

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

SILVIA GALLO BELLINELO DA PALMA

**ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO EM AMBIENTES
RESIDENCIAIS DE CARAMBEÍ E CURITIBA/PR**

CURITIBA

2021

SILVIA GALLO BELLINELO DA PALMA

**ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO EM AMBIENTES
RESIDENCIAIS DE CARAMBEÍ E CURITIBA/PR**

**ANALYSIS OF RADONIUM CONCENTRATIONS IN RESIDENTIAL
ENVIRONMENTS IN CARAMBEÍ AND CURITIBA/PR**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do título de “Mestre em Ciência” – Área de Concentração: Engenharia Biomédica
Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk.
Coorientadora: Prof. Dra. Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA

2021



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



SILVIA GALLO BELLINELO DA PALMA

ANÁLISE DAS CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO EM AMBIENTES RESIDENCIAIS DE CARAMBÉI E CURITIBA/PR

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Engenharia Biomédica.

Data de aprovação: 26 de Agosto de 2021

Prof Sergei Anatolyevich Paschuk, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Hugo Reuters Schelin, Doutorado - Instituto de Pesquisa Pele Pequeno Principe - Ipppp

Prof.a Janine Nicolosi Correa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Oderson Antonio De Souza Filho, Doutorado - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Cprm

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 26/08/2021.

AGRADECIMENTOS

À UTFPR, pela pós-graduação de elevada qualidade;

Ao CPGEI, pelo curso ofertado e pelo apoio a este trabalho;

Ao meu Orientador Professor Sergei Paschuk, pelo incentivo e suporte;

À Professora Janine Corrêa, pela coorientação, paciência e tempo investido na correção do trabalho;

Aos meus amigos do laboratório pela amizade e por todas as contribuições, em especial para Aline Martin, Amanda Malagi, Monique Oliveira, Catarina Montenegro e Danielle Narloch por todo apoio e incentivo;

Aos Srs. Allan Cesar Assis e Adriana Fernandes, funcionários da Vigilância Sanitária do Município de Carambeí, que possibilitaram o acesso a comunidade local;

Ao Sr. Francesco Antonelli e a Yasmin Latchuc dos Santos, Departamento Geologia, UFPR, pela parceria;

À minha mãe, meus irmãos e minha amiga Loraci Liane Setragni pelo que sou e por todo incentivo;

Ao meu esposo e filha por todo suporte, carinho e compreensão principalmente nos momentos mais difíceis;

E a Deus, pela vida

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Pintou estrelas no muro e teve o céu ao alcance da mão”

(Helena Kolody).

RESUMO

PALMA, S. G. B. **Análise das Concentrações de Radônio em Ambientes Residenciais de Carambeí e Curitiba / PR**. 2021. 80f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

As concentrações de gás radônio em ambientes internos representam uma grande fonte de exposição do ser humano a radioatividade natural. O radônio pertence as famílias radioativas do urânio (^{235}U e ^{238}U) e tório (^{232}Th). O solo onde se edifica a residência e os materiais utilizados na construção podem conter elementos como urânio e tório, e o gás radônio, produto do decaimento desses elementos, consegue penetrar em construções através de fissuras e rachaduras possibilitando sua inalação pelos seres vivos. A exposição do ser humano à radiação natural e seus possíveis malefícios a saúde, como por exemplo o câncer no pulmão, onde o gás radônio é considerado a segunda maior causa, é uma preocupação crescente das comunidades científicas e órgãos governamentais. Este trabalho teve como objetivo analisar as concentrações de gás radônio nas residências no municípios de Carambeí e Curitiba, ambas cidades do estado do Paraná, e também comparar às recomendações feitas pelo ICRP e propor ações mitigatórias, com vistas a menor exposição e menor risco à saúde da população. Para as medições foram utilizados detectores passivos do estado sólido CR-39, instalados na residências por um período mínimo de 90 dias. Foram utilizados detectores de background para controle. Após a retirada dos detectores um tratamento químico foi realizado e a leitura manual dos traços nucleares foi realizada através de um microscópio óptico. Com base na metodologia desenvolvida pelo trabalho em conjunto da UTFPR com CDTN/CNEN, os traços foram contabilizados e as concentrações médias foram calculadas. Os resultados demonstraram que em Carambeí cerca de 97% dos locais apresentaram concentrações que variaram de $95\pm 15\text{ Bq/m}^3$ a $171\pm 25\text{ Bq/m}^3$, dentro das recomendações. Nesta região, apenas um local apresentou concentração que sugere atenção de $461\pm 65\text{ Bq/m}^3$, gerando necessidade de ações mitigatórias. As câmaras instaladas nas residências no bairro de Santa Felicidade em Curitiba – PR, apresentaram um resultado final com concentrações que variaram de $87\pm 14\text{ Bq/m}^3$ a $143\pm 22\text{ Bq/m}^3$, todos os valores abaixo do limite recomendados pelas agências reguladoras e compatíveis com dados médios mundiais. Diante desses resultados o fato de um local extrapolar os níveis de segurança recomendados enfatiza a importância do mapeamento das concentrações de radônio e a necessidade de estruturação de uma política nacional que estabeleça limites de exposição em ambientes internos no Brasil.

Palavras chaves: Radioatividade natural; Radônio; Ambientes Internos.

ABSTRACT

PALMA, S. G. B. **Analysis of Radon Concentrations in Indoor Environments in Carambeí and Curitiba / PR.** 2021. 77f. Dissertation – Pósgraduate Program in Electrical Engineering and Industrial Informatics, Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2021.

Indoor radon gas concentrations represent a major source of human exposure to natural radioactivity. Radon is part of the radioactive families of uranium (^{235}U and ^{238}U) and thorium (^{232}Th). The soil where the residence is built and the materials used in the construction may contain elements such as uranium and thorium, and the radon gas, a product of the decay of these elements, manages to penetrate buildings through fissures and cracks, enabling them to be inhaled by living beings. The exposure of human beings to natural radiation and its possible harm to health, such as lung cancer, where radon gas is considered the second largest cause, is a growing concern of scientific communities and government agencies. This work aims to analyze the indoor radon gas concentrations in the municipalities of Carambeí and Curitiba, both cities in the state of Paraná, Brazil, compare it to the recommendations made by the ICRP and propose mitigating actions, with a view to lower exposure and risk to the health of the population. For the measurements, CR-39 solid state passive detectors were used, installed in homes for a minimum period of 90 days. Background detectors were used for control. After removing the detectors, a chemical treatment was performed and the manual contabilization of the nuclear tracks was performed using an optical microscope. Based on the methodology developed by the collaboration work of UTFPR and CDTN/CNEN, the tracks were counted and the average concentrations were calculated. The results showed that in Carambeí about 97% of the places had concentrations ranging from $95\pm 15\text{ Bq/m}^3$ to $171\pm 25\text{ Bq/m}^3$, within the recommendations. In this region, only one location showed $461\pm 65\text{ Bq/m}^3$ as concentration what suggests attention, generating the need for mitigating actions. The indoor cameras installed in the Santa Felicidade neighborhood in Curitiba – PR, presented a final result with concentrations ranging from $87\pm 14\text{ Bq/m}^3$ to $143\pm 22\text{ Bq/m}^3$, all values below the limit recommended by regulatory agencies and compatible with world average data. Given these results the fact that one site exceeds the recommended safety levels emphasizes the importance of mapping radon concentrations and the need to structure a national policy that establishes exposure limits in indoor environments in Brazil.

Key words: Natural radioactivity; Radon; Indoor Environments.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Séries radioativas naturais: ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th	24
Figura 2- Características do elemento químico ^{222}Rn	26
Figura 3- Ilustração dos processos de emanação e exalação do radônio	30
Figura 4- Concentração média de ^{222}Rn em relação a latitude	31
Figura 5- Caminhos possíveis para a entrada do ^{222}Rn em ambientes fechados	32
Figura 6- Mapa Europeu de Radônio em Ambiente Interno – 35 Países Europeus	36
Figura 7- Gráfico que indica a distribuição da exposição do ser humano a radiação natural.....	41
Figura 8- Localizações e Unidades Geológicas dos Granitos de Serra de Carambeí e de Joaquim Murtinho.....	45
Figura 9- Elementos que fazem parte do conjunto de detecção de radônio utilizado nesta pesquisa.....	49
Figura 10- Detector CR-39.....	51
Figura 11- Câmara de difusão aberta, filtro de papel GF 52°C e detector CR-39.....	52
Figura 12- Câmara de difusão montada e identificada através de numeração	52
Figura 13- Câmara de detecção montada e instalada	54
Figura 14- Mapa contendo a indicação dos pontos onde foram instalados os detectores n município de Carambeí - PR	55
Figura 15- Mapa com a marcação dos pontos de instalação no bairro de Santa Felicidade – Curitiba -PR	56
Figura 16- Processo de leitura no microscópio óptico (LFNA)	57
Figura 17- Visualização de 1mm^2 do detector CR-39 com a grade.....	58
Figura 18- Concentrações médias de Carambeí	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Unidades mais comuns relativas à radiação	25
Tabela 2- Meia-vida e emissões do ²²²Rn e filhos	27
Tabela 3- Concentração de U em rochas	28
Tabela 4- Resumo do relatório apresentado baseado em dados do Centro Comum de Pesquisa da Comissão Europeia	34
Tabela 5- Concentrações de gás radônio no Brasil.....	37
Tabela 6- Números de traços lidos nos detectores CR-39 do município de Carambeí	59
Tabela 7- Concentração de gás radônio em ambientes residenciais no Município de Carambeí	61
Tabela 8- Números de traços lidos nos detectores CR-39 em Curitiba - PR	63
Tabela 9- Concentração de ²²²Rn em ambientes residenciais em Curitiba - PR	64
Tabela 10- Concentrações médias de Curitiba	65

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	19
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1	Famílias radioativas ou séries radioativas.....	23
2.2	Gás Radônio	25
2.3	Radônio no Solo e na Água	27
2.4	Radônio em Ambientes Residenciais	30
2.5	Efeitos Biológicos	39
2.6	Normas Internacionais e Nacionais.....	43
3.	.MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Planejamento e Delimitação Geográfica e Temporal	45
3.2	Sistema de Detectores	47
3.3	Instalação e Retirada dos Detectores	53
3.4	Revelação e Leitura dos Detectores.....	57
4.	RESULTADOS E ANÁLISES.....	59
4.1	Medições <i>Indoor</i>	59
4.1.1	Concentração de Radônio nas Residências na Região de Carambeí- PR	59
4.1.2	Concentrações de Radônio nas Residências na Região de Curitiba - PR.....	62
4.2	Orientações para ações mitigatórias	65
5.	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS.....	69
	APÊNDICE A – PARECER DAS MEDIDAS DE RADÔNIO EM RESIDÊNCIA (NORMAL).....	77
	APÊNDICE B – PARECER DAS MEDIDAS DE RADÔNIO EM RESIDÊNCIA (ATENÇÃO)	13

1 INTRODUÇÃO

Os seres humanos vivem e evoluem expostos às radiações presentes naturalmente na crosta terrestre, conhecidas como radiações naturais. Através do desenvolvimento da ciência e da tecnologia surgem e passam a fazer parte do convívio humano também as radiações artificiais. Essas radiações ionizantes, naturais e artificiais, são objeto de análise pela instituição *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) desde sua criação em 1955. O comitê analisa as fontes de radiações ionizantes e seus efeitos na natureza, avalia exposições globais e regionais e também ressalta evidências de efeitos na saúde humana decorrentes da exposição às radiações ionizantes (UNSCEAR, 2018; MEREDITH, 1967).

A partir do desenvolvimento tecnológico, a radiação artificial passa a contribuir com parcelas cada vez maiores de exposição humana às radiações ionizantes, principalmente pelo uso das radiações na área médica, em procedimentos terapêuticos e diagnósticos. A exposição também aumenta com o uso das radiações na área industrial, inclusive na geração de energia, em eventos não planejados (acidentes nucleares e radiológicos), além de radiação relativa a explosões de artefatos nucleares e na pesquisa (UNEP, 2016).

A UNEP (2016) também chama a atenção para o fato de que, apesar do aumento da exposição dos seres humanos à radiação artificial advindo de novas tecnologias, a contribuição das radiações naturais na dose nos seres humanos é de suma importância, considerando que 80% da exposição se deve às fontes naturais e 20% às fontes artificiais, criadas pelo homem. Em documento mais recente, a UNSCEAR (2018) corrobora os valores mencionados, e coloca que a relação entre a dose advinda de fontes naturais é cerca de 4 vezes maior que às artificiais.

