para realizar os cálculos nos ensaios de sedimentação.

3.4 ENSAIO LABORATORIAL DE PERMEABILIDADE DAS AMOSTRAS DE SOLO

Para se obter o coeficiente de permeabilidade das amostras de solo, utilizou-se o Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável.

3.4.1 Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável

Para a realização do Ensaio de Permeabilidade à Carga Variável foram utilizados os seguintes materiais: balança digital, béquer, termômetro, permeâmetro, régua metálica, paquímetro, cronômetro, reservatório de água e tubulações.

A preparação para o ensaio consistiu em adquirir os dados relativos ao permeâmetro, seu volume e massa, e alocar o solo neste.

O conjunto é então ligado à extremidade inferior de um tubo vertical, com um reservatório acrescido de ladrão na ponta superior, cujo diâmetro foi medido com um paquímetro.

Na saída do permeâmetro, foi ligado um tubo maleável por onde saiu o volume de água passante pelo conjunto saturado.

Abasteceu-se, então, o reservatório com água e o realimentou-se continuamente, até começar a haver um fluxo constante na saída do permeâmetro.

Posteriormente, a saída de água foi bloqueada e o reservatório parou de ser alimentado.

Mediu-se, então, a distância entre o nível atual do reservatório e a saída de água (h_1).

Com o béquer aguardando na saída do tubo maleável, foi liberada a saída de água do reservatório e iniciado o cronômetro.

Assim que finalizado o tempo, sendo este pré-determinado, mediu-se a distância entre o nível atual do reservatório e o da saída (h_2) e aferiu-se a temperatura da água retida no béquer. Esta etapa foi repetida quatro vezes.

Com os dados obtidos, calculou-se o coeficiente de permeabilidade pela equação 8.

$$k = 2,303 * \frac{a * L}{A * t} * \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (8)$$

Sendo:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s)

a = área da seção transversal do reservatório (cm²);

L = comprimento da amostra na direção do fluxo (cm);

A = área da seção transversal da amostra do solo (cm²);

t = tempo de ensaio (s).

Posteriormente, o coeficiente encontrado foi corrigido para a temperatura padrão de 20°C, através da equação 9.

$$k_{20} = k . C \quad (9)$$

Sendo:

k_{20} = coeficiente de permeabilidade a 20°C;

k = coeficiente de permeabilidade encontrado;

C = fator de correção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS PARA AS MEDIÇÕES DE RADÔNIO

Os resultados para as medições de radônio foram obtidos a partir das equações 10, 11 e 12, que geram uma melhor aproximação quando há diversas medidas de uma mesma grandeza com erros associados.

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (10)$$

$$p = \frac{1}{\sigma_t^2} \quad (11)$$

$$\sigma_T^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (12)$$

Sendo:

$\bar{y} = M =$ valor referente à concentração de radônio (Bq/m³);

$\sigma_T =$ erro associado à medição da concentração de radônio (Bq/m³).

Já para o cálculo da diferença entre o valor medido no solo e o background, utiliza-se para o cálculo dos erros associados a equação 13, mostrada a seguir.

$$\sigma_F^2 = \left(\frac{dF}{dA}\right)^2 \cdot \sigma_A^2 + \left(\frac{dF}{dB}\right)^2 \cdot \sigma_B^2$$

$$\sigma_F^2 = 1^2 \cdot \sigma_A^2 + (-1)^2 \cdot \sigma_B^2$$

$$\sigma_F = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (13)$$

Sendo:

σ_A = erro associado à medida de background (Bq/m³);

σ_B = erro associado à medida de radônio no solo (Bq/m³);

σ_F = erro total associado às medidas de background e de radônio no solo (Bq/m³).

A seguir, apresentam-se os cálculos para as concentrações de radônio nos pontos escolhidos, bem como os gráficos diferenciando o radônio do torônio.

4.1.1 Resultado da Medida 01

A medida 01 foi realizada atrás do Bloco IJ da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: 25°26'39,32"S e 49°21'16,01" O, como mostrado na figura 24, a seguir.



Figura 24: Local da medida 01
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) *Medida de background 01:*

Tabela 7 – Medida de background 01

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	12:41h	=	-1	+/-	72	Bq/m ³
2	12:42h	=	-2	+/-	41	Bq/m ³
3	12:43h	=	-1	+/-	72	Bq/m ³
4	12:44h	=	0	+/-	105	Bq/m ³
5	12:45h	=	-2	+/-	41	Bq/m ³
6	12:46h	=	0	+/-	106	Bq/m ³
7	12:47h	=	-2	+/-	41	Bq/m ³
8	12:48h	=	-1	+/-	72	Bq/m ³
9	12:49h	=	-2	+/-	41	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 01:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 8 – Valores calculados de P do background da medida 01

P1	=	0,000192901
P2	=	0,000594884
P3	=	0,000192901
P4	=	9,07029E-05
P5	=	0,000594884
P6	=	8,89996E-05
P7	=	0,000594884
P8	=	0,000192901
P9	=	0,000594884
Somatório P	=	0,003137942

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = -1,701043295 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 0,00 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se que:

$$\sigma = 17,8516155 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 17,85 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 01 é:

$$M \pm \sigma = 0,00 \pm 17,85 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 01:*

Tabela 9 – Medida de radônio no solo 01

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	12:58h	=	60416	+/-	1984	Bq/m ³
2	12:59h	=	69632	+/-	2320	Bq/m ³

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
3	13:00h	=	71680	+/-	2432	Bq/m ³
4	13:01h	=	92160	+/-	3088	Bq/m ³
5	13:02h	=	93696	+/-	3200	Bq/m ³
6	13:03h	=	99328	+/-	3440	Bq/m ³
7	13:04h	=	77824	+/-	2832	Bq/m ³
8	13:05h	=	115200	+/-	4000	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 01:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 10 – Valores calculados de P para a medida 01 de radônio no solo

P1	=	2,54049E-07
P2	=	1,85791E-07
P3	=	1,69072E-07
P4	=	1,04869E-07
P5	=	9,76563E-08
P6	=	8,45051E-08
P7	=	1,24685E-07
P8	=	6,25E-08
Somatório P	=	1,08313E-06

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 78030,19861 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 78030,20 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 960,8606661 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 960,86 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 01 é:

$$M \pm \sigma = 78030,20 \pm 960,86 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se a equação 13 para diferença do erro, obteve-se para medida 01:

$$M \pm \sigma = 78000 \pm 1000 \text{ Bq/m}^3$$

f) *Quantidade de ^{222}Rn e ^{220}Rn :*

A seguir, na tabela 11, apresentam-se as concentrações de radônio e torônio individualmente para a medida 01 e, em seguida, o gráfico 1 representando tais concentrações.

Tabela 11 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 01

Concentração da atividade ^{222}Rn e ^{220}Rn (Bq/m³)		Erros
Média:	78000,00	1000
Concentração da atividade ^{220}Rn (Bq/m³)		
	60160,00	
	69632,00	
	61184,00	
Média:	63658,67	5198,33
Concentração da atividade ^{222}Rn (Bq/m³)		
^{222}Rn	14300	6200

Fonte: Autoria própria

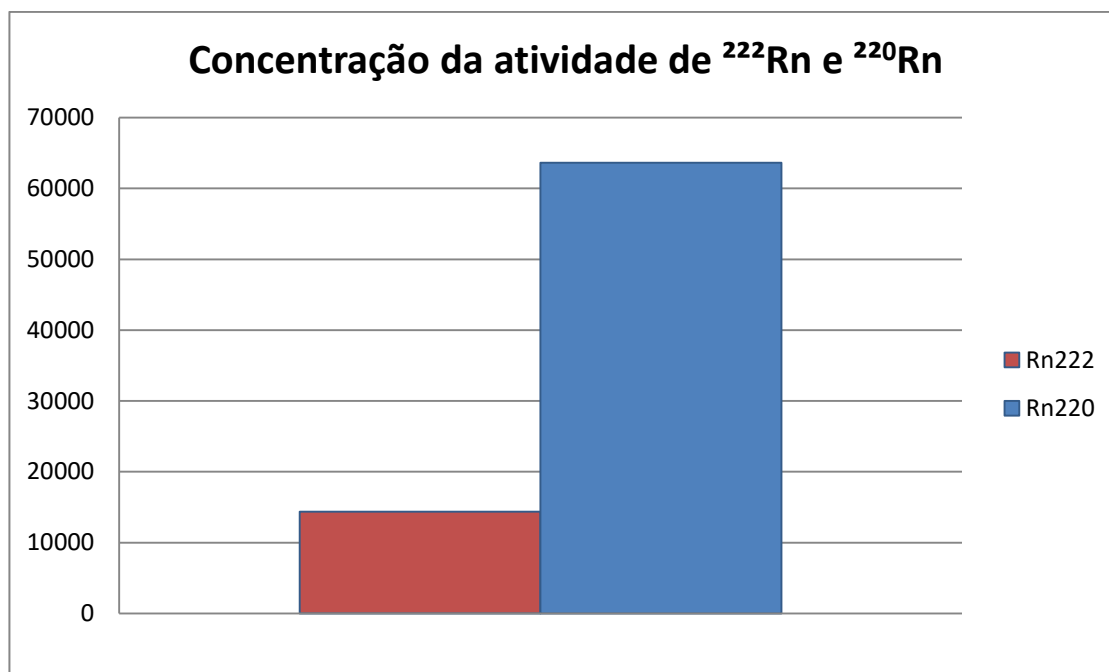


Gráfico 1: Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn
Fonte: Autoria própria

4.1.2 Resultado da Medida 02

A medida 02 foi realizada atrás do Bloco IJ da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: 25°26'38,98"S e 49°21'16,42" O, como mostrado na figura 25, a seguir.



Figura 25: Local da medida 02
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) *Medidas de background 02:*

Tabela 12 – Medida de background 02

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	13:38h	=	161	+/-	840	Bq/m ³
2	13:39h	=	184	+/-	1264	Bq/m ³
3	13:40h	=	155	+/-	1104	Bq/m ³
4	13:41h	=	125	+/-	944	Bq/m ³
5	13:42h	=	182	+/-	1144	Bq/m ³
6	13:43h	=	175	+/-	1232	Bq/m ³
7	13:44h	=	154	+/-	1104	Bq/m ³
8	13:45h	=	146	+/-	944	Bq/m ³
9	13:46h	=	178	+/-	1192	Bq/m ³
10	13:47h	=	175	+/-	1168	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 02:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 13 – Valores calculados de P do background da medida 02

P1	=	1,41723E-06
P2	=	6,25901E-07
P3	=	8,20468E-07
P4	=	1,12216E-06
P5	=	7,64096E-07
P6	=	6,58838E-07
P7	=	8,20468E-07
P8	=	1,12216E-06
P9	=	7,03797E-07
P10	=	7,33017E-07
Somatório P	=	8,78815E-06

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 160,3167913 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 160,32 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 337,3271954 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 337,33 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 02 é:

$$M \pm \sigma = 160,32 \pm 337,33 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 02:*

Tabela 14 – Medida de radônio no solo 02

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	13:52h	=	93696	+/-	3120	Bq/m ³
2	13:53h	=	128000	+/-	4256	Bq/m ³
3	13:54h	=	119808	+/-	4160	Bq/m ³
4	13:55h	=	117248	+/-	4160	Bq/m ³
5	13:56h	=	101888	+/-	3728	Bq/m ³
6	13:57h	=	111616	+/-	4160	Bq/m ³
7	13:58h	=	121856	+/-	4480	Bq/m ³
8	13:59h	=	114688	+/-	4192	Bq/m ³
9	14:00h	=	110592	+/-	4192	Bq/m ³
10	14:01h	=	103936	+/-	4048	Bq/m ³
11	14:02h	=	111616	+/-	4320	Bq/m ³
12	14:03h	=	125952	+/-	4736	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 02:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 15 – Valores calculados de P para a medida 02 de radônio no solo

P1	=	1,02728E-07
P2	=	5,52073E-08
P3	=	5,77848E-08
P4	=	5,77848E-08
P5	=	7,19529E-08
P6	=	5,77848E-08
P7	=	4,98246E-08
P8	=	5,69059E-08
P9	=	5,69059E-08
P10	=	6,10266E-08
P11	=	5,35837E-08
P12	=	4,45838E-08
Somatório P	=	7,26073E-07

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 111560,4928 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 111560,49 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 1173,571967 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 1173,57 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 02 é:

$$M \pm \sigma = 111560,49 \pm 1173,57 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se as equações para diferença do erro, obteve-se para medida 02:

$$M \pm \sigma = 111400 \pm 1200 \text{ Bq/m}^3$$

f) *Quantidade de ^{222}Rn e ^{220}Rn :*

A seguir, na tabela 16, apresentam-se as concentrações de radônio e torônio individualmente para a medida 02 e, em seguida, o gráfico 2 representando tais concentrações.

Tabela 16 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 02

Concentração da atividade ^{222}Rn e ^{220}Rn (Bq/m³)			Erros
Média:	111400,00		1200
Concentração da atividade ^{220}Rn (Bq/m³)			
	28032,00		
	49152,00		
	41472,00		
Média:	39552,00		10690,11
Concentração da atividade ^{222}Rn (Bq/m³)			
^{222}Rn	72000		12000

Fonte: Autoria própria

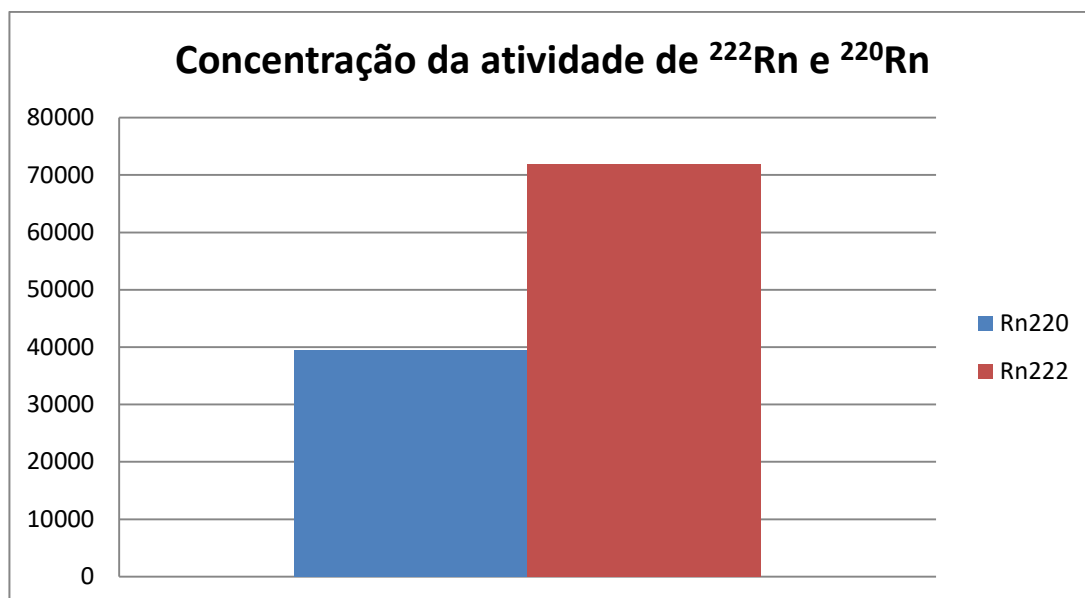


Gráfico 2: Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn
Fonte: Autoria própria

4.1.3 Resultado da Medida 03

A medida 03 foi realizada atrás do Bloco IJ da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: 25°26'38,29"S e 49°21'17,70" O, como mostrado na figura 26, a seguir.



Figura 26: Local da medida 03
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) *Medidas de background 03:*

Tabela 17 – Medida de background 03

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	17:39h	=	3	+/-	101	Bq/m ³
2	17:40h	=	0	+/-	108	Bq/m ³
3	17:41h	=	4	+/-	179	Bq/m ³
4	17:42h	=	12	+/-	270	Bq/m ³
5	17:43h	=	2	+/-	142	Bq/m ³
6	17:44h	=	0	+/-	105	Bq/m ³
7	17:45h	=	2	+/-	137	Bq/m ³
8	17:46h	=	8	+/-	222	Bq/m ³
9	17:47h	=	9	+/-	231	Bq/m ³
10	17:48h	=	8	+/-	229	Bq/m ³
11	17:49h	=	8	+/-	219	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 03:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 18 – Valores calculados de P do background da medida 03

P1	=	9,80296E-05
P2	=	8,57339E-05
P3	=	3,121E-05
P4	=	1,37174E-05
P5	=	4,95933E-05
P6	=	9,07029E-05
P7	=	5,32793E-05
P8	=	2,02906E-05
P9	=	1,87403E-05
P10	=	1,9069E-05
P11	=	2,08503E-05
Somatório P	=	0,000501217

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 2,87226 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 2,87 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 44,66705 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 44,67 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 03 é:

$$M \pm \sigma = 2,87 \pm 44,67 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 03:*

Tabela 19 – Medida de radônio no solo 03

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	17:54h	=	89600	+/-	2816	Bq/m ³
2	17:55h	=	96256	+/-	3152	Bq/m ³
3	17:56h	=	94208	+/-	3184	Bq/m ³
4	17:57h	=	74752	+/-	2640	Bq/m ³
5	17:58h	=	67584	+/-	2512	Bq/m ³
6	17:59h	=	88064	+/-	3104	Bq/m ³
7	18:00h	=	99840	+/-	3520	Bq/m ³
8	18:01h	=	79360	+/-	2944	Bq/m ³
9	18:02h	=	77312	+/-	2944	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 03:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 20 – Valores calculados de P para a medida 03 de radônio no solo

P1	=	1,26106E-07
P2	=	1,00653E-07
P3	=	9,86402E-08
P4	=	1,4348E-07
P5	=	1,58475E-07
P6	=	1,0379E-07
P7	=	8,07076E-08
P8	=	1,15378E-07
P9	=	1,15378E-07
Somatório P	=	1,04261E-06

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 83435,54314 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 83435,54 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 979,3530357 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 979,35 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 03 é:

$$M \pm \sigma = 83435,54 \pm 979,35 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se as equações para diferença do erro, obteve-se para medida 03:

$$M \pm \sigma = 83400 \pm 1000 \text{ Bq/m}^3$$

f) *Quantidade de ^{222}Rn e ^{220}Rn :*

A seguir, na tabela 21, apresentam-se as concentrações de radônio e torônio individualmente para a medida 03 e, em seguida, o gráfico 3 representando tais concentrações.

Tabela 21 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 03

Concentração da atividade ^{222}Rn e ^{220}Rn (Bq/m³)		Erros
Média:	83400,00	1000
Concentração da atividade Rn220 (Bq/m³)		
	69632,00	
	62976,00	
	51456,00	
Média:	61354,67	9195,83
Concentração da atividade ^{222}Rn (Bq/m³)		
^{222}Rn	22000	11000

Fonte: Autoria própria

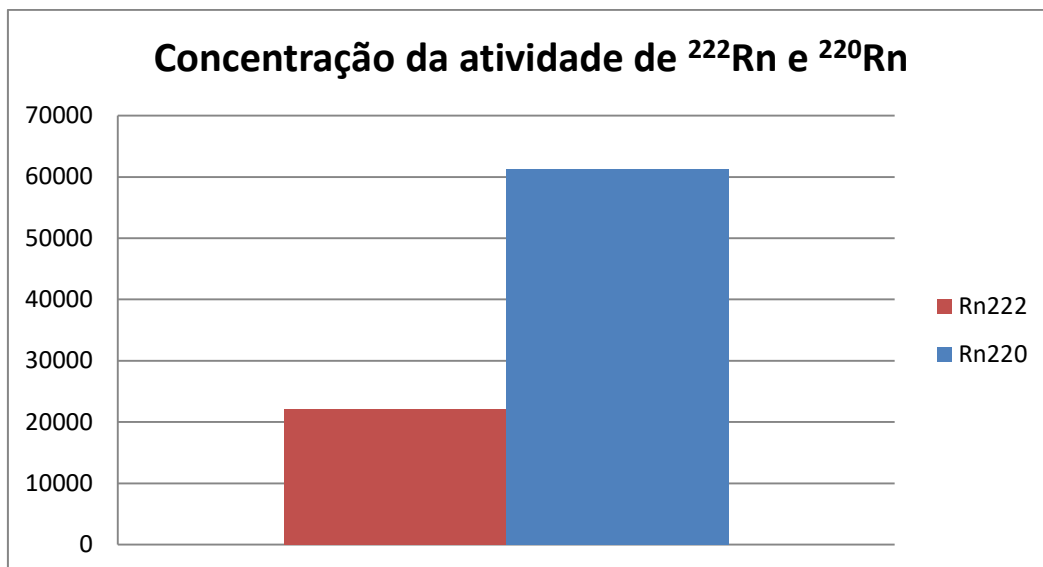


Gráfico 3: Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn
Fonte: Autoria própria

4.1.4 Resultado da Medida 04

A medida 04 foi realizada atrás da casa localizada perto do Bloco IJ da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: $25^{\circ}26'37,74''\text{S}$ e $49^{\circ}21'17,49''\text{O}$, como mostrado na figura 27, a seguir.