Os elementos responsáveis pela radioatividade natural podem ser divididos em duas categorias segundo a sua origem: os primordiais e os cosmogênicos. Os elementos radioativos primordiais estão na Terra desde sua formação. Os elementos radioativos cosmogênicos são resultados da interação de raios cósmicos com núcleos estáveis presentes na atmosfera (EISENBUD e GESSEL, 1997). Portanto, são gerados constantemente. Em ambos os casos, independentemente da origem, são elementos instáveis e tendem a uma maior estabilidade por meio de

fenômenos nucleares. Estes fenômenos nucleares provocam emissão de radiação ionizante que podem pôr em risco a saúde humana (UNSCEAR, 2018).

As radiações naturais são advindas principalmente das emissões das séries radioativas naturais (famílias radioativas) representadas pelos elementos geradores ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U , além do ^{40}K ao qual não se associa uma série (família). O ^{40}K é o único radioisótopo do potássio de ocorrência natural e corresponde cerca de 0,01% do potássio encontrado no planeta (VASCONCELOS, 2010).

Tanto os radionuclídeos pais das séries radioativas quanto o potássio tem meia-vida longa e em conjunto com seus filhos são responsáveis por aproximadamente 80% da radiação natural na crosta terrestre (INIS, 2018; IAEA, 2020). Essa característica (meia-vida longa) justifica que sejam estes os elementos pais, remanescentes na crosta terrestre hoje.

A influência dos radioisótopos na saúde humana está relacionada às radiações emitidas pelos elementos em seu decaimento. O fato do solo da Terra conter urânio e tório explica a contribuição. Ressalta-se que o decaimento natural do urânio e do tório gera o elemento químico rádio, que por sua vez, ao decair, gera o radônio, o único gás das séries radioativas naturais (EISENBUND e GESSEL, 1997; TAYLOR *et al.*, 1997; WHO, 2009).

O gás radônio, parte das três séries radioativas naturais (^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U), destaca-se por ser reconhecido como um possível agente etiológico de câncer no pulmão (EISENBUD E GESSEL, 1997) e pelo fato de ser responsável por mais de 50% da exposição à radiação natural que a população está exposta (UNEP, 2016). É um gás caracterizado como nobre, inodoro, sem cor e sem sabor e considerado um poluente onipresente no ar, devido à radiação emitida e à mobilidade relacionada ao fato de ser um gás.

Outro fato de atenção é que o gás radônio tem aproximadamente oito vezes o peso do ar permitindo concentração nos ambientes com maiores valores em alturas próximas ao solo, propiciando desta forma, maior taxa de inalação pelo ser humano (HOPKE *et al.*, 2000). O radônio busca sua estabilidade por meio de emissão de partícula alfa. Os filhos deste radioisótopo também são alfa emissores e por serem metais, se associam a partículas e podem ser inalados ou ingeridos tornando-se

uma preocupação como fator de risco à saúde humana (EISENBUND e GESSEL, 1997; TAYLOR *et al.*, 1997; WHO, 2009).

A exposição à radiação natural em ambientes fechados é devida principalmente à inalação de gás radônio. A concentração do gás na atmosfera em ambientes internos é consequência das concentrações de urânio, tório e rádio no solo local, principalmente do solo em baixo da edificação. A concentração de radônio na atmosfera também depende da permeabilidade do solo, do material de construção utilizado na edificação, já que materiais de construção são compostos por insumos que contêm radionuclídeos naturais e da ventilação no ambiente.

Como já mencionado, a principal contribuição para a concentração do radônio em ambientes é o solo (*per se*). Em geral, a contribuição para a concentração do radônio presente no ambiente interno advindo dos materiais de construção, é considerada baixa: cerca de 10% do total da concentração se comparada a que se origina no solo (HULKA *et al.*, 2008). Mas dependendo do tipo de insumo utilizado na produção do material de construção, a participação destes na concentração de radônio no ambiente deve ser considerada. Materiais como britas, areia, cerâmicas e outros, têm inevitavelmente em sua composição concentrações de elementos naturalmente radioativos que variam de acordo com sua origem, ou seja, do solo com dos quais são produzidos (EISENBUND e GESSEL, 1997).

Este assunto foi descrito com detalhes por Eisenbund e Gessel (1997), que evidenciaram a importância dos materiais de construção na exalação do gás radônio em ambientes internos. Os autores ressaltam que a construção civil utiliza componentes brutos como rochas, britas, solo, produtos e subprodutos cuja base são minerais derivados destes componentes brutos, como é o caso do cimento, do gesso, do fosfogesso, dentre outros. Apesar disso, Hopke *et al.*, (2000) mostram que, nos materiais de construção esta contribuição é mínima, confirmando as observações feitas no parágrafo anterior.

Além da inalação, pesquisadores também evidenciam efeitos biológicos da presença de radionuclídeos na água ingerida. E mais, dependendo de questões relacionadas ao uso da água, o radônio presente na água pode ser transportado para a atmosfera e trazer como consequência alguma contribuição na concentração do gás radônio no ambiente (HOPKE *et al.*, 2000).

Desta forma, solo, ar, água e materiais de construção civil constituindo um mesmo local, ambiente interno no qual o ser humano permanece considerável parte do tempo, contribuem para concentração de atividade de radônio que provoca interações com os organismos e pode provocar danos à saúde (WHO, 2009).

Os danos à saúde relacionados à inalação do radônio são de importância na saúde pública, já que o radônio é considerado a segunda causa de câncer no pulmão perdendo somente para o cigarro. De forma geral, o gás radônio ao ser inalado sofre seu decaimento através da emissão de partícula alfa que pode interagir com o tecido pulmonar, por meio da deposição de energia, provocando danos aos pulmões. Como citado anteriormente, há também uma contribuição menor, mas também importante, da água consumida que pode conter radônio em concentrações significativas e pode interagir com as células sensíveis do sistema gastrointestinal e através do sistema circulatório, atingir outros órgãos (HOPKE *et al.*, 2000).

Estudos de concentração de radônio correlatos às análises epidemiológicas relacionadas aos efeitos das radiações ionizantes no organismo humano exposto, realizados por órgãos governamentais como a UNSCEAR, desde 1995, permitem que se estabeleçam protocolos, através de relatórios e normas, com medidas de proteção adotadas por países, inclusive o Brasil (UNSCEAR, 2008).

No Brasil, estudos (MAGALHÃES *et al.*, 2003; GERALDO *et al.*, 2005; CORRÊA *et al.*, 2015; DEL CLARO *et al.*, 2017) atestam que em algumas regiões as concentrações de ^{222}Rn são elevadas. Os resultados apontam a maioria das concentrações dentro dos limites normativos, porém há concentrações que excedem os limites de atenção, inclusive com valores acima dos 600 Bq/m³.

Trabalhos publicados no Brasil sobre radônio, no sentido de enriquecer o banco de dados sobre concentrações deste gás, seguem de forma crescente. Mesmo assim, os dados são insuficientes para uma estimativa média da exposição da população brasileira como um todo, com relação ao gás radônio. Principalmente no que toca os valores quando se considera a distribuição da população em território vasto como é o do Brasil.

Através do Programa de Risco de Radônio no Brasil, com a coordenação do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), desenvolve-se um trabalho multi-institucional com pesquisadores da CNEN, das Universidades UNIPAMPA,

UFRN, UTFPR, UFPR, UniDOMBOSCO, UniPOSITIVO, Instituto do Câncer do Brasil e a Prefeitura de Poços de Caldas e SGB-CPRM. O propósito deste programa é aumentar o banco de dados com informações correlatas a concentrações de radônio em diversas regiões do Brasil e a criação de planos de ação e mitigação em ambientes de convívio humano, considerando a importância da relação do gás radônio com questões de saúde, especificamente em neoplasias do pulmão (SGB-CPRM, 2020).

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por meio do Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA), desenvolve pesquisas nas medições de radônio há 17 anos, com colaboradores da própria instituição e externos, e equipamentos específicos permitindo a correspondência entre a pesquisa científica e técnica sobre as concentrações do gás radônio em ambientes residenciais, além de medições do gás em solos, águas e materiais. Parte destes trabalhos atuam especificamente para identificar e quantificar as concentrações de gás radônio em ambientes internos. Para isto, o LFNA utiliza detectores do estado sólido CR-39, como é o caso dos trabalhos de Del Claro *et al.*, (2017) e Perna *et al.*, (2018).

Considerando a necessidade de aumentar o banco de dados sobre a concentração de gás radônio em ambientes residenciais essa pesquisa destina-se, de forma geral, a mapear os níveis médios de gás radônio nas residências no bairro de Santa Felicidade – município de Curitiba e no município de Carambeí – Paraná.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é mensurar e analisar os níveis de concentração do gás radônio (^{222}Rn) em residências na região de Carambeí e Curitiba, municípios do Estado do Paraná – Brasil.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Aferir as concentrações de ^{222}Rn em ambientes residências na região de Carambeí, município do Estado do Paraná, com base nos mapas fornecidos pelo Programa de Risco de Radônio para o Brasil, utilizando os detectores CR-39;
- ✓ Aferir as concentrações de ^{222}Rn em ambientes residências na região de Santa Felicidade bairro pertencente ao Município de Curitiba - Estado do Paraná, utilizando os detectores CR-39;
- ✓ Elaborar parecer e orientações de ações amenizadoras específicas para a população local;
- ✓ Contribuir para o Programa de Risco de Radônio no Brasil e para a Comissão Nacional de Energia Nuclear.

1.2 JUSTIFICATIVA

Considerando a importância do gás radônio e sua contribuição para a exposição à radiação natural que o ser humano pode receber diariamente, a comunidade científica mundial realiza inúmeras pesquisas para avaliar os riscos que a exposição à radiação natural possa promover à saúde humana (UNSCEAR, 2018).

Estudos feitos há décadas até os mais recentes apontam o gás radônio como segundo maior responsável pelo desenvolvimento de câncer no pulmão e vários polimorfismos genéticos (CHOI *et al.*, 2016; UNSCEAR, 2019).

A importância do gás radônio, bem como dos produtos do seu decaimento se deve ao fato de que equivalem aproximadamente à metade de toda a radiação natural que o ser humano pode estar exposto diariamente (UNSCEAR, 2018).

Neste sentido, trabalhos científicos no Brasil e no mundo buscam quantificar as concentrações de gás radônio nas edificações (VEIGA *et al.*, 2003; GERALDO *et al.*, 2005; CORRÊA *et al.*, 2015; DEL CLARO *et al.*, 2017; PANTELIC *et al.*, 2018).

A concentração de ^{222}Rn em ambientes fechados depende da localização desta construção. Uma edificação feita em uma região onde tenha uma taxa maior de exalação deste gás do solo pode propiciar uma maior concentração de ^{222}Rn neste ambiente, gerando a possibilidade de uma taxa maior de exposição à radiação

natural. Assim, o monitoramento das concentrações em ambientes se faz necessário.

O ser humano passa a maior parte da sua vida em sua residência ou ambientes de convívio humano. Desta maneira ressalta-se o questionamento que permeia esta pesquisa, que se baseia na necessidade de se conhecer a que concentração de radiação natural o ser humano está exposto em sua residência.

O exposto nos parágrafos anteriores evidencia a necessidade de se aumentar o número de regiões mapeadas em território Nacional quanto às concentrações de gás radônio em residências, quantificar estas concentrações e se necessário desenvolver medidas mitigatórias, buscando preservar a saúde da população minimizando sua exposição á radiação natural.

Dessa forma, o interesse na investigação sobre as concentrações de radônio e as questões relacionadas à saúde pública justificam esta pesquisa.

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO

A comunidade científica mundial preocupa-se com a exposição humana às radiações ionizantes naturais ou artificiais. Essa preocupação visa o controle da dose a que o ser humano está exposto. A maior parte desta exposição está relacionada com a radiação que ocorre naturalmente oriunda do espaço e do gás radônio que emana de rochas na terra (UNSCEAR, 2018).

O comitê da UNSCEAR (2018), após avaliação dos resultados apresentados sobre os efeitos da exposição ao gás radônio e produtos do seu decaimento no relatório UNSCEAR (2006), reiterou sua avaliação sobre a consequência de que a inalação do gás radônio e sua interação com o parênquima pulmonar pode dar origem ao câncer de pulmão. O documento de 2018 lança a proposta para que especialistas epidemiológicos de vários países, junto com organizações já atuantes neste segmento, somem esforços para avaliar o resultado da combinação do tabagismo com a exposição ao gás radônio. A proposta também contempla estudos sobre pacientes não tabagistas acometidos de neoplasias pulmonares e sua relação com a exposição ao ^{222}Rn .

Em trabalhos paralelos, Torok *et al.*, (2011) e Choi *et al.*, (2016) relatam que o câncer do pulmão em não fumantes (LCINS) foi classificado, no grupo de tumores

sólidos, como a sétima causa de morte e que estudos com foco na mutação genética de pacientes não fumantes com câncer de pulmão e sua exposição ao gás radônio em ambientes fechados, indicam o gás radônio como mais importante fonte natural de exposição.

A Environmental Protection Agency (EPA, 2011) e a World Health Organization (WHO, 2011) publicaram o primeiro apelo em nível mundial para os cuidados sobre o gás radônio em ambientes residenciais e o risco do câncer, reconhecendo e tornando pública a necessidade de compartilhar mundialmente o conhecimento sobre o gás radônio e suas concentrações em ambientes fechados (LINO *et al.*, 2015).

Na Europa, programas apoiados pelo programa Europeu de Metrologia para a Inovação e Pesquisa e junto com o Ministério da Educação, Ciência e Desenvolvimento Tecnológico da República da Sérvia publicaram em 2018 (PANTELIC *et al.*, 2018), uma revisão literária com base em artigos de periódicos e de conferências resultando em um documento contendo dados de 45 países. O resultado deste trabalho gerou um mapa europeu do radônio e encontra-se no Atlas Europeu de Radiação Natural (EANR) (PANTELIC *et al.*, 2018).

A necessidade de mapeamento das concentrações de gás radônio é mundial e no Brasil diversas pesquisas estão sendo realizadas com esse objetivo. Em trabalho realizado na Baixada Santista, SP, foram aferidos os níveis de concentração do gás radônio em alguns ambientes fechados, dentre eles residências, túneis, galpão de fertilizante, shopping center e lojas de cerâmica, através do monitoramento passivo, com resultados considerados aceitáveis comparados a literatura para ambientes fechados e descartando assim ações de intervenção e não sendo necessárias nem mesmo sugestões mitigatórias nos ambientes pesquisados (GERALDO *et al.*, 2005).

No Planalto de Poços de Caldas, MG, estudos iniciais sobre o risco de gás radônio em ambientes internos numa região de alta radiação natural e sua relação com a mortalidade por câncer do pulmão foram desenvolvidos (VEIGA *et al.*, 2003).

No Paraná, trabalhos avaliaram os níveis de concentração de ^{222}Rn em ambientes e águas de poços da região de Curitiba, com ênfase em proposta de

mitigação para uso de água de poço em estudo de caso específico (CORRÊA *et al.*, 2014).

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) desenvolve, no LFNA, pesquisas com o objetivo de mensurar concentrações de gás radônio em ambientes, água, solo e materiais de construção. Através de parcerias com o Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) e com Centro de Desenvolvimento Tecnológico/Serviço Geológico do Brasil e a Cooperação de Pesquisadores de Diversas Instituições, contribui para o mapeamento nacional das concentrações de gás radônio.

A pesquisa caminha em parceria com o Projeto Programa de Risco de Radônio para o Brasil e subsidia as agências reguladoras nacionais quanto à exposição da população brasileira ao gás radônio em suas residências visando contribuir para a definição de limites de exposição nacional.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Pesquisas desenvolvidas desde 2003 no LFNA, que têm como foco a alimentação do banco de dados com concentrações de gás radônio (o mapeamento citado) em diversas regiões do País, são feitas por meio de equipamentos específicos como o AlphaGUARD (Bertin Instruments) um detector ativo comumente utilizado para água, solo, rochas e detectores passivos de estado sólido, do tipo CR-39, utilizados para a concentração de gás radônio em ambientes.

Com base nos resultados obtidos sobre métodos utilizados em pesquisas anteriores em outros países e em várias regiões do Brasil, em ambientes internos, optou-se pelo detector passivo de estado sólido CR-39.

O mapeamento das concentrações de gás radônio em ambientes residenciais foi estabelecido na região delimitada pelo mapa de geoprocessamento fornecido pelo departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, e complementada por região do município de Curitiba, ambas sem informações, em termos de pesquisa, com relação aos níveis de radiação ionizante em ambientes fechados.

A pesquisa foi realizada no município de Carambeí e no bairro de Santa Felicidade pertencente ao município de Curitiba no estado do Paraná – território

Brasileiro. A região foi definida com base na parceria com a UFPR e o Serviço Geológico do Brasil.

As medições foram feitas no período de julho à outubro de 2019, por meio de detectores do estado sólido (passivos) e foram restritas a ambientes fechados, de convívio humano, especificamente residenciais.

O interesse está relacionado à presença de radônio no ar (atmosfera) dos locais, e as concentrações do gás em relação aos limites estabelecidos pelos órgãos regulamentadores internacionais e nacionais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Estudos sobre a origem de elementos químicos no Universo indicam que os processos de síntese química acontecem nas estrelas. Quando ocorre explosão de super nova, por exemplo, estrelas com massa de 4 a 8 vezes maiores que o Sol pode atingir uma produção em larga escala de elementos químicos. Um ato cataclísmico, com duração aproximada de dois segundos, sintetiza a maioria dos núcleos conhecidos. Esse processo promove a captura rápida de nêutrons, o que faz com que a maioria dos núcleos dos elementos químicos sintetizados sejam instáveis. Entretanto, num curto espaço de tempo, esses radionuclídeos de meia-vida curta liberam energia (radiação) tornando-se nuclídeos estáveis (REIS, 2003).

Cientistas mostram interesse constante na quantidade relativa dos elementos químicos, inclusive nos elementos radioativos, no sistema solar e na crosta terrestre. As reações químicas, a radioatividade natural de elementos instáveis e sua interação com os seres vivos continuam na pauta das discussões científicas (IAEA, 2018).

A radiação natural é composta por raios cósmicos e por radionuclídeos presentes na natureza e ambas as formas de radiação existem no planeta terra desde seu surgimento (IPEN, 2019).

Os radionuclídeos presentes na natureza são classificados como primordiais enquanto os resultantes da interação de nuclídeos presentes na atmosfera com os raios cósmicos são classificados como cosmogênicos (EISENBUD e GESSEL, 1997).

A radioatividade advinda dos raios cósmicos é composta de partículas de altíssima energia é formada por prótons, elétrons, nêutrons, mésons, neutrinos, núcleos leves e radiação gama vindas do espaço sideral. A atmosfera terrestre age como uma barreira para a maioria destas partículas e parcela considerável é desviada pelo cinturão magnético de Van Allen. Na superfície terrestre chegam principalmente partículas secundárias. A atmosfera terrestre não só interage com os raios cósmicos como faz uma blindagem para os seres vivos. Cabe ressaltar que a radiação cósmica varia conforme a altitude e latitude. Moradores na região das montanhas recebem mais radiação cósmica do que quem reside no nível do mar, e

moradores próximos à linha do equador menos radiação cósmica do que quem reside próximo aos polos (IAEA, 2020).

Os radionuclídeos primordiais possuem meia-vida longa e despertam interesse da comunidade científica, considerando os possíveis danos que possam causar aos seres vivos expostos à sua radioatividade natural. Estes elementos possuem um núcleo muito energético, com excesso de partículas ou de carga e emitem esse excesso em forma de matéria (partículas) ou ondas eletromagnéticas as radiações (REIS, 2003). Na busca do equilíbrio nuclear os elementos ^{232}Th , ^{235}U e ^{238}U formam as famílias radioativas (IAEA, 2020). As séries radioativas naturais ou famílias radioativas são a base para o estudo da radioatividade natural. São estas séries: Série do Urânio (^{238}U), Série do Actínio (^{235}U) e Série do Tório (^{232}Th). De forma isolada, sem que haja uma série radioativa associada, o elemento potássio (^{40}K) tem contribuição expressiva para a exposição (REIS, 2003; EISENBUD e GESSEL, 1997).

Com relação aos isótopos do elemento químico potássio, o ^{40}K é o único elemento radioativo com uma meia-vida aproximada de $1,251 \times 10^9$ anos e corresponde a 0,0117% da abundância de potássio no planeta (VASCONCELOS, 2010). O ^{40}K apresenta decaimento para o elemento ^{40}Ca , através de emissão de partícula beta com energia máxima em 1,33 MeV, e um antineutrino e decaimento para o elemento ^{40}Ar , com captura de elétrons e emissão de raios gama e um neutrino, ambos ^{40}Ca e ^{40}Ar , elementos estáveis (HUANG *et al.*, 2013). O radioisótopo ^{40}K não deriva do decaimento dos elementos ^{232}Th , ^{235}U ou ^{238}U , e portanto, como já mencionado, não faz parte das séries radioativas. Todavia, o ^{40}K contribui para a radioatividade natural por meio de sua decaimento (UNSCEAR, 2008).

Desde 1962, a United National Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) apresenta relatórios apontando grandes concentrações (relativas) dos elementos ^{232}Th e ^{238}U (elementos pais mais abundantes das três séries radioativas naturais) em países como Austrália, Brasil, Canadá, Estados Unidos, sul da África entre outros países (UNSCEAR, 1962). Estes relatórios atentam para o fato de que as concentrações de radônio, parte destas duas séries radioativas, devem ser objeto de atenção.

2.1 Famílias radioativas ou séries radioativas

Famílias radioativas ou séries radioativas são constituídas através do processo de decaimento que se estende por diversas gerações. Na lei do decaimento, o núcleo radioativo pai decai, transformando-se em um elemento radioativo filho, o elemento filho atendendo a lei do decaimento dá origem ao elemento neto e assim sucessivamente e sofrerão decaimento sucessivo até que um isótopo filho ou isótopo radiogênico formado seja estável (OKUNO e YOSHIMURA, 2010).

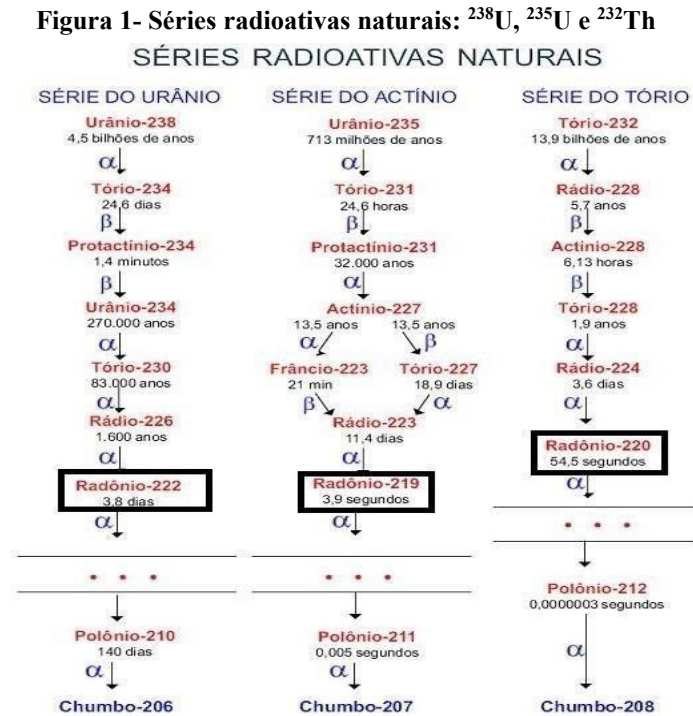
Na formação da Terra primordial os processos de origem magmática mobilizaram a distribuição de urânio na superfície da crosta terrestre (IAG, 2020).

O urânio constitui principalmente três isótopos na crosta terrestre, sendo 99,28% de ^{238}U , 0,7% de ^{235}U e 0,0058% de ^{234}U (quantidade considerada desprezível) (REIS, 2003). Alguns estudos indicam que há aproximadamente 5 bilhões de anos, as quantidades de ^{238}U e ^{235}U estariam em proporções iguais, considerando a meia-vida de cada um deles, sendo o ^{238}U com meia-vida de $4,47 \times 10^9$ anos e ^{235}U com meia-vida de $7,1 \times 10^8$ anos. Esses estudos sinalizam que esses elementos foram formados entre 4×10^9 e 6×10^9 anos que é o cálculo aproximado da idade da formação dos elementos na Terra e no sistema solar.

No decaimento dos radioisótopos ^{238}U e ^{235}U , há a geração de radônio. No caso do ^{238}U , isótopo de maior interesse para a saúde, o ^{222}Rn conhecido na prática como radônio é gerado. O interesse no radônio se fundamenta no fato de que o ^{222}Rn se apresenta em estado gasoso e com meia-vida aproximada de 3,8 dias, consegue penetrar em ambientes fechados de convívio humano (IAEA a, 2020). No caso do ^{235}U , o descendente é o ^{219}Rn conhecido como actiniônio, com meia vida muito curta, aproximadamente 4 segundos, com participação considerada irrelevante na exposição humana (EISENBUD e GESSEL, 1997; WHO, 2011).

O radioisótopo ^{232}Th com meia-vida de $1,4 \times 10^{10}$ anos é encontrado normalmente em rochas, areias monazíticas e em alguns minerais (CAMARGO, 1994). Em seu processo de decaimento forma-se o radionuclídeo conhecido com torônio (^{220}Rn) com meia-vida aproximada de 55 segundos (ICRP, 2014).