Figura 27: Local da medida 04
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) *Medida de background 04:*

Tabela 22 – Medida de background 04

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	12:34h	=	7	+/-	175	Bq/m ³
2	12:35h	=	7	+/-	213	Bq/m ³
3	12:36h	=	6	+/-	208	Bq/m ³
4	12:37h	=	4	+/-	179	Bq/m ³
5	12:38h	=	4	+/-	179	Bq/m ³
6	12:39h	=	4	+/-	179	Bq/m ³
7	12:40h	=	2	+/-	142	Bq/m ³
8	12:41h	=	6	+/-	208	Bq/m ³
9	12:42h	=	0	+/-	106	Bq/m ³
10	12:43h	=	6	+/-	181	Bq/m ³
11	12:44h	=	8	+/-	222	Bq/m ³
12	12:45h	=	0	+/-	106	Bq/m ³
13	12:46h	=	0	+/-	105	Bq/m ³

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
14	12:47h	=	6	+/-	208	Bq/m ³
15	12:48h	=	0	+/-	104	Bq/m ³
16	12:49h	=	9	+/-	235	Bq/m ³
17	12:50h	=	5	+/-	194	Bq/m ³
18	12:51h	=	6	+/-	209	Bq/m ³
19	12:52h	=	5	+/-	194	Bq/m ³
20	12:53h	=	4	+/-	169	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 04:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 23 – Valores calculados de P do background da medida 04

P1	=	3,26531E-05
P2	=	2,20415E-05
P3	=	2,31139E-05
P4	=	3,121E-05
P5	=	3,121E-05
P6	=	3,121E-05
P7	=	4,95933E-05
P8	=	2,31139E-05
P9	=	8,89996E-05
P10	=	3,05241E-05
P11	=	2,02906E-05
P12	=	8,89996E-05
P13	=	9,07029E-05
P14	=	2,31139E-05
P15	=	9,24556E-05
P16	=	1,81077E-05
P17	=	2,65703E-05
P18	=	2,28932E-05
P19	=	2,65703E-05
P20	=	3,50128E-05
Somatório P	=	0,000808387

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 2,875074297 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 2,88 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 35,17146567 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 35,17 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 04 é:

$$M \pm \sigma = 2,88 \pm 35,17 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 04:*

Tabela 24 – Medida de radônio no solo 04

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	13:01h	=	56064	+/-	1792	Bq/m ³
2	13:02h	=	71168	+/-	2272	Bq/m ³
3	13:03h	=	88576	+/-	2880	Bq/m ³
4	13:04h	=	89600	+/-	2960	Bq/m ³
5	13:05h	=	89088	+/-	2992	Bq/m ³
6	13:06h	=	81408	+/-	2832	Bq/m ³
7	13:07h	=	77312	+/-	2768	Bq/m ³
8	13:08h	=	84992	+/-	3024	Bq/m ³
9	13:09h	=	68096	+/-	2576	Bq/m ³
10	13:10h	=	84480	+/-	3088	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 04:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 25 – Valores calculados de P para a medida 04 de radônio no solo

P1	=	3,11404E-07
P2	=	1,93724E-07
P3	=	1,20563E-07
P4	=	1,14134E-07
P5	=	1,11706E-07
P6	=	1,24685E-07
P7	=	1,30517E-07
P8	=	1,09354E-07
P9	=	1,50698E-07
P10	=	1,04869E-07
Somatório P	=	1,47165E-06

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 75261,53534 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 75261,53 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 824,3222241 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 824,32 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 04 é:

$$M \pm \sigma = 75261,53 \pm 824,32 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se as equações para diferença do erro, obteve-se para medida 04:

$$M \pm \sigma = 75200 \pm 800 \text{ Bq/m}^3$$

f) Quantidade de ^{222}Rn e ^{220}Rn :

A seguir, na tabela 26, apresentam-se as concentrações de radônio e torônio individualmente para a medida 04 e, em seguida, o gráfico 4 representando tais concentrações.

Tabela 26 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 04

Concentração da atividade ^{222}Rn e ^{220}Rn (Bq/m ³)		Erros
Média:	75200,00	800
Concentração da atividade ^{220}Rn (Bq/m ³)		
	66560,00	
	54016,00	
	69632,00	
Média:	63402,67	8272,93
Concentração da atividade ^{222}Rn (Bq/m ³)		
^{222}Rn	11900	9100

Fonte: Autoria própria

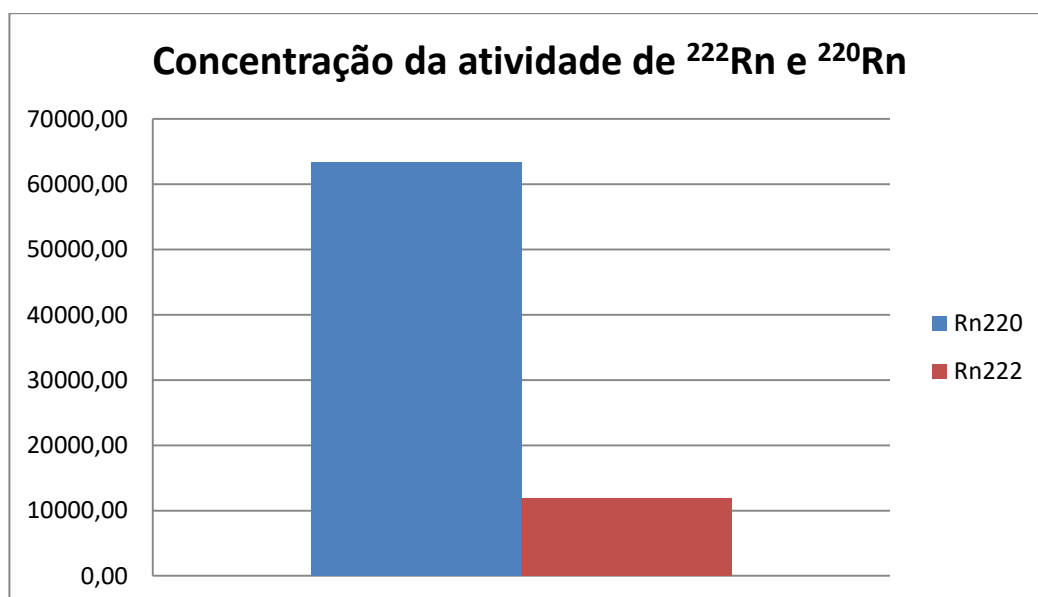


Gráfico 4: Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn
Fonte: Autoria própria

4.1.5 Resultado da Medida 05

A medida 05 foi realizada na frente do laboratório de hidráulica do Bloco IJ da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: 25°26'38,18"S e 49°21'16,32" O, como mostrado na figura 28, a seguir.



Figura 28: Local da medida 05
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) Medida de background 05:

Tabela 27 – Medida de background 05

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	13:39h	=	212	+/-	1192	Bq/m ³
2	13:40h	=	182	+/-	1144	Bq/m ³
3	13:41h	=	151	+/-	1096	Bq/m ³

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
4	13:42h	=	152	+/-	964	Bq/m ³
5	13:43h	=	179	+/-	1152	Bq/m ³
6	13:44h	=	169	+/-	1008	Bq/m ³
7	13:45h	=	200	+/-	1160	Bq/m ³
8	13:46h	=	167	+/-	1384	Bq/m ³
9	13:47h	=	194	+/-	1000	Bq/m ³
10	13:48h	=	166	+/-	1400	Bq/m ³
11	13:49h	=	179	+/-	1064	Bq/m ³
12	13:50h	=	179	+/-	1128	Bq/m ³
13	13:51h	=	190	+/-	1352	Bq/m ³
14	13:52h	=	184	+/-	1152	Bq/m ³
15	13:53h	=	177	+/-	1128	Bq/m ³
16	13:54h	=	154	+/-	1112	Bq/m ³
17	13:55h	=	212	+/-	1416	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 05:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 28 – Valores calculados de P do background da medida 05

P1	=	7,03797E-07
P2	=	7,64096E-07
P3	=	8,3249E-07
P4	=	1,07608E-06
P5	=	7,5352E-07
P6	=	9,8419E-07
P7	=	7,43163E-07
P8	=	5,22069E-07
P9	=	0,000001
P10	=	5,10204E-07
P11	=	8,83317E-07
P12	=	7,85926E-07
P13	=	5,47075E-07
P14	=	7,5352E-07
P15	=	7,85926E-07
P16	=	8,08706E-07
P17	=	4,98739E-07
Somatório P	=	1,29528E-05

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 177,8786224 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 177,88 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 277,854731 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 277,85 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 05 é:

$$M \pm \sigma = 177,88 \pm 277,85 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 05:*

Tabela 29 – Medida de radônio no solo 05

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	14:00h	=	33280	+/-	3360	Bq/m ³
2	14:01h	=	26240	+/-	3728	Bq/m ³
3	14:02h	=	35072	+/-	3232	Bq/m ³
4	14:03h	=	34048	+/-	3168	Bq/m ³
5	14:04h	=	31744	+/-	3264	Bq/m ³
6	14:05h	=	30976	+/-	3168	Bq/m ³
7	14:06h	=	37376	+/-	2832	Bq/m ³
8	14:07h	=	28416	+/-	3568	Bq/m ³
9	14:08h	=	27392	+/-	3552	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 05:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 30 – Valores calculados de P para a medida 05 de radônio no solo

P1	=	8,85771E-08
P2	=	7,19529E-08
P3	=	9,5732E-08
P4	=	9,96391E-08
P5	=	9,38641E-08
P6	=	9,96391E-08
P7	=	1,24685E-07
P8	=	7,85507E-08
P9	=	7,926E-08
Somatório P	=	8,319E-07

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 32113,67906 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 32113,68 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 1096,388524 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 1096,39 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 05 é:

$$M \pm \sigma = 32113,68 \pm 1096,39 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se as equações para diferença do erro, obteve-se para medida 05:

$$M \pm \sigma = 32000 \pm 1000 \text{ Bq/m}^3$$

f) Quantidade de ^{222}Rn e ^{220}Rn :

A seguir, na tabela 31, apresentam-se as concentrações de radônio e torônio individualmente para a medida 05 e, em seguida, o gráfico 5 representando tais concentrações.

Tabela 31 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 05

Concentração da atividade ^{222}Rn e ^{220}Rn (Bq/m ³)		Erros
Média:	32000	1000
Concentração da atividade Rn220 (Bq/m ³)		
	16640,00	
	12736,00	
	14464,00	
Média:	14613,33	1956,28
Concentração da atividade ^{222}Rn (Bq/m ³)		
^{222}Rn	17000	3000

Fonte: Autoria própria

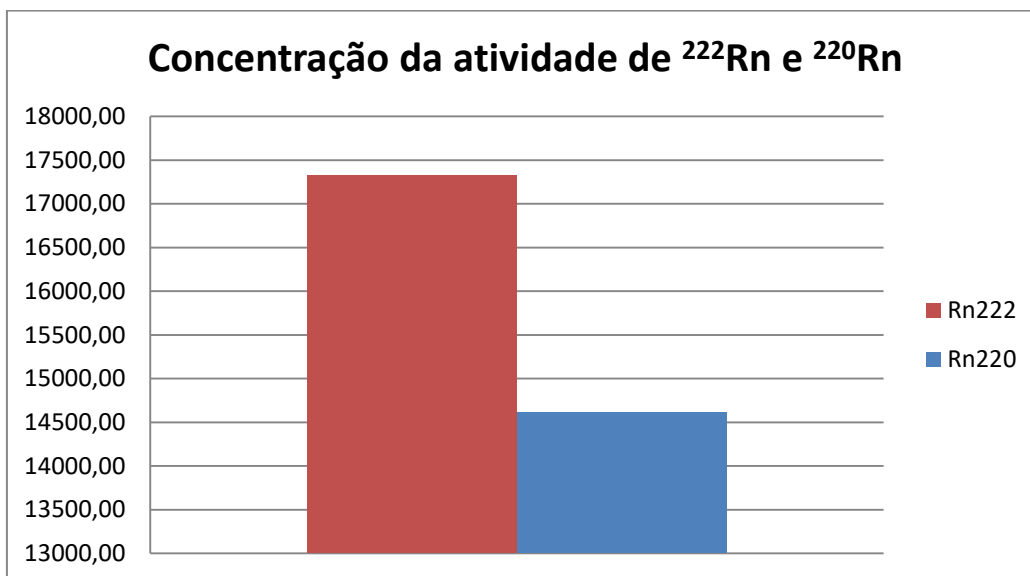


Gráfico 5: Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn
 Fonte: Autoria própria

4.1.6 Resultado da Medida 06

A medida 06 foi realizada próximo ao Bloco A da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: 25°26'36,40"S e 49°21'13,12" O, como mostrado na figura 29, a seguir.



Figura 29: Local da medida 06
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) Medida de background 06:

Tabela 32 – Medida de background 06

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	14:34h	=	212	+/-	1304	Bq/m ³
2	14:35h	=	147	+/-	1020	Bq/m ³
3	14:36h	=	192	+/-	1184	Bq/m ³
4	14:37h	=	172	+/-	1152	Bq/m ³
5	14:38h	=	173	+/-	1016	Bq/m ³

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
6	14:39h	=	180	+/-	1256	Bq/m ³
7	14:40h	=	161	+/-	1000	Bq/m ³
8	14:41h	=	141	+/-	992	Bq/m ³
9	14:42h	=	154	+/-	1048	Bq/m ³
10	14:43h	=	166	+/-	1080	Bq/m ³
11	14:44h	=	130	+/-	892	Bq/m ³
12	14:45h	=	146	+/-	864	Bq/m ³
13	14:46h	=	139	+/-	988	Bq/m ³
14	14:47h	=	154	+/-	908	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 06:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 33 – Valores calculados de P do background da medida 06

P1	=	5,88091E-07
P2	=	9,61169E-07
P3	=	7,1334E-07
P4	=	7,5352E-07
P5	=	9,68752E-07
P6	=	6,339E-07
P7	=	0,000001
P8	=	1,01619E-06
P9	=	9,10495E-07
P10	=	8,57339E-07
P11	=	1,25681E-06
P12	=	1,33959E-06
P13	=	1,02444E-06
P14	=	1,21291E-06
Somatório P	=	1,32366E-05

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 157,8355781 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 157,84 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 274,8606449 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 274,86 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 06 é:

$$M \pm \sigma = 157,84 \pm 274,86 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 06:*

Tabela 34 – Medida de radônio no solo 06

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	14:50h	=	154	+/-	632	Bq/m ³
2	14:51h	=	122	+/-	976	Bq/m ³
3	14:52h	=	124	+/-	856	Bq/m ³
4	14:53h	=	125	+/-	856	Bq/m ³
5	14:54h	=	162	+/-	1192	Bq/m ³
6	14:55h	=	143	+/-	1004	Bq/m ³
7	14:56h	=	126	+/-	796	Bq/m ³
8	14:57h	=	117	+/-	904	Bq/m ³
9	14:58h	=	147	+/-	1080	Bq/m ³
10	14:59h	=	147	+/-	1080	Bq/m ³
11	15:00h	=	124	+/-	1064	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 06:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 35 – Valores calculados de P para a medida 06 de radônio no solo

P1	=	2,50361E-06
P2	=	1,04979E-06
P3	=	1,36475E-06
P4	=	1,36475E-06
P5	=	7,03797E-07
P6	=	9,92048E-07
P7	=	1,57824E-06
P8	=	1,22367E-06
P9	=	8,57339E-07
P10	=	8,57339E-07
P11	=	8,83317E-07
Somatório P	=	1,33786E-05

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 135,5105112 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 135,51 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 273,3972147 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 273,40 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 06 é:

$$M \pm \sigma = 135,51 \pm 273,40 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se as equações para diferença do erro, obteve-se para medida 06:

$$M \pm \sigma = -22,33 \pm 387,68 \text{ Bq/m}^3$$

$$M \pm \sigma = 0,00 \pm 387,68 \text{ Bq/m}^3$$

Como a medida da concentração de radônio deu um valor negativo e, sabendo-se da impossibilidade deste fato, conclui-se que alguma parte do procedimento para a medição deste dado foi inadequada.

Sendo assim, considerou-se este dado como um dado espúrio, pois ele aumenta o desvio-padrão e distorce a média das concentrações.

4.1.7 Resultado da Medida 07

A medida 07 foi realizada entre o Bloco A e o Bloco B, próximo ao estacionamento da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: $25^{\circ}26'34,84''\text{S}$ e $49^{\circ}21'12,14''\text{O}$, como mostrado na figura 30, a seguir.



Figura 30: Local da medida 07
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) *Medida de background 07:***Tabela 36 – Medida de background 07**

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	15:48h	=	-3	+/-	30	Bq/m ³
2	15:49h	=	-3	+/-	3	Bq/m ³
3	15:50h	=	-3	+/-	3	Bq/m ³
4	15:51h	=	-3	+/-	3	Bq/m ³
5	15:52h	=	-2	+/-	45	Bq/m ³
6	15:53h	=	-1	+/-	61	Bq/m ³
7	15:54h	=	-2	+/-	41	Bq/m ³
8	15:55h	=	-3	+/-	3	Bq/m ³
9	15:56h	=	-3	+/-	3	Bq/m ³
10	15:57h	=	-2	+/-	41	Bq/m ³
11	15:58h	=	-1	+/-	72	Bq/m ³
12	15:59h	=	-1	+/-	71	Bq/m ³
13	16:00h	=	-2	+/-	41	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 07:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 37 – Valores calculados de P do background da medida 07

P1	=	0,001111
P2	=	0,111111
P3	=	0,111111
P4	=	0,111111
P5	=	0,000494
P6	=	0,000269
P7	=	0,000595
P8	=	0,111111
P9	=	0,111111
P10	=	0,000595
P11	=	0,000193
P12	=	0,000198
P13	=	0,000595
Somatório P	=	0,559605

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = -2,993569541 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 0,00 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 1,336777548 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 1,34 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 07 é:

$$M \pm \sigma = 0,00 \pm 1,34 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 07:*

Tabela 38 – Medida de radônio no solo 07

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	16:08h	=	103936	+/-	3312	Bq/m ³
2	16:09h	=	109568	+/-	3568	Bq/m ³
3	16:10h	=	102912	+/-	3456	Bq/m ³
4	16:11h	=	106496	+/-	3648	Bq/m ³
5	16:12h	=	94720	+/-	3360	Bq/m ³
6	16:13h	=	113664	+/-	3936	Bq/m ³
7	16:14h	=	111616	+/-	3920	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 07:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 39 – Valores calculados de P para a medida 07 de radônio no solo

P1	=	9,11632E-08
P2	=	7,85507E-08
P3	=	8,37245E-08
P4	=	7,51433E-08
P5	=	8,85771E-08
P6	=	6,4549E-08
P7	=	6,50771E-08
Somatório P	=	5,46785E-07

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 105509,6154 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 105509,62 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 1352,358215 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 1352,36 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 07 é:

$$M \pm \sigma = 105509,62 \pm 1352,36 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se as equações para diferença do erro, obteve-se para medida 07:

$$M \pm \sigma = 105500 \pm 1400 \text{ Bq/m}^3$$

f) Quantidade de ^{222}Rn e ^{220}Rn :

A seguir, na tabela 40, apresentam-se as concentrações de radônio e torônio individualmente para a medida 07 e, em seguida, o gráfico 6 representando tais concentrações.