O decaimento das três famílias radioativas (fig. 1) está representado em publicação de Okuno e Yoshumura (2010) e pode ser observado que as séries começam com um elemento pai de meia-vida longa ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th e continuam através de um conjunto de gerações de núcleos que decaem até atingir a estabilidade no elemento chumbo ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb , respectivamente.



Fonte: Adaptado de CNEN (2021).

Esta transformação ou taxa de decaimento é descrita pelo número de átomos que decaem por unidade de tempo (atividade), a unidade de medida para a atividade é o becquerel (Bq) definido como uma desintegração por segundo (TURNER, 2007).

O decaimento radioativo de forma natural pode ocorrer através de emissão de partículas alfa (α) ou radiação alfa com carga +2 e são de fato núcleos de hélio (He), beta (β^-) (partícula beta negativa) quando existe no núcleo um excesso de nêutrons comparados aos prótons, ocorre a emissão de uma partícula negativa) e pósitron (partícula beta positiva resultante da conversão de um próton em um nêutron quando há excesso de prótons) e da emissão de raios gama (γ), onde os núcleos após a emissão de partículas alfa ou beta continuam com excesso de energia e emitem uma onda eletromagnética buscando sua estabilidade (REIS, 2003; OKUNO e YOSHIMURA, 2010).

O equilíbrio radioativo secular é uma condição onde as atividades de todos os membros da cadeia são iguais aos radioisótopos que originam a família radioativa, o equilíbrio radiativo secular só acontece em um sistema que permaneceu fechado, sem trocas químicas e físicas com o meio externo, por longo período de tempo (IAG, 2020).

As unidades de radiação comumente utilizadas estão apresentadas na tabela 1, e envolvem a medida da unidade de atividade do elemento químico, a unidade de dose absorvida e depositada no tecido (por unidade de massa) e a unidade de dose equivalente que está relacionada ao dano que a radiação ionizante causa no ser vivo Okuno e Yoshimura (2010).

Tabela 1- Unidades mais comuns relativas à radiação

Unidade	Especificação
Becquerel (Bq)	Unidade de atividade. Um Becquerel = 1 desintegração/segundo
Gray (Gy)	Unidade de dose absorvida Energia média de radiação ionizante depositada por unidade de massa de Matéria
Siviert (Sv)	Unidade de dose equivalente Dano que a radiação causa nos seres Vivos

Fonte: Adaptado de Okuno e Yoshimura (2010).

2.2 Gás Radônio

Conforme citado anteriormente o gás radônio é gerado a partir do decaimento das séries das três famílias radioativas e são características do radônio ser nobre, inodoro, destituído de sabor e sem cor à temperatura ambiente, mas quando resfriados à temperatura inferior a -71°C , (seu ponto de fusão), apresenta uma fosforescência brilhante que se torna avermelhada a cerca de -180°C (AFONSO, 2009).

Conforme citado, no processo de decaimento do ^{235}U um dos resultados é o ^{219}Rn com meia-vida de 4 segundos (ICRP, 2014). No caso do ^{232}Th origina-se o torônio (^{220}Rn), com meia-vida aproximada de 54 segundos, enquanto no caso do ^{238}U o produto é o ^{222}Rn , com meia-vida aproximada de 3,8 dias (ICRP, 2014).

Considerando uma meia-vida mais longa o ^{222}Rn tem maior possibilidade de atingir à atmosfera e este elemento é o objeto de interesse em termos de saúde humana. O gás radônio apresenta aproximadamente oito vezes o peso do ar (1,217 g/L a 1 atm e 0°C), com isso sua concentração em ambientes internos se mantém próxima ao solo e apesar do gás radônio ser nobre, se apresentar como moléculas monoatômicas inertes, ter baixíssima reatividade, o elemento pode se prender a partículas suspensas no ar (CELA, 2014; EISENBUD e GESSEL, 1997). As principais características do elemento químico ^{222}Rn estão explicitadas na figura 2.

Figura 2- Características do elemento químico ^{222}Rn



No decaimento do radônio, partículas alfa são emitidas, estas partículas possuem energias de 5,49 MeV (mega elétron-volt), e elementos filhos são gerados e constam na tabela 2. Esta cadeia de decaimento se encerra no elemento chumbo (^{206}Pb) um isótopo estável, um metal pesado (NNDC, 2020).

A meia-vida e as energias liberadas no decaimento do ^{222}Rn e de seus filhos seguem descritas na tabela 2.

Tabela 2- Meia-vida e emissões do ^{222}Rn e filhos

Isótopo	Meia-vida	Energia Alfa (MeV)	Energia Beta (MeV)	Energia Gama (MeV)
^{222}Rn	3,824 dias	5,49		
^{218}Po	3,05 Minutos	6		
^{214}Pb	26,08 Minutos		1,02;0,70;0,65	0,35;0,30;0,24
^{214}Bi	19,9 Minutos		3,27;1,54;1,51	0,61;1,77;1,12
^{214}Po	164 segundos	7,69		
^{210}Pb	22 anos		0,016;0,061	0,047
^{210}Bi	5,02 dias		1,16	
^{210}Po	138,3 dias	5,3		
^{206}Pb	Estável			

Fonte: Adaptado de NNDC (2020).

O ^{222}Rn tem o ^{226}Ra como precursor na cadeia radioativa. O ^{226}Ra é um radionuclídeo também alfa-emissor com meia-vida de aproximadamente 1600 anos e em conjunto com seus filhos (inclusive o próprio radônio) compõe uma grande parte da fração de radiação natural recebida pelo homem (EISENBUD e GESSEL, 1997).

Por ser gás o radônio possui maior mobilidade exalando do solo para o ar e para a água e com meia-vida de 3,824 dias tem maior possibilidade de chegar a atmosfera e em ambientes internos (UNSCEAR, 2000).

2.3 Radônio no Solo e na Água

Conforme elucidado anteriormente a maior fonte de exalação do gás radônio é o solo (UNSCEAR, 2006), considerado o solo como o produto de ações ou quaisquer situações climáticas extremas sobre um composto constituído de sedimentos e rochas (GUSMÃO FILHO, 2008).

A concentração de radônio no solo está relacionada com a geologia local. Há uma parcela do radônio (gás) gerado que não alcança a atmosfera e ao decair gera, dentro do solo, elementos-filhos que são metais. Para efeito de saúde, o radônio

que escapa para a atmosfera é o de maior interesse (UNSCEAR, 2000; CAMARGO, 1994).

O radônio como filho do ^{238}U têm suas taxas de exalação dependente da quantidade de urânio presente no solo (UNSCEAR, 2006). O Urânio se encontra retido nos principais minerais formadores de rocha, compondo alguns minerais acessórios ou como mineral próprio quando em concentrações suficientes.

Ivanovich (1992) apresenta a concentração de U obtidas em rochas. Estas informações estão contidas na tabela 3.

Tabela 3- Concentração de U em rochas

TIPO DE ROCHA	NOME	U (mcg/grama)
Ígneas	Granitos	2,2 – 6,1
	Basaltos	0,1 - 1
	Ultrabásicas	< 0,015
Metamórficas	Granulitos	4,9
	Gnaisse	2
	Xisto	2,5
Sedimentares	Calcário	~2
	Fosfatos	50 – 300

Fonte: Ivanovich (1992).

Rochas caracterizadas basicamente por quartzo e plagioclásio apresentam baixas concentrações de K, U e Th, enquanto rochas cujas composições são micas, feldspatos e minerais acessórios como o zircão, a apatita e a monozita possuem uma maior concentração desses elementos (REIS, 2016 cita SAPUCAIA *et al.*, 2005) e os granitos possuem altos teores de radionuclídeos (EISENBUD e GESSEL, 1997).

Normalmente a quantidade de radionuclídeos no solo é inferior à quantidade destes elementos nas rochas, isto porque estes radionuclídeos podem ser absorvidos pelas plantas ou de forma lenta ter sua concentração diminuída pelo processo erosivo resultado da lavagem da camada superficial do solo pelo escoamento das águas superficiais (OLIVEIRA, 2006). Conseqüentemente, os

níveis de radionuclídeos presentes no solo dependem da rocha sob esse solo, e sua composição e de condições físicas adjacentes (UNSCEAR, 2006).

Por ser um gás, o transporte do ^{222}Rn para a atmosfera é facilitado, permitindo que o mesmo difunda por meio de fendas e poros do solo. O radônio terá maior mobilidade se o solo for permeável a exemplo da areia, enquanto um solo como a argila, mais impermeável apresentará uma mobilidade menor (ARAÚJO, 2003).

Solos e rochas sob lençóis freáticos possuem poros saturados de água e neste caso o radônio será transportado pela água (UNSCEAR, 2000).

Documentos como o REIS (2016) relatam que aproximadamente 95% da população mundial habita regiões que apresentam uma dose média entre 0,3 a 0,6 mSv/ano. Algumas localidades apresentam níveis mais elevados, como por exemplo no Brasil, o caso de uma colina denominada Morro do Ferro na região próxima a Poços de Caldas, Minas Gerais, onde os níveis podem atingir 250 mSv/ano. Esta região não é habitada. Outro exemplo no Brasil é o município de Guarapari, Espírito Santo, onde em algumas de suas praias, com suas areias ricas em tório os níveis podem atingir 175 mSv/ano. Estes locais são frequentados inclusive para tratamentos terapêuticos (EISENBUD e GESSEL, 1997).

Para atingir a atmosfera o gás radônio primeiramente passa pelo processo de emanção que é a passagem do átomo do gás radônio, gerado através do decaimento do elemento ^{226}Ra , do interior do grão mineral para o espaço poroso do material ou do solo. Nem todo radônio gerado passa para o espaço poroso entre os grãos, uma parte deles fica preso no interior dos grãos. A fração que migra é chamada de Fração Emanada (FE) (SADOKA, 2011). Os espaços no grão mineral podem estar preenchidos com água ou ar, e alguns fatores como tamanho e forma do grão, disposição do elemento rádio nos grãos, umidade, pressão atmosférica, temperatura, porosidade do grão, alterações geradas pela radiação e sua densidade sólida podem influenciar no processo de emanção (SADOKA, 2011; COSTA, 2011). O conjunto destes fatores promove o recuo e o comprimento de difusão do gás no interior dos grãos, o que possibilita a emanção (COSTA, 2011). O movimento do gás da parte porosa do material para a atmosfera ou para a água é denominado exalação (UNSCEAR, 2000).

O coeficiente da emanção pode ser representado pela equação abaixo

$$f = \frac{Rn(n1)}{Rn(n0)}$$

Sendo: f o coeficiente da emanção, $Rn(n1)$ a atividade de radônio que sai do material e $Ra(n0)$ a atividade do rádio dentro do material (KOVLER *et al.*, 2005).

Os processos de transporte do radônio, emanção e exalação, estão ilustrados e podem ser observados na figura 3.

Figura 3- Ilustração dos processos de emanção e exalação do radônio



Fonte: Oliveira (2017).

Para efeito de saúde, o radônio que escapa para a atmosfera é o de maior interesse (UNSCEAR, 2000; CAMARGO, 1994).

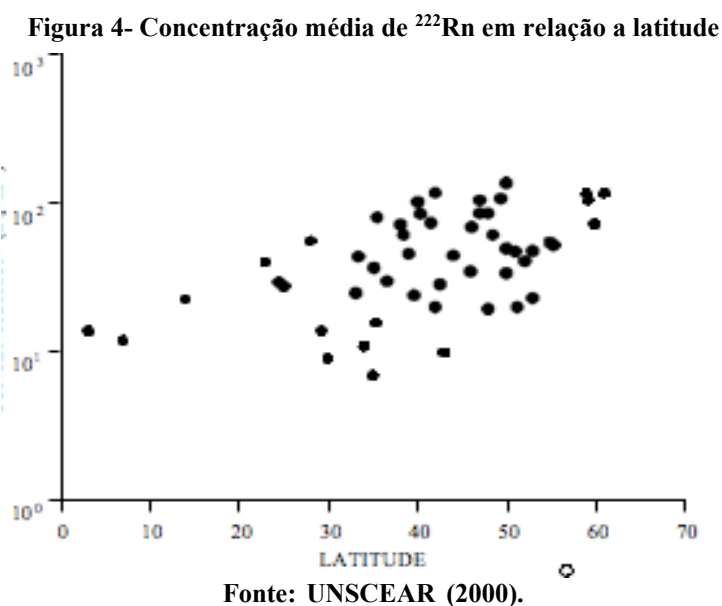
2.4 Radônio em Ambientes Residenciais

A concentração do ^{222}Rn em ambientes fechados está diretamente relacionada com a quantidade de rádio, urânio e tório presente no solo e na água onde o imóvel se encontra (UNSCEAR, 2006; WHO, 2009).

Na década de 70, com a disponibilidade de instrumentação apropriada, as pesquisas com foco no radônio em ambientes fechados foram intensificadas, coincidindo com a preocupação em conservação de energia, em países onde o inverno é rigoroso, destacando-se a importância de barreiras contra a infiltração do ar exterior (EISENBUD e GESELL, 1997).

A UNSCEAR (2000) ressalta a grande quantidade de dados apresentados sobre as concentrações em ambientes internos reunidos em relatórios de 1988 e 1993. O órgão, com o apoio do Programa de Pesquisa Coordenada sobre ^{222}Rn no meio ambiente que contou com o patrocínio da *International Atomic Energy Agency*,

sugere que novos relatórios serão apresentados. A UNSCEAR (2000) complementa que em relatório de 1993 um estudo sobre a variação geográfica (latitudinal), apontou que os níveis nas latitudes equatoriais apontaram taxas de ventilação mais altas, considerando a temperatura média externa mais alta. Contudo, nos resultados a dispersão geral reflete que muitos outros fatores estão relacionados. O gráfico relacionando as concentrações de ^{222}Rn em ambientes internos em função da latitude em diversos países está representado na figura 4.



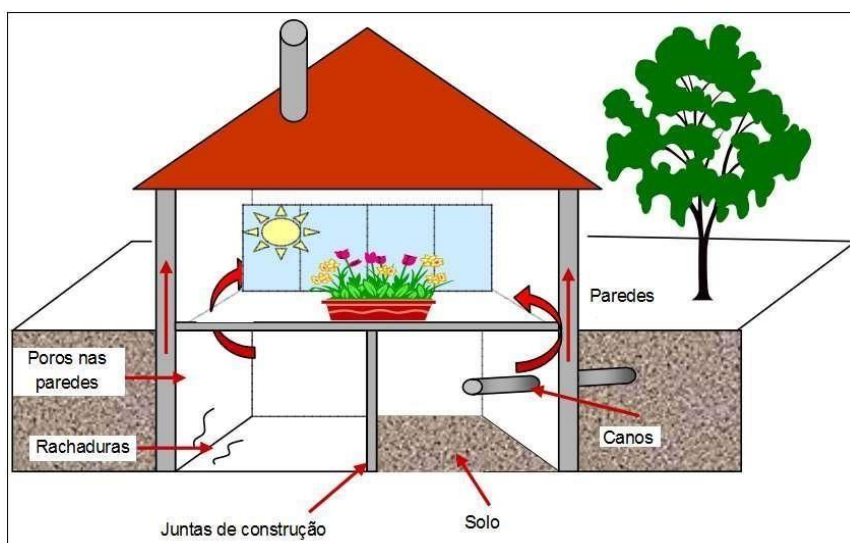
Observa-se que os valores de concentrações ficam entre 10 e 100Bq/m³. Posteriormente, pesquisas esclareceram que não é a taxa e ventilação o principal fator da concentração do radônio em ambientes e sim fatores como a composição do solo, como citado anteriormente, a permeabilidade do solo e as diferenças entre a pressão interna e externa nas edificações (UNSCEAR, 2000).

Estudo americano desenvolvido por Nazaroff e Nero (1988) afirma que há maior concentração de gás radônio em ambientes fechados, se comparada à concentração em ambiente externo ao redor. Os autores citam primeiramente como exemplos cavernas, minas subterrâneas, especialmente as de urânio. Em décadas seguintes, esta afirmação incluiu ambientes fechados, como prédios comerciais e residências com concentrações altas de radônio e de seus filhos, suficientes para despertar o interesse científico pelo risco eminente à saúde humana.

A entrada do gás radônio em um ambiente é facilitada ao percorrer caminho através de espaços entre o solo e o assoalho, rachaduras, drenos, bombas de esgoto, buracos, janelas, encanamentos frouxos ou soltos, pontos de ligação entre a parede e o chão e através de água subterrânea (GAVIOLI *et al.*, 2009) e como o gás radônio tem um número atômico elevado (86) sua concentração no ambiente é em níveis próximos do solo. Em residências que utilizam água de poço para abastecer suas necessidades, o radônio pode se acumular nestas águas e ao chegar em torneiras e chuveiros difunde-se da água indo para a atmosfera. O radônio tem baixa solubilidade em água, porém entre os gases nobres é o mais solúvel, e tem maior solvência em solventes orgânicos (AFONSO, 2009).

Um esquema da forma de penetração do gás radônio em ambientes residenciais pode ser observado na figura 5.

Figura 5- Caminhos possíveis para a entrada do ^{222}Rn em ambientes fechados



Fonte: Adaptado de WHO (2004).

Os materiais utilizados na construção civil podem conter em sua composição elementos naturalmente radioativos pertencentes às famílias radioativas do ^{238}U , do ^{232}Th e esses materiais também podem estar também relacionados ao radionuclídeo ^{40}K . Estes elementos são conhecidos como NORM (*Naturally Occuring Radioactive Material*). Quando o processamento industrial de um material concentra radionuclídeos naturais, elevando assim o nível de radioatividade desse material, o mesmo é denominado TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material*). O fosfogesso é um resíduo TENORM e é um

exemplo do resultado da mineração e processamento da rocha fosfática para a obtenção do ácido fosfórico (IPEN, 2019).

Conforme descrito, os materiais de construção têm sua participação na exalação do gás radônio. Em seu estudo, Hopke *et al.*, (2000) observam que, apesar dos produtos como cimento, gesso, fosfogesso, dentre outros, serem derivados de rochas, britas e solo, possivelmente categorizados como NORM, sua contribuição na concentração de radônio em ambiente interno é menor, se comparada com a contribuição do solo.

O Centro Comum de Pesquisa da Comissão Europeia coleta dados das concentrações de gás radônio de diferentes países, desde 2005, incorporando-os de forma análoga formando o Mapa do Radônio em ambientes fechados. O mapa apontando as concentrações de ^{222}Rn em ambientes fechados está inserido no Atlas Europeu de Radiação Natural (EANR) que concentra uma coletânea de mapas que apontam os níveis de radioatividade natural de variadas fontes (DUBOIS *et al.*, 2010).

Pantelic *et al.* (2018) em relatório no âmbito do projeto *MetroRadon*, apresenta uma análise geral das pesquisas desenvolvidas na Europa sobre radônio. Este relatório foi incentivado por pesquisa realizada por Dubois (2005), que apontou a falta de padronização dos dados nas pesquisas, nos procedimentos, modelos, estratégias de mapeamento e níveis de referência relacionados ao radônio em ambientes fechados.

Em resultados desse relatório de Pantelic *et al.*, (2018), há uma revisão literária das pesquisas sobre radônio em ambiente fechados no continente Europeu. Esta revisão contempla artigos de periódicos e artigos em anais de conferências tanto nacionais como internacionais.

As observações mais importantes para cada país fazem parte do relatório, como exemplo: objetivo da pesquisa, estratégia e procedimentos de amostragem, métodos e avaliações de medição, prazo da pesquisa, época do ano, tipos de locais, avaliação e resultados, garantia de resultados, tendo como base os dados disponíveis na literatura de 45 países. O estudo propõe abordagens visando minimizar as inconsistências e melhorar a conformidade de dados de concentração de gás radônio em ambientes fechados (PANTELIC, 2018).

A partir dos dados de Pantelic *et al.*, (2018), publicado pelo Centro Comum de Pesquisa da Comissão Europeia, o grupo de pesquisa do LFNA, na visão da autora desta pesquisa, produziu um quadro resumo (tabela 4) com as informações dos países, período da pesquisa, técnica utilizada para medição e resultados. A partir da análise deste quadro confirma-se a necessidade de uma maior padronização dos dados.

Tabela 4- Resumo do relatório apresentado baseado em dados do Centro Comum de Pesquisa da Comissão Europeia

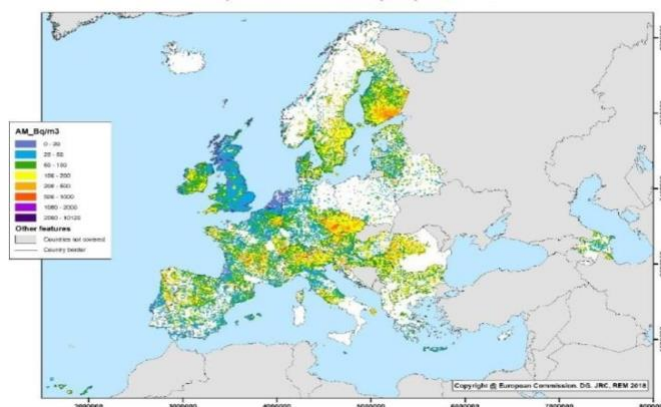
PAÍS	PERÍODO	MÉTODO	RESULTADO
Albânia	2009 e 2014	345 detectores CR39(SSNTD Radtrak)	14 a 1238 Bq/m ³ média aritmética: 120±67 Bq/m ³ média ponderada: 101Bq/m ³
Armênia	2010 e 2011	800 detectores Gamadata	>200Bq/m ³
Áustria	1992 e2001	Detectores eletreto E-Perm, Detectores de Trilha KFK e Detectores de carvão Pico- Rad	<200 Bq/m ³ 200 a 400Bq/m ³ >400Bq/m ³
Azerbaijão	2010	2500 detectores Gammadata-Landauer	169 casas >200 e 418 casas 100 a 200 mediana de 58 Bq/m ³ média de 84 Bq/m ³
Bielorrússia	2004 a2012	Detectores LR-115 tipo 2Dosirad	31 Bq/m ³ a 76 Bq/m ³
Bósnia e Herzegovina	2006 e 2010	CR-39	Média aritmética <82,1Bq/m ³
Chipre	2001-2002	RADIM3	6,2 Bq/m ³ a 102,8 Bq/m ³ Média aritmética geral 19,3±14,7 Bq/m ³
República Checa	2005 e 2014	SSNDs Track-etch KodakLR115	Níveis médios de 140Bq/m ³ 10 a 15 % das casas de 200 Bq/m ³ a 400 Bq/m ³ 2 a 3 % > 400 Bq/m ³
Geórgia	2007 a 2011	Câmaras de íons (eletretos)	5Bq/m ³ a 245 Bq/m ³

Grécia	1995 a 1998	CR-39	22 casas entre 200Bq/m ³ e 400 Bq/m ³ 08 casas entre 400Bq/m ³ e 1000 Bq/m ³ 04 casas > 1000 Bq/m ³
Estônia	1998 a 2001	Detectores	Estatística descritiva
Finlândia	2002 e2010	Detectores Alphatrack	Mapa com casas acima de 400Bq/m ³ , 800 Bq/m ³ e 1000 Bq/m ³
França	1983 – 2002	Bare LR115	Distribuição log-normal89Bq/m ³ (média aritmética) (desvio padrão 162 Bq/m ³)
			55 Bq/m ³ valor mediano 53 Bq/m ³ (média geométrica)
Alemanha	1985 – 2004	Detectores de estados Sólidos	100Bq/m ³ (valor mediano)
Hungria	1994 e2004	CR-39	150 Bq/m ³ , 200 Bq/m ³ 400 Bq/m ³ , 600 Bq/m ³
Islândia	2012 -2013	Detector PADC/ CR-39 (Radosys)	13 Bq/m ³ (nível médio)9 Bq/m ³ (mediana)
Irlanda	2015	CR-39	Mapa
Itália	2004 e 2007	CR-39	Mapa
Cazaquistão	2011-2013	E-PERM	Média 20 Bq/m ³ a 120Bq/m ³
Lituânia	1995 – 1998	E-PERMTM	55±4 Bq/m ³ (média aritmética) 22 Bq/m ³ (média geométrica)
Luxemburgo	1993 a 2002		15 Bq/m ³ (média)
Macedônia	2012	CR-39	Mapa
Malta	2010 e 2011	LR 115	> 100 Bq/m ³
Moldova	1991 e 2011	RTM1688-2 (SARAD)	421 casas <100 Bq/m ³ 7 casas entre 100 Bq/m ³ e 200 Bq/m ³ e 2 casas > 200 Bq/m ³
Montenegro	2002 e 2003	CR-39	400 Bq/m ³

Holanda	1984	FzH	0,012% das casas > 200Bq/m ³
Noruega	1984 a 1986	CR-39	55 Bq/m ³ e 65 Bq/m ³ média
Polônia	1991	CR-39	Mapa
Portugal	1989 a 1990	LR115	Mapa
Romênia	1987 e 1990	Makrofol e CR-39	Mapa
Federação Russa	1993	CR-39 e Detectores de Carvão	Mapa
Sérvia	2015 a 2016	Detectores	87% > 200Bq/m ³ 10% entre 200 Bq/m ³ e 400 Bq/m ³ 3% > 400 Bq/m ³ 0,3% > 1000 Bq/m ³
Eslováquia	1996	CR-39	48 Bq/m ³
Eslovênia	1993 – 1994	CR-39	54 Bq/m ³ (média)
Espanha	2017	Detectores	Mapa
Suécia	1991 – 1992	Detectores	Gráfico
Suiça	1980	Detectores	Mapa
Turquia	2012	CR-39	35 Bq/m ³ (Média Aritmética)
Ucrânia	2010-2013	LR115	Mapa
Reino Unido	2007 – 2015	Detector passivo	Mapa

Um exemplo de padronização é o mapa da European Commission atualizado em setembro de 2018, que apresenta a concentração de radônio em salas do andar térreo de 35 países europeus, que foi elaborado 13 anos depois do trabalho desenvolvido por Dubois em 2005 (PANTELIC *et al.*, 2018) e pode ser observado na figura 6.