Tabela 40 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 07

Concentração da atividade ^{222}Rn e ^{220}Rn (Bq/m ³)		
Média:	105500	1400
Concentração da atividade ^{220}Rn (Bq/m ³)		
	49920,00	
	46592,00	
	53504,00	
Média:	50005,33	3456,79
Concentração da atividade ^{222}Rn (Bq/m ³)		
^{222}Rn	55500	5000

Fonte: Autoria própria

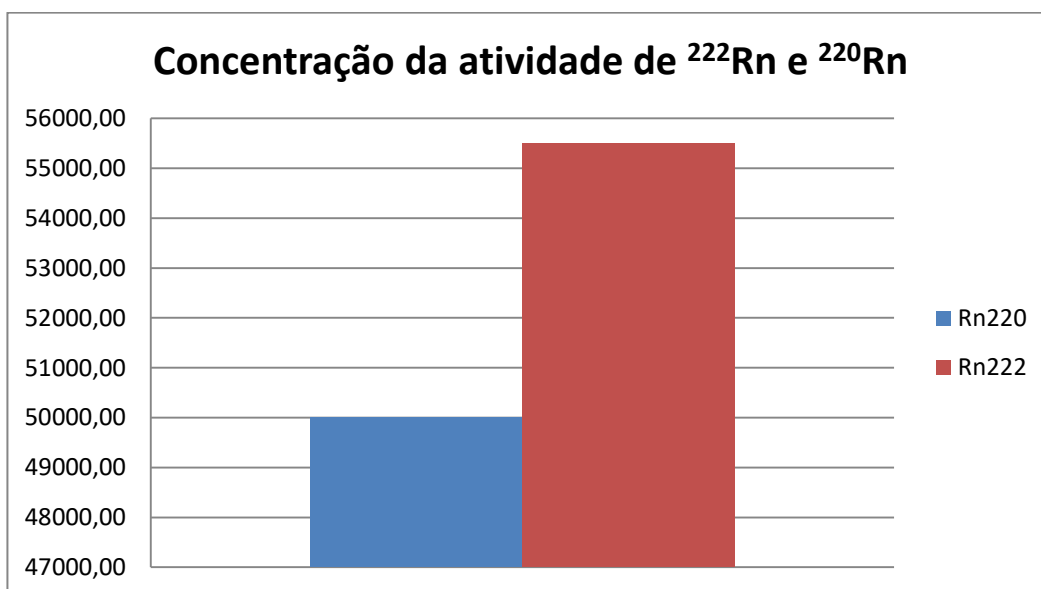


Gráfico 6: Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn

Fonte: Autoria própria

4.1.8 Resultado da Medida 08

A medida 08 foi realizada atrás do Bloco C, próximo ao estacionamento da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: 25°26'33,89"S e 49°21'15,25" O, como mostrado na figura 31, a seguir.



Figura 31: Local da medida 08
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) Medidas de background 08:

Tabela 41 – Medida de background 08

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	17:51h	=	-1	+/-	88	Bq/m ³
2	17:52h	=	3	+/-	163	Bq/m ³
3	17:53h	=	-1	+/-	72	Bq/m ³
4	17:54h	=	0	+/-	105	Bq/m ³

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
5	17:55h	=	-1	+/-	72	Bq/m ³
6	17:56h	=	-1	+/-	72	Bq/m ³
7	17:57h	=	-3	+/-	3	Bq/m ³
8	17:58h	=	3	+/-	163	Bq/m ³
9	17:59h	=	-1	+/-	72	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 08:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 42 – Valores calculados de P do background da medida 08

P1	=	0,00012913
P2	=	3,7638E-05
P3	=	0,0001929
P4	=	9,0703E-05
P5	=	0,0001929
P6	=	0,0001929
P7	=	0,11111111
P8	=	3,7638E-05
P9	=	0,0001929
Somatório P	=	0,11217783

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = -2,977488979 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 0,00 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 2,985702203 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 2,99 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 08 é:

$$M \pm \sigma = 0,00 \pm 2,99 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 08:*

Tabela 43 – Medida de radônio no solo 08

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	18:06h	=	154624	+/-	4896	Bq/m ³
2	18:07h	=	177152	+/-	5760	Bq/m ³
3	18:08h	=	174080	+/-	5856	Bq/m ³
4	18:09h	=	181248	+/-	6144	Bq/m ³
5	18:10h	=	162816	+/-	5760	Bq/m ³
6	18:11h	=	172032	+/-	5952	Bq/m ³
7	18:12h	=	183296	+/-	6432	Bq/m ³
8	18:13h	=	189440	+/-	6720	Bq/m ³
9	18:14h	=	164864	+/-	6080	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 08:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 44 – Valores calculados de P para a medida 08 de radônio no solo

P1	=	4,17174E-08
P2	=	3,01408E-08
P3	=	2,91607E-08
P4	=	2,6491E-08
P5	=	3,01408E-08
P6	=	2,82276E-08
P7	=	2,41717E-08
P8	=	2,21443E-08
P9	=	2,70516E-08
Somatório P	=	2,59246E-07

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 171715,8551 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 171715,86 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 1964,011616 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 1964,01 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 08 é:

$$M \pm \sigma = 171715,86 \pm 1964,01 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se as equações para diferença do erro, obteve-se para medida 08:

$$M \pm \sigma = 172000 \pm 2000 \text{ Bq/m}^3$$

f) *Quantidade de ^{222}Rn e ^{220}Rn :*

A seguir, na tabela 45, apresentam-se as concentrações de radônio e torônio individualmente para a medida 08 e, em seguida, o gráfico 7 representando tais concentrações.

Tabela 45 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 08

	Concentração da atividade ^{222}Rn e ^{220}Rn (Bq/m ³)	Erros
Média:	172000	2000
Concentração da atividade ^{220}Rn (Bq/m³)		
	92672,00	
	86528,00	
	101376,00	
Média:	93525,33	7460,69
Concentração da atividade ^{222}Rn (Bq/m³)		
^{222}Rn	78200	9400

Fonte: Autoria própria

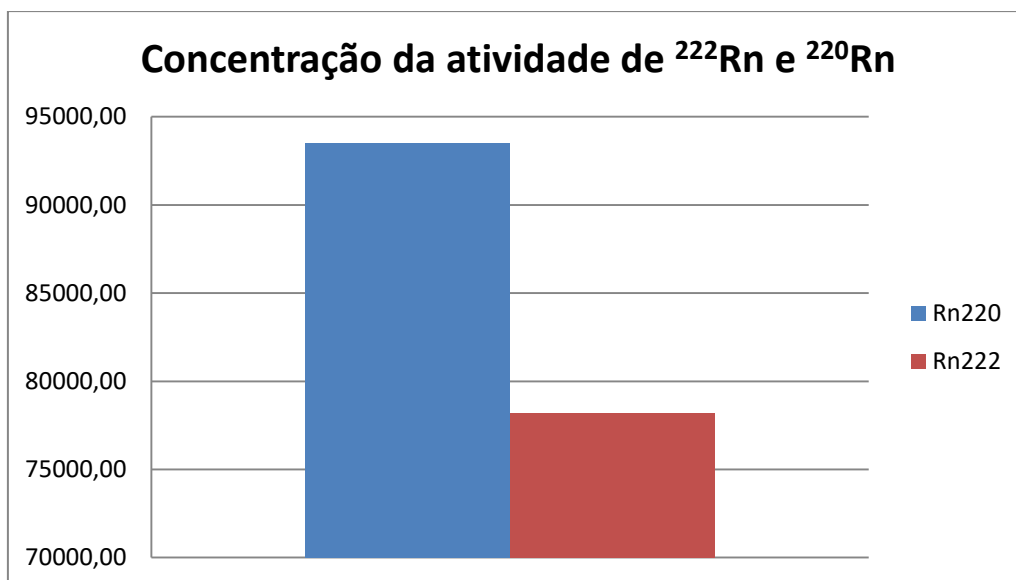


Gráfico 7: Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn
Fonte: Autoria própria

4.1.9 Resultado da Medida 09

A medida 09 foi realizada atrás do Bloco C, próximo à horta da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: $25^{\circ}26'35,35''\text{S}$ e $49^{\circ}21'15,66''\text{O}$, como mostrado na figura 32, a seguir.



Figura 32: Local da medida 09
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) *Medidas de background 09:*

Tabela 46 – Medida de background 09

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	17:34h	=	99	+/-	628	Bq/m ³
2	17:35h	=	86	+/-	712	Bq/m ³
3	17:36h	=	77	+/-	652	Bq/m ³
4	17:37h	=	81	+/-	672	Bq/m ³
5	17:38h	=	98	+/-	900	Bq/m ³
6	17:39h	=	65	+/-	596	Bq/m ³
7	17:40h	=	79	+/-	488	Bq/m ³
8	17:41h	=	98	+/-	1544	Bq/m ³
9	17:42h	=	70	+/-	624	Bq/m ³
10	17:43h	=	75	+/-	736	Bq/m ³
11	17:44h	=	80	+/-	664	Bq/m ³
12	17:45h	=	72	+/-	628	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 09:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 47 – Valores calculados de P do background da medida 09

P1	=	2,5356E-06
P2	=	1,9726E-06
P3	=	2,35237E-06
P4	=	2,21443E-06
P5	=	1,23457E-06
P6	=	2,81519E-06
P7	=	4,19914E-06
P8	=	4,19474E-07
P9	=	2,56821E-06
P10	=	1,84605E-06
P11	=	2,26811E-06
P12	=	2,5356E-06
Somatório P	=	2,69613E-05

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 79,38126085 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 79,38 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 192,5880107 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 192,59 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 09 é:

$$M \pm \sigma = 79,38 \pm 192,59 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 09:*

Tabela 48 – Medida de radônio no solo 09

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	17:50h	=	107520	+/-	3344	Bq/m ³
2	17:51h	=	127488	+/-	4048	Bq/m ³
3	17:52h	=	159744	+/-	5152	Bq/m ³
4	17:53h	=	137216	+/-	4608	Bq/m ³
5	17:54h	=	147456	+/-	5184	Bq/m ³
6	17:55h	=	149504	+/-	5248	Bq/m ³
7	17:56h	=	157696	+/-	5600	Bq/m ³
8	17:57h	=	153600	+/-	5440	Bq/m ³
9	17:58h	=	148480	+/-	5504	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 09:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 49 – Valores calculados de P para a medida 09 de radônio no solo

P1	=	8,94268E-08
P2	=	6,10266E-08
P3	=	3,76746E-08
P4	=	4,7095E-08
P5	=	3,72109E-08
P6	=	3,63088E-08
P7	=	3,18878E-08
P8	=	3,37911E-08
P9	=	3,30098E-08
Somatório P	=	4,07431E-07

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 137228,6864 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 137228,69 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 1566,652941 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 1566,65 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 09 é:

$$M \pm \sigma = 137228,69 \pm 1566,65 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se as equações para diferença do erro, obteve-se para medida 09:

$$M \pm \sigma = 137100 \pm 1600 \text{ Bq/m}^3$$

f) *Quantidade de ^{222}Rn e ^{220}Rn :*

A seguir, na tabela 50, apresentam-se as concentrações de radônio e torônio individualmente para a medida 09 e, em seguida, o gráfico 8 representando tais concentrações.