Figura 6- Mapa Europeu de Radônio em Ambiente Interno – 35 Países Europeus



Fonte: Pantelic *et al.* (2018)

Através da Diretiva do Conselho 2013/59/Euratom (Artigo 2.^o, n.^o2-D) (União Europeia, 2013), são incluídos, pela primeira vez, exigências legais vinculativas sobre a proteção contra a exposição ao ^{222}Rn (PANTELIC *et al.*, 2018).

Na Coreia do Sul, em 2015 - 2016, foi realizada uma pesquisa com o objetivo de levantar dados sobre as concentrações de gás radônio em ambientes residências e avaliar seus efeitos na saúde humana. Buscando investigar os níveis de concentração acumulados por um longo prazo, 599 pacientes portadores de doenças respiratórias foram escolhidos e em suas residências detectores de radiação alfa foram instalados por um período de três meses. Os resultados, nas residências mostraram que a média aritmética das concentrações do ^{222}Rn ficaram entre $71\pm 65\text{Bq/m}^3$, com certeza de 95%, o que em termos de certeza de 68% significa $71\pm 33\text{Bq/m}^3$ (PARK *et al.*, 2018).

No Brasil, pesquisas em diversas regiões foram realizados com o objetivo de mensurar os níveis de concentração do ^{222}Rn em ambientes internos. Segundo apontamentos de Geraldo (2005), Corrêa (2006) e Del Claro (2017), grande parte dos resultados encontrados indicaram concentração inferior a 200Bq/m^3 , valores abaixo dos limites recomendados por agências internacionais como a UNSCEAR e o ICRP.

Entretanto, em pesquisa realizada em casas no estado de São Paulo, há situação onde as medições mostraram valores que extrapolaram os limites recomendados, inclusive com concentração de $610\pm 55\text{Bq/m}^3$ (MARQUES, 2006).

O quadro resumo 2 apresenta resultados de concentração média de ^{222}Rn aferidos em algumas pesquisas em estados do território brasileiro.

Tabela 5- Concentrações de gás radônio no Brasil

Região	Estado	Concentração de ^{222}Rn (Bq/m^3)			
		Mínima	Média	Máxima	Fonte
Poços de Caldas (área rural)	Minas Gerais	50	204	1046	AMARAL, 1992

Poços de Caldas (área rural)	Minas Gerais	27	220	1024	VEIGA <i>et al.</i> , 2003
Poços de Caldas (área urbana)	Minas Gerais	12	61	920	VEIGA <i>et al.</i> , 2003
Monte Alegre (área rural)	Pará	40	116	338	MELO, 1999
Monte Alegre (área urbana)	Pará	22	75	188	MELO, 1999
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	9	40	200	MAGALHÃES, 1999
Campinas	São Paulo	20	80	254	NEMAN, 2000
Santos	São Paulo	124	-	-	GERALDO, 2005
São Paulo	São Paulo	33	147	562	DA SILVA, 2005
São Paulo	São Paulo	31	131	615	DA SILVA, 2005
Campo Largo	Paraná	6	60	123	CORRÊA, 2006
Campo Largo	Paraná	2	186	637	CORRÊA, 2006
Curitiba	Paraná	6	42	126	CORRÊA, 2006
Curitiba	Paraná	5	85	486	CORRÊA, 2006
Curitiba	Paraná	5	76	268	CORRÊA, 2006
Belo Horizonte	Minas Gerais	4	108	1531	SANTOS, 2010
Curitiba	Paraná	4	47	320	DEL CLARO, 2011
Curitiba	Paraná	16		78	DEL CLARO, 2013
Curitiba	Paraná			100	CORRÊA, 2014

Fonte: Adaptada de Del Claro (2013).

Em regiões onde o solo apresenta alta concentração de radionuclídeos deve haver uma maior atenção nos projetos e nos agregados naturais que farão parte da construção civil para se garantir concentrações *indoor* compatíveis com as recomendações (REIS, 2016), considerando ser um fato já estabelecido, de que a maior parte da exposição humana a radiação natural provém do solo e de alguns materiais de construção (UNSCEAR, 2008).

A WHO (2009) considera as medições de radônio nas moradias fundamentais para avaliar as concentrações médias, que embora essas medições sejam processos relativamente simples precisam de protocolos padronizados garantindo medições precisas e consistentes o que reitera as citações anteriores que buscam maior uniformidade nos procedimentos para aferir as concentrações.

2.5 Efeitos Biológicos

Os efeitos biológicos são respostas naturais do organismo, ou parte dele a algum agente modificador ou agressor, isso não necessariamente caracteriza uma doença. A doença ocorre quando o efeito é suficientemente grande para impedir que o organismo se recupere. Considerando os possíveis danos decorrentes da exposição à radiação ionizante natural ou artificial no ser humano, pesquisas voltadas para as concentrações de radônio e seus efeitos a saúde humana são feitas mundialmente. O Comitê Científico das Nações Unidas sobre o efeito das Radiações Atômicas (UNSCEAR) criado em 1955, pesquisa os níveis de exposição às radiações ionizantes que os seres vivos estão sujeitos e as evidências de efeitos biológicos decorrentes desta exposição (MEREDITH, 1967; UNSCEAR, 2018).

O gás radônio desperta a preocupação porque quando penetra em ambientes fechados tende a ter sua concentração próximo ao solo e, junto com os gases que compõem o ar, é inalado pelo homem ou animais, e com meia-vida curta, tem seu decaimento nuclear no interior do organismo humano irradiando os seus órgãos e tecidos (IAEA, 2020).

Paracelsius, no século XVI, relatou alta taxa de mortalidade de mineiros na Saxônia e na Boêmia, o que seriam os primeiros apontamentos registrados sobre os possíveis danos à saúde pela exposição ao radônio. No final do século XIX o câncer de pulmão foi determinado como causa das mortes. Somente 50 anos após a

descoberta do radônio (1901) foi possível identificar o radônio e seus descendentes com a principal causa de câncer no pulmão após o tabagismo (PANTELIC *et al.*, 2018), sendo responsável por 3 a 14% de todos os cânceres do pulmão. Grande parte das ocorrências de câncer de pulmão induzidos por radônio acontecem entre fumantes em função de dano provocado pela combinação de fumo e radônio (WHO, 2009).

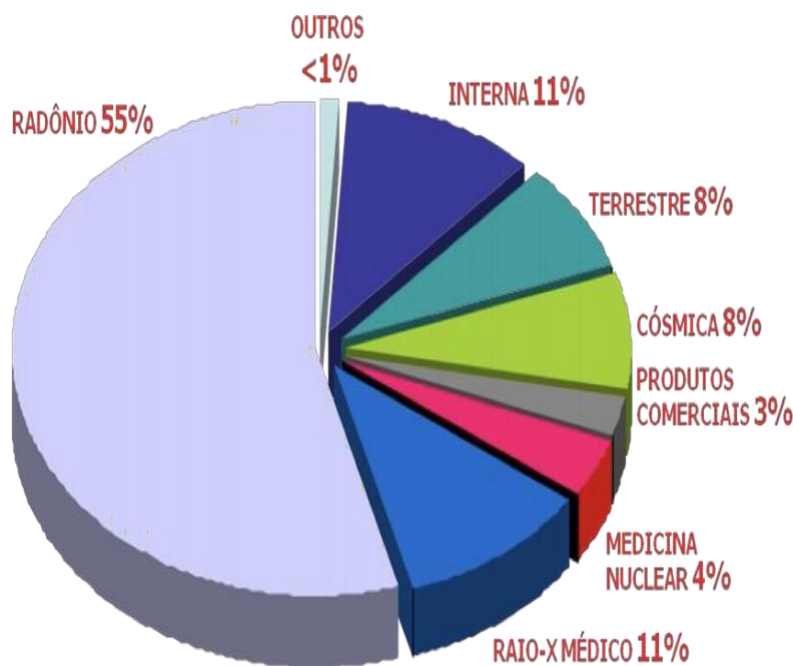
Em seu trabalho, Magalhães *et al.*, (2003) ressaltam que as evidências epidemiológicas sobre a exposição humana ao gás radônio e sua relação ao risco de câncer de pulmão se deu através de pesquisas com mineiros que trabalhavam em minas com concentrações relativamente altas deste gás. Níveis elevados de concentração também foram encontrados em ambientes fechados, fazendo com que as pesquisas e debates sobre a exposição humana ao gás radônio envolvessem a população em geral, considerando principalmente ambientes fechados.

Geraldo *et al.*, (2005), reforçam a preocupação de monitorar as concentrações de gás radônio em ambientes fechados e o risco da exposição humana além dos limites recomendados e a possibilidade de promover o câncer no pulmão e realiza medições passivas em ambientes relativamente fechados na região da Baixada Santista, e apresentam resultados abaixo dos limites máximos recomendados pelo ICRP.

O gás radônio foi incluído na categoria de carcinógeno humano em 1988 pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC). Em 1993 na cidade Éilat, em Israel, foi realizado um Workshop com a participação de cientistas e especialistas em radônio da Europa, América do Norte e Ásia buscando uma unificação na abordagem para controlar as exposições ao gás e as formas de comunicação sobre o risco à saúde. O Projeto Internacional de Radônio estabelecido pela WHO (2005) teve como objetivo definir estratégias com o mesmo objetivo, desenvolvendo um manual com recomendações detalhadas para a diminuição do risco e sugestões de políticas sólidas com ações preventivas e mitigatórias da concentração do radônio (WHO, 2009).

A participação do gás radônio na exposição às radiações ionizantes que o ser humano recebe durante sua vida é cerca de 55% (fig. 7).

Figura 7- Gráfico que indica a distribuição da exposição do ser humano a radiação natural



Fonte: LARANA (2010).

A UNSCEAR (2018) reconheceu que o radônio inalado e seus filhos de meia-vida curta representaram cerca da metade da dose efetiva recebida pela população considerando o total de dose efetiva das radiações ionizantes naturais.

O radônio é um gás inerte, e como tal quando inalado é expelido pelo organismo. O verdadeiro dano à saúde acontece quando seu decaimento acontece dentro do sistema respiratório e toda a energia da partícula alfa (pico de Bragg) fica depositada em uma pequena quantidade de tecido e ainda dá origem aos filhos do radônio de meia-vida curta não gasosos, que também emitem energia buscando a estabilidade (WHO, 2009). Outro risco é quando o decaimento do gás ocorre na atmosfera e seus filhos se prendem às aerossóis, que quando inalados se fixam no pulmão, depositando toda a energia de decaimento da cadeia sobre os tecidos biológicos (TURNER, 2007).

Gavioli *et al.*, (2009) evidencia as questões mencionadas no parágrafo anterior. Em sua pesquisa, ressalta que a inalação de ar e a ingestão de água com altos níveis do ^{222}Rn promovem uma exposição das células sensíveis dos aparelhos respiratório e gastrointestinal à radiações ionizantes através do decaimento radioativo deste gás bem como dos seus descendentes podendo promover malefícios à saúde humana.

Conforme mencionado, o decaimento ^{222}Rn se realiza através da emissão de partícula alfa, que em contato com as células de secreção e basal (vias aéreas

superiores) pode provocar neoplasia pulmonar. Todavia, ainda há dúvidas em se conhecer quais são as células mais predispostas à esta patologia (UNSCEAR, 2000; WHO, 2009).

Em algumas atividades profissionais o radônio e seus descendentes têm grande participação na exposição ocupacional. Os trabalhadores que participam no ciclo do combustível nuclear inalam o radônio a partir de sua liberação das minas de urânio. Consequentemente este grupo de trabalhadores têm um aumento considerável à exposição às radiações ionizantes naturais (UNSCEAR, 2018). Esta mesma evidência foi reconhecida em mineradores, como já citado, através de apontamentos de Paracelsus no século XVI, que ressalta alta taxa de mortalidade entre mineiros (PANTELIC *et al.*, 2018).

De forma evidente o radônio foi estabelecido com a principal causa de surgimento do câncer no pulmão após o tabagismo. Segundo a WHO, as pesquisas apontam que a exposição ao gás radônio em ambientes internos causa de 3% a 20% das neoplasias pulmonares no mundo. Os resultados atuais da *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), demonstram uma mortalidade anual nos EUA, de cerca de 20 mil pessoas, por câncer no pulmão resultante da exposição ao ^{222}Rn de 21 mil pessoas (VIMERCATI *et al.*, 2018).

VIMERCATI *et al.*, (2018) também afirmam que os efeitos maléficos do radônio não se restringem ao pulmão. Os autores ressaltam que estudos indicam outros tipos de câncer relacionados ao gás radônio, podendo ser citados as patologias como leucemia linfóide crônica (LLC) nos EUA e câncer de pulmão, estômago e cérebro em mulheres na Galiza. Em função desses dados, há um reforço na necessidade de normatizar níveis de segurança para a exposição ao ^{222}Rn .

O Instituto Nacional de Câncer, órgão do governo americano orienta a população sobre a exposição em níveis altos dos seres humanos ao gás radônio e maior risco de câncer de pulmão, sugerindo à população que reside em locais cujo solo ou rochas tenham altas taxas de concentração de ^{222}Rn , a opção de medir suas residências, considerando os testes de radônio caseiros de fácil manuseio e baixo custo. Os kits de teste podem ser encontrados em lojas de hardware e orientações com ações mitigatórias e informações sobre o radônio podem ser encontradas no site do próprio Instituto Nacional de câncer (NIH, 2021).

No Brasil, Veiga *et al.*, (2003) desenvolveram um estudo para avaliar a exposição radiológica ambiental em uma região que apresenta uma radiação natural alta e discutiram riscos de exposição em ambientes fechados. Utilizaram dados da exposição dos moradores decorrentes da inalação de progênies de radônio e exposição gama externa em áreas urbanas e rurais do Planalto de Poços de Caldas, região conhecida mundialmente por ser uma região de alta radiação natural. Usando um modelo de risco relativo constante, estimaram um acréscimo de 20% no risco de mortalidade por câncer de pulmão atribuídas à exposição à progênie do radônio e 16% de todas as mortes por câncer de pulmão no município de Poços de Caldas podem ser atribuídas à exposição ao radônio (VEIGA *et al.*, 2003).

2.6 Normas Internacionais e Nacionais

Considerando um agente cancerígeno a comunidade internacional composta por países e organizações deliberaram algumas recomendações com o objetivo de limitar o ser humano a exposição do ^{222}Rn . Segundo a recomendação da WHO (2009) o nível limite de concentração do ^{222}Rn para residência é de 300Bq/m^3 .

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica através de um comitê técnico fornece as diretrizes básicas de radioproteção e recomenda um limite inferior à 300Bq/m^3 (ICRP, 2014).

Nos Estados Unidos a *United Environmental Protection Agency* (USEPA) orienta que ambientes que apresentam concentrações maiores ou iguais a 148Bq/m^3 adotem medidas com o objetivo de reduzir a concentração de ^{222}Rn no ambiente (EPA, 2001).

Na Itália, em 2001, foi implementada a Diretiva 29/96 Euratom através de um Decreto Legislativo nº 241/00 que alterou e incluiu o Decreto Legislativo nº 230/95, estabelecendo o limite de 300Bq/m^3 para ambientes fechados de novos edifícios, em edifícios destinados à educação e em edifícios abertos ao público (VIMERCATI *et al.*, 2018).

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) orienta monitoramento de exposições acima de 10mSv por ano, e indica intervenção, independente da justificativa, para casos de exposição superior a 50mSv por ano.

Estes limites de dose estão relacionados à concentração de 300Bq/m^3 (CNEN, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa tem como foco mensurar as concentrações médias de gás radônio em ambientes residenciais envolvendo imóveis de características comuns quanto ao tipo de construção e dimensões. Contudo, os ambientes são residenciais em sua maioria e possuem portas e janelas que garantem a ventilação adequada para o convívio humano.

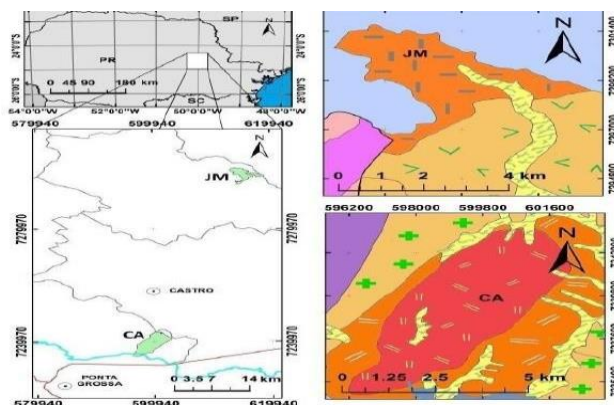
3.1 Planejamento e Delimitação Geográfica e Temporal

O mapeamento e planejamento dos pontos para coleta de dados teve seu início em um evento no ano de 2019, na UFPR, que teve o objetivo de formar um grupo multidisciplinar para o Programa de Risco de Radônio no Brasil. Nesse evento definiu-se parceria técnica e locais de atuação para o mapeamento do gás radônio, ficando ao encargo deste trabalho de dissertação a elaboração de um planejamento envolvendo uma das regiões de estudo, definindo as estratégias e métodos para aferir a concentração média de gás radônio existente em residências locais.

A região definida para a pesquisa tem como base o mapa oferecido pela UFPR, onde, segundo estudo desenvolvido por Antonelli e Ferreira (2019), os valores de urânio, tório e potássio no solo foram considerados elevados.

Dos pontos referenciados neste mapa, (fig.8) a área de interesse para esta pesquisa foi definida dentro do município de Carambeí-PR.

Figura 8- Localizações e Unidades Geológicas dos Granitos de Serra de Carambeí e de Joaquim Murtinho



Fonte: Antonelli *et al.* (2019).

A área de interesse no mapa apresentado (CA) refere-se a região de 01 corpo granítico que faz parte do Complexo Granítico de Cunhaporanga e apresenta uma extensão aproximada de 14km de comprimento e 7km de largura.

Devido às características mencionadas sobre a presença de radionuclídeos no solo a região de Carambeí despertou o interesse do Programa. Assim, uma investigação sobre a qualidade e composição da atmosfera, no quesito radiações ionizantes as quais os moradores desta região estão expostos em suas residências, foi proposta e como pesquisa complementar, a região de Santa Felicidade no município de Curitiba-PR, foi incluída.

Norteados pelo mapa da figura 7, em Carambeí, foi realizado um reconhecimento de campo em áreas rurais e urbanas contempladas pela pesquisa. Com base nos dados de reconhecimento, as possibilidades na área rural limitaram-se a 18 residências e na área urbana a 8 imóveis, e foi gerado um catálogo contendo os endereços dessas residências que poderiam fazer parte da pesquisa.

Em uma segunda visita à região, com a participação da Secretaria da Vigilância Sanitária do Município de Carambeí e através do catálogo as residências que poderiam fazer parte da pesquisa foram visitadas e foi feito o convite formal para cada morador responsável.

De acordo com a aceitação da população participaram da pesquisa no município de Carambeí 12 imóveis na área rural e 8 residências na área urbana. Foi definido o cronograma de instalação e retirada dos detectores nas residências para a pesquisa com base na disponibilidade dos moradores envolvidos, com o apoio da equipe da Secretaria da Vigilância Sanitária do município de Carambeí – PR em alinhamento com os pesquisadores do LFNA. Isto garantiu uma abordagem aos moradores de forma que compreendessem a importância da pesquisa, que colaborassem com as orientações gerais e principalmente, que a instalação de detectores de radiação não provocasse temor na população envolvida, promovendo uma parceria harmoniosa, desmistificando fatos relacionados a radiações, já que, para a população em geral o tema radioatividade é controverso.

Com base no número de residências que foram elencadas para a pesquisa em Carambeí a equipe do LFNA provisionou 40 detectores CR-39, que foram

inseridos individualmente em câmaras de difusão (montagem descrita na sequência).

Paralelamente a este planejamento, um cronograma de visitas para abordagem e convite para participação na pesquisa aos moradores da região de Santa Felicidade, no município de Curitiba- PR, instalação e retirada das câmaras de difusão, foi organizado pelos pesquisadores do LFNA. A aceitação pelos moradores nesta região contemplou 7 residências perfazendo um total de 15 câmaras de difusão montadas e instaladas posteriormente.

As ações contemplaram um total de quatro visitas e o período de coleta de dados se configurou de julho a outubro de 2019, no município de Carambeí com a equipe do LFNA e com a presença obrigatória de pelo menos um morador responsável por imóvel, para acompanhar a colocação e retirada das câmaras.

No mesmo período, de forma independente, na região de Santa Felicidade – Curitiba – PR, quatro visitas foram realizadas com pesquisadoras do LFNA e um representante responsável por imóvel, que contemplaram visita de convite, instalação e retirada das câmaras de difusão e apresentação dos resultados.

No Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR (LFNA/UTFPR) foi desenvolvida planilha de controle contendo nome do responsável, endereços e telefones.

3.2 Sistema de Detectores

Com base na experiência adquirida pelo Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR desde 2003, onde os artigos publicados pelo LFNA (CORRÊA, 2015; DEL CLARO, 2017) reforçam esta escolha e através da revisão bibliográfica feita, o método escolhido para aferir as concentrações de gás radônio em ambientes fechados foi o detector passivo de estado sólido (*Etched Track Detector*) CR-39.

Farias (2016) em sua Tese de doutorado, descreve como principal detector passivo de radônio o CR-39, reforçando o conceito de que um detector SSNTD (detector de estado sólido de traços nucleares) instalado em uma atmosfera que contenha radônio sofrerá danos em sua estrutura polimérica e que a densidade desses danos são visíveis por meio de traços criados no polímero através de

microscópio óptico após tratamento químico, este tratamento está detalhado neste trabalho no item 3.4.

Em seu estudo Rana (2018) relata a atenção e entendimento das interações da radiação ionizante com a matéria, onde partículas carregadas de energia MeV atingem um alvo isolante produzindo um pico de ionização na forma de traço o que reforça a alta sensibilidade presente nos detectores de estado sólido (SSNTDs) no que tange a detecção de partículas carregadas. Cita a aplicabilidade do CR-39, resina columbia #39, em diversos estudos de fissão nuclear, fragmentação nuclear de alta energia, raios cósmicos incluindo partículas raras como monopólio magnético, plasmas de fusão, fabricação de nanoestruturas e medição de radônio. E mantendo o foco em trabalhos na área de engenharia e ciência ao longo de 20 anos realizou mais de 50 estudos utilizando o CR-39.

Em 2019, pesquisa publicada pela *Public Health England*, através de trabalho comparativo entre tipos de detectores (CR-39, detectores de carvão ativado, e detectores de eletreto) realizado pelo Centro de Radiações, Perigos Químicos e Ambientais para a Saúde Pública da Inglaterra, ficaram validados três tipos de detectores como padrão A para determinar exposições individuais e médias do ser humano ao gás radônio. Salienta-se que o mais indicado para prazos maiores é o detector de radônio de trilha gravada passiva CR-39 (HOWARTH,2014).

Estudos realizados em diversos ambientes fechados para medição de concentrações de radônio seguem o modelo acima citado à exemplo de publicação feita pela *International Journal of Environmental Research and Public Health* em 2018 (VIMERCATI *et al.*, 2018).

Outros trabalhos atestam a eficácia do CR-39 tais como MELO, 1999; CORRÊA *et al.*, 2015; DEL CLARO *et al.*, 2017. Em revisão bibliográfica realizada por PANTELIC *et al.*(2018), países como Albânia (BODE TUSHE *et al.*, 2016), Dinamarca (ANDERSEN *et al.*, 2007), Grécia (NIKOLOPOULOS *et al.*, 2002), Hungria (HAMORI, 2006), Islândia (ENNOW *et al.*, 1982), Irlanda (FENNELL *et al.*, 2002), Itália (FENNELL *et al.*, 2009), Macedônia (STOJANOVSKA *et al.*, 2012), Montenegro (ANTOVIC *et al.*, 2007), Noruega (JENSEN *et al.*, 2004), Polônia (PRZYLIBSKI *et al.*, 2011), Romênia (COSMA *et al.*, 2009), Federação Russa (MARENENY *et al.*, 1996), Sérvia (UDOVICIC *et al.*, 2016), Turquia (KOKSAL, 2004) utilizaram em suas medições o CR-39. O quadro

1 constante do capítulo 2 desta dissertação evidencia o trabalho desenvolvido por Pantelic (2018) que reuniu essa revisão literária de 40 países onde 16 deles optaram pelo CR-39.