Tabela 50 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 09

Concentração da atividade ^{222}Rn e ^{220}Rn (Bq/m³)		
Média:	137100	1600
Concentração da atividade ^{220}Rn (Bq/m³)		
	47360,00	
	48640,00	
	52992,00	
Média:	49664,00	2952,34
Concentração da atividade ^{222}Rn (Bq/m³)		
^{222}Rn	87500	4600

Fonte: Autoria própria

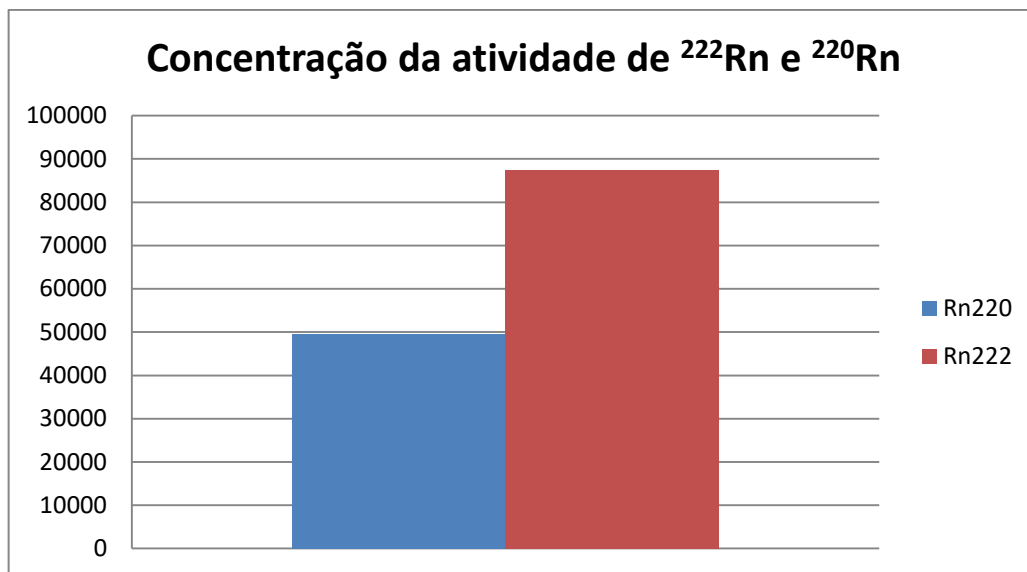


Gráfico 8: Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn
Fonte: Autoria própria

4.1.10 Resultado da Medida 10

A medida 10 foi realizada atrás do Bloco F da UTFPR, Campus Ecoville. Essa medida foi realizada nas coordenadas geográficas: $25^{\circ}26'36''\text{S}$ e $49^{\circ}21'16''\text{O}$, como mostrado na figura 33, a seguir.



Figura 33: Local da medida 10
Fonte: Google Earth Pro (2016)

As medidas realizadas pelo AlphaGUARD para este ponto e os resultados obtidos foram:

a) *Medidas de background 10:*

Tabela 51 – Medida de background 10

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	15:42h	=	1	+/-	91	Bq/m ³
2	15:43h	=	6	+/-	185	Bq/m ³
3	15:44h	=	2	+/-	141	Bq/m ³
4	15:45h	=	2	+/-	140	Bq/m ³
5	15:46h	=	4	+/-	179	Bq/m ³
6	15:47h	=	3	+/-	163	Bq/m ³
7	15:48h	=	2	+/-	142	Bq/m ³
8	15:49h	=	4	+/-	180	Bq/m ³
9	15:50h	=	3	+/-	163	Bq/m ³
10	15:51h	=	4	+/-	179	Bq/m ³
11	15:52h	=	5	+/-	195	Bq/m ³

b) *Cálculo da medida de background 10:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 52 – Valores calculados de P do background da medida 10

P1	=	0,000120758
P2	=	2,92184E-05
P3	=	5,02993E-05
P4	=	5,10204E-05
P5	=	3,121E-05
P6	=	3,76378E-05
P7	=	4,95933E-05
P8	=	3,08642E-05
P9	=	3,76378E-05
P10	=	3,121E-05
P11	=	2,62985E-05
Somatório P	=	0,000495748

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 2,679487837 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 2,68 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 44,91272715 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 44,91 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para o background 10 é:

$$M \pm \sigma = 2,68 \pm 44,91 \text{ Bq/m}^3$$

c) *Medida de radônio no solo 10:*

Tabela 53 – Medida de radônio no solo 10

Medidas	Horário	=	Valor	+/-	Erro	Unidade
1	16:00h	=	120832	+/-	3840	Bq/m ³
2	16:01h	=	141312	+/-	4512	Bq/m ³
3	16:02h	=	138240	+/-	4704	Bq/m ³
4	16:03h	=	140288	+/-	4768	Bq/m ³
5	16:04h	=	146432	+/-	5024	Bq/m ³
6	16:05h	=	147456	+/-	5120	Bq/m ³
7	16:06h	=	152576	+/-	5472	Bq/m ³

d) *Cálculo da medida de radônio no solo 10:*

Aplicando-se a equação 11, tem-se:

Tabela 54 – Valores calculados de P para a medida 10 de radônio no solo

P1	=	6,78168E-08
P2	=	4,91204E-08
P3	=	4,51924E-08
P4	=	4,39873E-08
P5	=	3,96187E-08
P6	=	3,8147E-08
P7	=	3,3397E-08
Somatório P	=	3,1728E-07

Aplicando-se a equação 10 para o cálculo da média, tem-se que:

$$M = 138918,6674 \text{ Bq/m}^3$$

$$M = 138918,67 \text{ Bq/m}^3$$

Aplicando-se a equação 12 para o cálculo do erro, tem-se:

$$\sigma = 1775,329048 \text{ Bq/m}^3$$

$$\sigma = 1775,33 \text{ Bq/m}^3$$

O valor final para a medida de radônio no solo 10 é:

$$M \pm \sigma = 138918,67 \pm 1775,33 \text{ Bq/m}^3$$

e) *Cálculo da diferença entre as medidas:*

Calculando-se a diferença da medida de radônio no solo e a medida de background e aplicando-se as equações para diferença do erro, obteve-se para medida 10:

$$M \pm \sigma = 139000 \pm 2000 \text{ Bq/m}^3$$

f) *Quantidade de ^{222}Rn e ^{220}Rn :*

A seguir, na tabela 55, apresentam-se as concentrações de radônio e torônio individualmente para a medida 10 e, em seguida, o gráfico 9 representando tais concentrações.

Tabela 55 – Concentrações individuais de radônio e torônio na medida 10

Concentração da atividade ^{222}Rn e ^{220}Rn (Bq/m ³)		Erros
Média:	139000	2000
Concentração da atividade ^{220}Rn (Bq/m ³)		
	73728,00	
	78336,00	
	90624,00	
Média:	80896,00	8734,07
Concentração da atividade ^{222}Rn (Bq/m ³)		
^{222}Rn	58000	11000

Fonte: Autoria própria

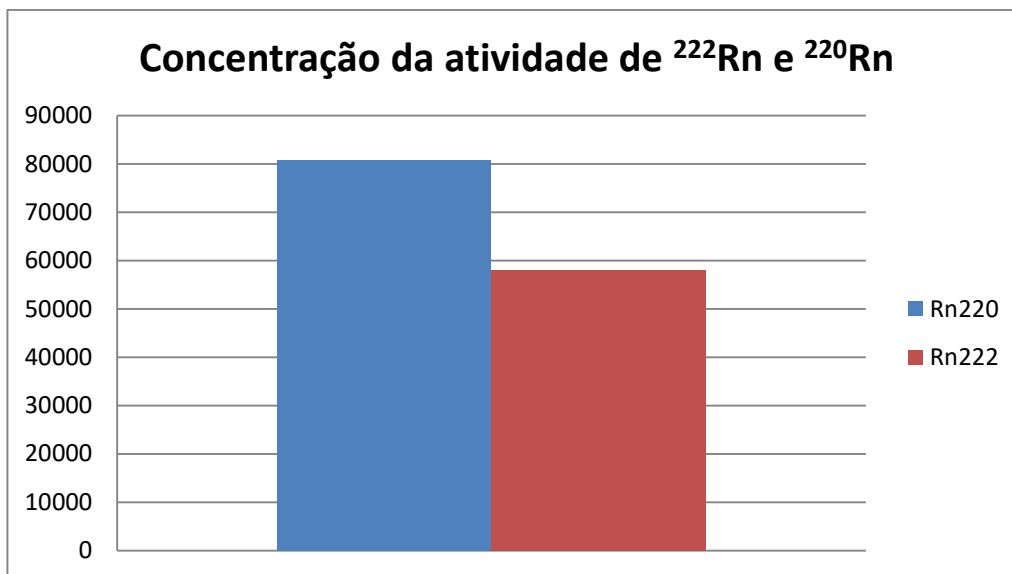


Gráfico 9: Concentração da atividade de ^{222}Rn e ^{220}Rn
Fonte: Autoria própria

4.2 CÁLCULO DA MÉDIA DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NO CAMPUS ECOVILLE DA UTFPR

Na tabela 56, observam-se as medidas obtidas através do cálculo da concentração de radônio para cada um dos dez pontos estudados.

Tabela 56 – Valores calculados para as concentrações de radônio em cada um dos dez pontos medidos

MEDIDAS	=	CONCENTRAÇÃO	+/-	ERRO
Medida 01	=	14300	+/-	6200
Medida 02	=	72000	+/-	12000
Medida 03	=	22000	+/-	11000
Medida 04	=	11900	+/-	9100
Medida 05	=	17000	+/-	3000
Medida 06 ¹	=	-	+/-	-
Medida 07	=	55500	+/-	5000
Medida 08	=	78200	+/-	9400
Medida 09	=	87500	+/-	4600
Medida 10	=	58000	+/-	11000

Fonte: Autoria própria.

¹ Dado espúrio que foi desconsiderado para o cálculo da média da concentração de radônio.

Para a realização do cálculo da média da concentração de radônio no Campus Ecoville, fez-se uma média aritmética das concentrações dos pontos. Utilizou-se para isto apenas as concentrações de radônio encontradas, excluindo-se as concentrações de torônio e aplicando-se a equação 14. Porém, excluiu-se o valor da medida 06 que, anteriormente, foi classificado como dado espúrio.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (14)$$

Aplicando-se a equação 14, obtém-se para a concentração de radônio:

$$M = \frac{416400}{9}$$

$$M = 46266,67 \text{ Bq/m}^3$$

Quanto ao erro, foi atribuído o maior dentre os erros das dez medidas calculadas, a fim de se obter um valor superestimado. O maior valor para o erro corresponde ao da medida 02, que vale 12000 Bq/m³.

Sendo assim, tem-se que a concentração de radônio média para o Campus Ecoville da UTFPR é de:

$$\mathbf{M \pm \sigma = (46000 \pm 12000) \text{ Bq/m}^3}$$

4.3 RESULTADOS PARA A GRANULOMETRIA

4.3.1 Resultados para o Ensaio de Peneiramento Grosso

Na tabela 57, apresentam-se os resultados obtidos para o peneiramento grosso.

Tabela 57 – Apresentação dos dados coletados e dos resultados do peneiramento grosso

PENEIRAMENTO GROSSO					
Peneira (nº)	Material retido			% passante da amostra total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra total	% acumulada		
1.1/2 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	38,10
1 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	25,40
3/4 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	19,10
3/8 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	9,50
4	0,00	0,00	0,00	100,00	4,80
8	0,00	0,00	0,00	100,00	2,36
10	0,93	0,19	0,19	99,81	2,00

Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Resultados para o Ensaio de Peneiramento Fino

A seguir, na tabela 58, apresentam-se os resultados obtidos para o ensaio de peneiramento fino.

Tabela 58 – Apresentação dos dados coletados e dos resultados do peneiramento fino

PENEIRAMENTO FINO						
Amostra (g):	90,00				Amostra parcial seca (g):	90,00
Peneira (nº)	Material retido			% passa amost. parc.	% passa amost. total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra parcial	% acumulada			
16	0,49	0,54	0,54	99,46	99,27	1,20
30	3,13	2,93	3,48	96,52	96,34	0,60
40	5,02	2,10	5,58	94,42	94,25	0,42
50	9,33	4,79	10,37	89,63	89,47	0,25
100	18,97	10,71	21,08	78,92	78,78	0,15
200	29,5	11,70	32,78	67,22	67,10	0,074

Fonte: Autoria própria

4.3.3 Resultados para o Ensaio de Sedimentação

Na tabela 59, apresentam-se os resultados obtidos para o ensaio de sedimentação.

Tabela 59 – Apresentação dos dados coletados e dos resultados ensaio de sedimentação

SEDIMENTAÇÃO								
Massa específica real (g/cm ³):		2,751						
Seção da proveta (cm ²):		27,43						
Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura °C	Leitura em Meio Dispensor	Leitura Corrigida	Viscosidade (g.s/cm ²)	Altura de queda (cm)	Diâmetro (mm)	% Amostra Total
0,5	1,0340	25,4	0,9943	0,0397	9,13E-06	10,52	0,0573	69,05
1	1,0320	25,4	0,9943	0,0377	9,13E-06	10,91	0,0412	65,57
2	1,0302	25,4	0,9943	0,0359	9,13E-06	11,27	0,0296	62,44
4	1,0288	25,1	0,9944	0,0344	9,13E-06	11,54	0,0212	59,90
8	1,0280	23,9	0,9946	0,0334	9,56E-06	11,70	0,0155	58,13
15	1,0270	23,5	0,9946	0,0324	9,56E-06	11,90	0,0114	56,26
30	1,0264	22,5	0,9948	0,0316	9,80E-06	12,02	0,0082	54,93
60	1,0250	21,3	0,9950	0,0300	1,00E-05	12,29	0,0059	52,16
123	1,0240	21,3	0,9950	0,0290	1,00E-05	12,49	0,0042	50,42
232	1,0228	20,9	0,9951	0,0277	1,00E-05	12,73	0,0031	48,23
1405	1,0190	19,8	0,9952	0,0238	1,05E-05	13,48	0,0013	41,34

Fonte: Autoria própria

4.3.4 Apresentação da Curva Granulométrica Obtida

A seguir, no gráfico 10, apresenta-se a curva granulométrica obtida para o solo da Sede Ecoville da UTFPR.

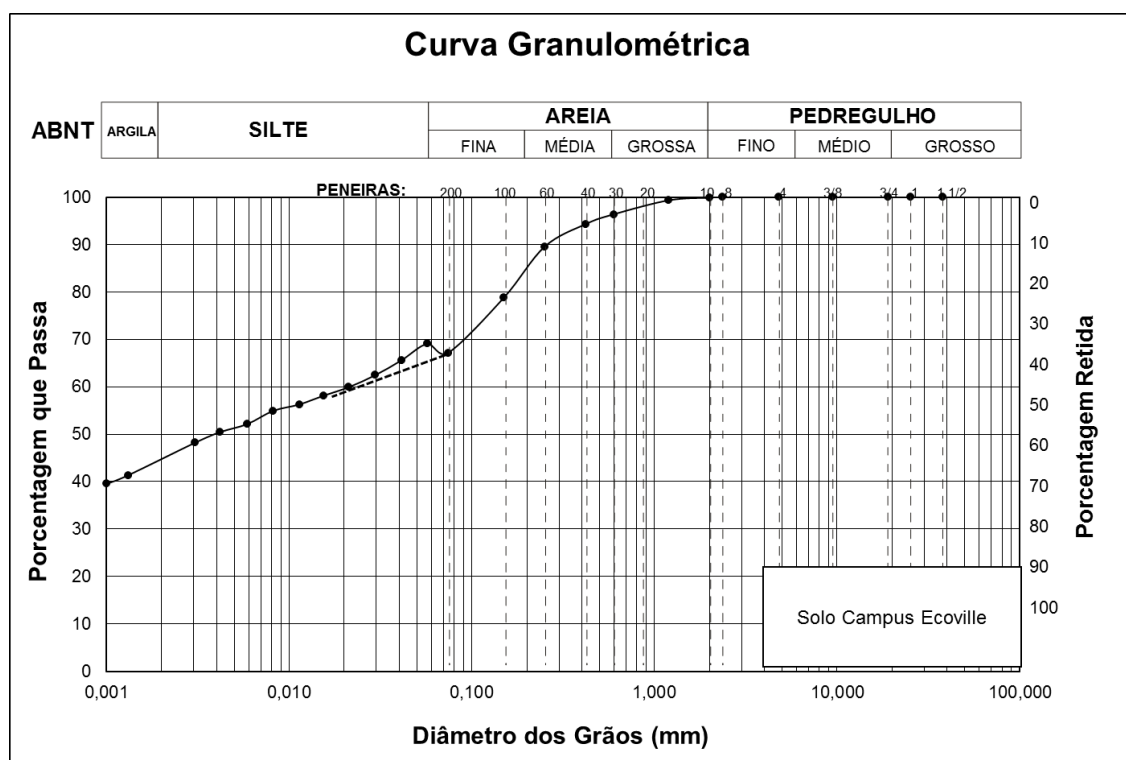


Gráfico 10 – Curva granulométrica do solo próximo ao local da medida 02

Fonte: Autoria própria

Observa-se, no gráfico 10, o resultado final obtido nos ensaios de granulometria.

De acordo com Pinto (2012), o solo pode ser considerado uma argila-siltosa. Porém, o solo também possui quantidade considerável de areia.

Na tabela 60, apresenta-se, em porcentagem, a composição do solo.

Tabela 60 – Composição do solo da Sede Ecoville da UTFPR

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%) (ESCALA ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
45	24	16	12	3	0

Fonte: Autoria própria

4.4 RESULTADOS PARA O ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Na tabela 61, apresentam-se os resultados obtidos para o ensaio de determinação da massa específica dos grãos.

Tabela 61 – Apresentação dos dados coletados e dos resultados do ensaio da massa específica dos grãos

MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS			
Temperatura (°C)		23,5	
Picnômetro (nº)	33	32	10
Picnômetro (g)	24,52	24,90	24,57
Pic + Solo Seco (g)	34,20	34,05	34,34
Pic + Água (g)	74,22	74,56	74,17
Pic + Solo + Água (g)	80,35	80,37	80,46
Solo Seco (g)	9,68	9,15	9,77
Fator de Correção (K)		0,9976	
Densidade Real (Gs)	2,720	2,733	2,801
Média		2,751	

Fonte: Autoria própria

4.5 RESULTADOS PARA O ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Na realização dos ensaios de permeabilidade, foram utilizados dois corpos de prova.

Os dados e resultados, apresentados nas tabelas 62 e 63, referem-se ao corpo de prova indeformado. Este corpo de prova foi recoberto lateralmente por uma leve camada de parafina e argila de baixa permeabilidade, evitando, deste modo, a formação de um caminho preferencial na parede do permeâmetro.

Tabela 62 – Dados utilizados nos cálculos da permeabilidade do corpo de prova indeformado

A – Área transversal corpo de prova (cm ²)	19,2442185
L – comprimento da amostra na direção do fluxo (cm)	9
a – Área transvesal do piezômetro (cm ²)	0,196349541
Diâmetro piezometro (cm)	0,5
Temperatura da água no momento do ensaio (°C)	23

Fonte: Autoria própria

Tabela 63 – Dados e resultado obtido no ensaio de permeabilidade do corpo de prova indeformado

h₁ (cm)	h₂ (cm)	t (s)	K (cm/s)
75,4	65,4	44,1	2,96E-04
65,4	55,4	53,3	2,86E-04
55,4	45,4	63,4	2,88E-04
35,4	30,4	49,1	2,85E-04
30,4	25,4	59	2,80E-04
15,4	9,4	152,8	2,97E-04
85,4	75,4	37,9	3,02E-04
75,4	65,4	45,6	2,87E-04
65,4	55,4	54,3	2,81E-04
35,4	30,4	50,1	2,79E-04
25,4	20,4	71,7	2,81E-04
20,4	15,4	90,6	2,85E-04
75,4	65,4	44,7	2,92E-04
65,4	55,4	52,2	2,92E-04
55,4	45,4	63,3	2,89E-04
45,4	35,4	81,3	2,81E-04
35,4	25,4	106,4	2,87E-04
25,4	15,4	157,4	2,92E-04
		Média	2,88E-04
		Kc	2,87E-04

Fonte: Autoria própria

Nas tabelas 64 e 65, apresentam-se os dados e resultados obtidos para o corpo de prova compactado. Como o objetivo é apenas demonstrar que a compactação influencia na permeabilidade, não mediu-se a energia de compactação.

Tabela 64 - Dados utilizados nos cálculos da permeabilidade do corpo de prova compactado

A - Área transversal corpo de prova (cm ²)	19,48
L – comprimento da amostra na direção do fluxo (cm)	9,00
a - Área transvesal do piezômetro (cm ²)	0,40
Diâmetro piezometro (cm)	0,71
Temperatura da água no momento do ensaio (°C)	23

Fonte: Autoria própria

Tabela 65 – Dados e resultado obtido no ensaio de permeabilidade do corpo de prova compactado

h₁ (cm)	h₂ (cm)	t (s)	K (cm/s)
85,5	79,5	180	7,4E-05
67,5	64,5	116,2	7,16E-05
47	42	364,1	5,65E-05
42	35,5	546,9	5,62E-05
35,5	31,2	392,9	6,01E-05
31,2	28	331,1	5,98E-05
28	24,2	409,8	6,51E-05
24,2	21,9	272	6,72E-05
21,9	17,12	610	7,39E-05
17,12	14,49	450,2	6,78E-05
14,49	11,45	503,9	8,55E-05
85,5	80,5	219,4	5,02E-05
75,5	68,15	330,1	5,68E-05
68,15	62,5	301	5,26E-05
Média			6,41E-05
Kc			6,40E-05

Fonte: Autoria própria

A permeabilidade do corpo de prova indeformado é de $2,87 \times 10^{-4}$ cm/s. Já a permeabilidade do corpo de prova compactado é de $6,40 \times 10^{-5}$ cm/s.

5 CONCLUSÕES

A presença de 31% de areia na composição do solo justifica o valor da permeabilidade, $2,87 \times 10^{-4}$ cm/s, encontrados.

Este valor de permeabilidade pode ser considerado de médio a alto, o que irá requerer cuidados na implantação de novas edificações próximas ao local.

Outros fatores que podem ter influenciado o valor encontrado são a compactação do solo e a presença de material orgânico, sendo que esta presença pôde ser constatada por meio visual, como a coloração escura que o solo apresentava.

Quanto à concentração de radônio presente no solo, (46000 ± 12000) Bq/m³, verificou-se que, em comparação com outros dados referentes à região de Curitiba, o valor médio encontrado é bastante elevado, sendo, inclusive, superior a todas as outras concentrações.

Tal fato se deve a, principalmente, dois fatores: a permeabilidade alta do solo e a formação rochosa de Curitiba, já que grande parte da formação Guabirota é constituída de rochas graníticas, ricas em urânio. Desta forma, as concentrações encontradas no Campus Ecoville são justificáveis.

Comparando-se o radônio com o torônio, nas medições realizadas, tem-se que, para as medidas 02, 05, 07 e 09, há uma maior quantidade de radônio (²²²Rn). Já para as medidas 01, 03, 04, 08 e 10, há uma maior quantidade de torônio (²²⁰Rn).

Por fim, quanto a medida 06, que foi considerada espúria por apresentar um valor negativo de concentração, acredita-se que as prováveis causas desta anormalidade podem ter sido a falta de fluxo de ar e a obstrução da ponta da sonda por solo úmido.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508:1984 : Grãos de solo que passam pela peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181:1984 : Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217:1987 : Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

AFONSO, Júlio Carlos. Química nova na escola. Volume 32, nº4. São Paulo, 2009. p. 269.

AlphaGUARD - Environmental Radiation Monitoring Systems. 2016. <http://www.saphymo.com/radiation-measurement/environmental-radiation-monitoring-systems/alphaguard/154.html>

AMERICAN CANCER SOCIETY. **Radon and Cancer.** 2015. <http://www.cancer.org/cancer/cancercauses/othercarcinogens/pollution/radon>

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry – US Department of Health and Human Services. **Radon Toxicity.** ATSDR Publication No.: ATSDR-HE-CS-2001-0006. Washington D.C., 2000.

BUSHONG, Stewart C. **Radiologic Science for Technologists: physics, biology and protection.** 7 ed. Mosby, Elsevier, 2001.

CCNR - The Canadian Coalition for Nuclear Responsibility http://www.ccnr.org/decay_U238.html . Acessado em 30 de julho de 2016

CORRÊA, J. N. **Avaliação da concentração de radônio em ambientes de convívio humano na região metropolitana de Curitiba.** Curitiba, 2006.

CRAIG, Roberto F. **Mecânica dos solos.** 7ª edição. 2012. Editora LTC. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CRAMERI, Reto; BURKART, Werner. **The radon problem, International Journal of Radiation Applications and Instrumentation,** Part C. Radiation Physics and Chemistry, Volume 34, Issue 2, 1998, Pages 251-259, ISSN 1359-0197, [http://dx.doi.org/10.1016/1359-0197\(89\)90233-6](http://dx.doi.org/10.1016/1359-0197(89)90233-6)

DAS, Braja M., Fundamentos de Engenharia Geotécnica, 7º Ed. Cengage learning, SP, 2011.

DEL CLARO, F. Avaliação da concentração de radônio-222 no ar de postos de trabalho de Curitiba/PR. 2013. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNIT. Solos – Determinação da densidade real. 1994. <<http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNER-ME093-94.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2015.

EPA – United State Environmental Protection Agency. **A Citizen's Guide to Radon - The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon,** 2012. https://www.epa.gov/sites/production/files/201602/documents/2012_a_citizens_guide_to_radon.pdf

EPA – United State Environmental Protection Agency. **Consumer's Guide to Radon Reduction: How to Fix Your Home,** 2013. https://www.epa.gov/sites/production/files/201602/documents/2013_consumers_guide_to_radon_reduction.pdf

EPA – US Environmental Protection Agency. **Radiation Health Effects**. 2006.
<https://www.epa.gov/radiation/radiation-health-effects>

FELIPE, Rogério da Silva. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba**. Curitiba : MINEROPAR, 2011 (1ª Edição).

FIELD, R. W. ; STECK, D. J. ; SMITH, B. J. *et al.* **Residential radon gas exposure and lung cancer: the Iowa Radon Lung Cancer Study**. American Journal of Epidemiology, Oxford Journals, 2000.

GREAVES, M. **Cancer: the Evolutionary Legacy**. New York, NY: Oxford University Press, 2000, p. 196–197.

<http://query.nytimes.com/gst/abstract.html?res=980CE7D61639E23ABC4B53DFB767838B659EDE>

MÄKELÄINEN, I.; ARVELA, H.; VOUTILAINEN, A. Correlations between radon concentration and indoor gamma dose rate, soil permeability and dwelling substructure and ventilation, **Science of The Total Environment**, Volume 272, Issues 1–3, 14 May 2001, Páginas 283-289, ISSN 0048-9697, <http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697>

MINEROPAR. **Geologia do Paraná - Geologia do Escudo**.
<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=23>

OKUNO, Emico. **Radiação: efeitos, riscos e benefícios**. 2ª edição, São Paulo, Editora Harbra, 1998, p. 12 a 15.

PASCHUK, Sergei Anatolyevich ; CORRÊA, Janine Nicolosi ; SCHELIN, Hugo Reuters ; BARBOSA, L. ; SADULA, T. ; MATSUZAKI, C.A. . **Radon in Soil Gas Survey in Curitiba (Brazil)**. In: 4th International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009, 2009, Rio de Janeiro. Innovations in Nuclear Technology for a Sustainable Future. Proceedings of 4th International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009. Rio de Janeiro : Brazilian Association for Nuclear Energy - ABEN, 2009. v. 1. p. 7-10.

PETTA, R. A. e CAMPOS, T. F. C. **O gás radônio e suas implicações para a saúde pública.** Revista de Geologia, Vol. 26, nº 2, 2013. www.revistadegeologia.ufc.br

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3ª edição, São Paulo, Oficina de Textos, 2006.

SCHMID, DREXLER e KUWERT. **Radon in Indoor Spaces: An Underestimated Risk Factor for Lung Cancer in Environmental Medicine.** 2010. Institut für Arbeits, Sozial und Umweltmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg e Klinische Nuklearmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg.

SPIRO, Thomas G. e STIGLIANI, William M. **Química Ambiental.** 2ª edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2009, p. 35 a 39.

TAUHATA, L., SALATI, I.P.A., PRINZIO, R.Di., PRINZIO, A.R.Di. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** Rio de Janeiro, 2003. 5ª revisão, IRD/CNEN.

THE NEW YORK TIMES - **Dr. R.B. Owens Dies: Noted Engineer, 70; Leader in the Electrical Field Was Secretary of Franklin Institute, 1910 to 1924; A Major in World War; Director A.E.F. Telephone Communication in Europe; Discovered Alpha Ray.** Novembro, 1940.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Vol I, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, anexo A, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, anexo B, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, anexo E, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Effects of Ionizing Radiation**, anexo E, 2006. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

USBERCO, João e SALVADOR, Edgard. **Química: volume único**. 7 ed. São Paulo, Saraiva, 2006.

WHO – World Health Organization. **Radon and Health**. 2014.
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/>