Em sua tese Del Claro (2016), justifica a escolha do CR-39 para ambientes fechados por considerá-lo o melhor modelo para medidas de longo prazo, fácil de manusear, com custo baixo, fácil instalação e ser adequado para marcar os traços de radônio por apresentar sensibilidade adequada. As partículas alfas resultantes do decaimento do gás radônio interagem com o polímero provocando um dano na estrutura, dano este conhecido com traço, após tratamento químico e leitura microscópica. Com a contabilização dos traços e cálculos matemáticos é possível inferir a concentração média de ^{222}Rn naquele ambiente.

Desta forma, a partir dos estudos sobre o CR-39 e do seu uso estabelecido no LFNA, este trabalho adotou esse detector como base nas medições. O conjunto de detectores adotado contempla um detector de policarbonato SSNTD (CR-39), um filtro de papel de borossilicato e uma câmara de difusão.

A figura 8 apresenta os componentes do conjunto de detecção. O detector atende a padronização de 1cm^2 de área útil e a câmara permite acoplamento de filtro de borossilicato (fibra de vidro) com 37mm de diâmetro. A câmara de difusão apresenta volume sensível de $7,1\text{cm}^3$ e diâmetro de 3cm. Na montagem o detector é colocado na parte interna da tampa da câmara posterior ao filtro, e com a parte sensível voltada ao interior da mesma.

Figura 9- Elementos que fazem parte do conjunto de detecção de radônio utilizado nesta pesquisa



Fonte: Del Claro (2013).

O CR-39 é um detector de polímero pertencente a família de SSNTD, conhecido como detector de trilha nuclear, sensível à radiação alfa, com estabilidade e alto grau de transparência óptica sendo preferencialmente indicado em pesquisa com períodos maiores e em ambientes internos considerando seu fácil manuseio (instalação e retirada), baixo custo e a não interferência na rotina dos moradores.

Importante ressaltar que os traços feitos pela partícula alfa ficam registrados nas duas superfícies do CR-39, no entanto no momento da leitura são considerados os traços somente da face voltada para a parte interna da câmara desconsiderando a face voltada para o filtro de borossilicato, este critério foi adotado considerando a maior uniformidade dos traços na superfície voltada para a parte interna da câmara com menor quantidade de sobreposição e por ser a face do detector que recebe, provavelmente, menor número de traços resultantes das partículas alfa emitidas por decaimento dos filhos do radônio ou resultantes de grupos de radionuclídeos diferentes unidos a partículas de aerossóis, que foram possivelmente barradas pelo filtro de fibra de vidro.

O prazo de 90 dias para que os detectores fiquem instalados se justificam para que variações do fluxo do ^{222}Rn no ambiente sejam consideradas, normalmente ocasionadas por alterações na temperatura, umidade e circulação de ar (WHO, 2009). O detector está calibrado para a energia alfa liberada pelo decaimento do ^{222}Rn , o sistema de calibração foi realizado em um trabalho desenvolvido pela UTFPR, CDTN/CNEN (Centro de desenvolvimento de Tecnologia Nuclear/Comissão Nacional de Energia Nuclear), UFRN (Unidade Federal do Rio Grande do Norte) e IRD (Instituto de Radioproteção e Dosimetria do Rio de Janeiro) (DEL CLARO, 2013).

Na figura 9 pode ser observado que cada detector possui um número de série que foi relacionado à uma câmara para controle. A área do detector considerada útil foi de 1 cm^2 , os fabricantes prepararam o detector com esta área bem definida garantindo assim uma boa varredura tendo uma boa repetitividade (CORRÊA, 2011).

Figura 10- Detector CR-39

Fonte: Autoria própria (2020).

O filtro de papel deborossilicato (fibra de vidro) GF 52°C, é colocado na tampa de cada câmara garantindo a barreira de ocorrência de aerossóis do meio externo.

A câmara de difusão é formada por uma estrutura de fibra de carbono de alta condutividade elétrica, isto possibilita que produtos do decaimento do ^{222}Rn fiquem, na maioria das vezes, aderidos na parede da câmara e diminuindo sua deposição no CR-39, a câmara de difusão fechada isola o CR-39 em relação ao meio ambiente e juntamente com o filtro excluem as ocorrências de decaimento no ambiente externo permitindo a entrada somente do gás radônio por difusão (HOWARTH, 2014).

A câmara de difusão montada e identificada numericamente foi incluída na planilha de controle contendo dados como o número do detector, nome do proprietário, endereço, data e horário da instalação da câmara, data e horário da retirada da câmara, local dentro do imóvel onde a câmara foi instalada, coordenadas geográficas e observações pertinentes. As planilhas contendo todas as informações relacionadas às instalações tem o objetivo de precisar o local da instalação garantindo ações pontuais necessárias se as concentrações ultrapassassem valores recomendados pelas agências reguladoras.

Na figura 10 a câmara está sendo montada o filtro está na parte interna da tampa da câmara, o CR-39.

Figura 11- Câmara de difusão aberta, filtro de papel GF 52°C e detector CR-39



Fonte: Aatoria Própria (2020).

Após o fechamento da câmara, a mesma foi numerada e a associação do detector à câmara e ambos à relação contendo os pontos de instalação garantindo que as leituras feitas posterior à pesquisa sejam fiéis ao ponto onde as amostras foram coletadas, conforme apresenta a figura 11.

Figura 12- Câmara de difusão montada e identificada através de numeração



Fonte: Aatoria Própria.

No LFNA/UTFPR, foram montados 57 detectores, sendo destinados 02 detectores para cada residência, e preferencialmente distribuídos entre sala e quarto de dormir, onde habitualmente as famílias costumam passar a maior parte do tempo.

Ao município de Carambeí foram disponibilizadas 40 câmaras de difusão, no bairro de Santa Felicidade na cidade de Curitiba foram destinados 15 câmaras de difusão e 02 detectores ficaram armazenados como BG no LFNA/UTFPR.

O trabalho de montagem das câmaras começa com a limpeza das câmaras de difusão, vazias e desmontadas, submersas em banho de ácido etileno diamino tetra acético (EDTA), por 24 horas, com o objetivo de remover partículas de poeira ou quaisquer outras substâncias que possam ter aderido nas paredes das câmaras, e que venham interferir no registro de traços no CR-39. Após 24 horas de submersão em EDTA elas são secas com folhas de papel absorvente. A partir deste momento inicia o processo de montagem, identificação e correlação das câmaras com planilhas de controle no LFNA/UTFPR.

3.3 Instalação e Retirada dos Detectores

As instalações foram realizadas pelos pesquisadores em visita local, atendendo as normas já validadas nos trabalhos realizados anteriormente pelo LFNA/UTFPR, de acordo com cronograma previamente agendado e com os moradores e concomitante à instalação os moradores receberam as orientações necessárias para garantir a coleta adequada dos dados. Todas as informações como data e horário, endereço e local das instalações foram anotadas em planilha para controle. Em atendimento ao protocolo criado pelo LFNA/UTFPR, os procedimentos para a instalação foram:

- Dois detectores foram instalados em cada residência, preferencialmente um detector na sala e um no quarto de dormir.
- O detector deve ser instalado distante de janelas e portas externas.
- Os detectores foram instalados aproximadamente 1,5 metros do piso, altura relativa a atmosfera inspirada pelo ser humano.
- O tempo de exposição estabelecido foi de 90 a 95 dias, de acordo com a disponibilidade de cada morador para a instalação e retirada das câmaras.
- Aos moradores, colaboradores ou pessoas que possam ter contato com o detector foram entregues carta contendo as seguintes orientações:
 - Não é permitida a abertura do detector.
 - Não é permitida a troca de local que o detector for instalado.
 - A limpeza do local, se for necessária, deverá ser feita apenas com um espanador para retirada do pó, não usar água ou produtos de limpeza.

Uma câmara de detecção montada com o CR-39 em seu interior e instalada em uma mesa de aproximadamente 1,20 cm de altura em uma residência no município de Carambeí, em um dos locais monitorados nesta pesquisa esta apresentado na figura 13.

Figura 13- Câmara de detecção montada e instalada



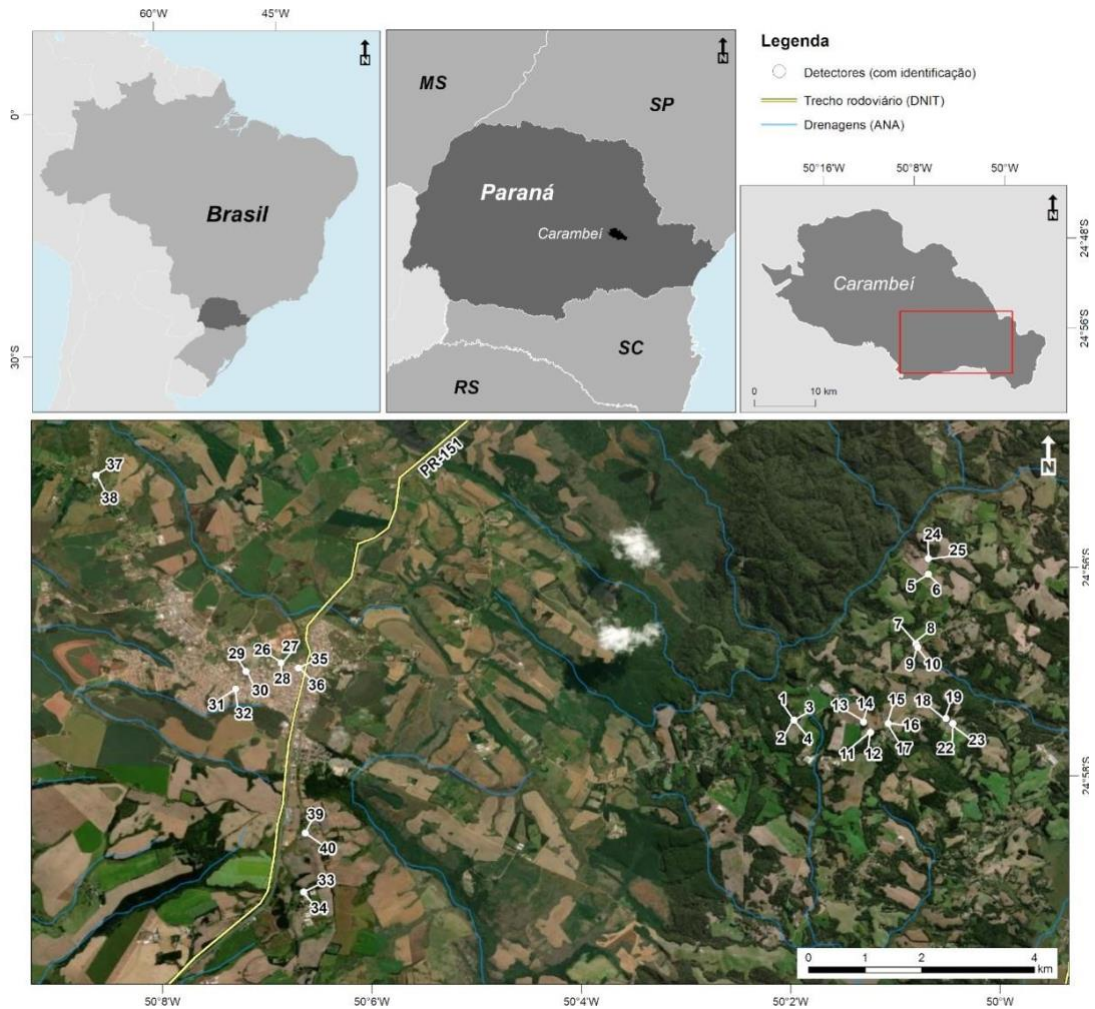
Fonte: Autoria Própria.

As instalações foram realizadas pelos pesquisadores em visita local, atendendo as normas já validadas nos trabalhos realizados anteriormente pelo LFNA/UTFPR, de acordo com cronograma previamente agendado com os moradores e concomitante a instalação os moradores receberam as orientações necessárias para garantir a coleta adequada dos dados.

As câmaras montadas com os respectivos detectores foram numeradas e o número das câmaras, data, horário e local de instalação dentro das residências, características da construção foram incluídas na planilha de controle do LFNA e relacionadas com os dados anteriores, e com as coordenadas geográficas.

As câmaras numeradas foram destinadas a região de Carambeí e podem ser observados na figura 14, onde pontos numerados de 01 a 40 indicam a localização dos detectores no município de Carambeí – PR.

Figura 14- Mapa contendo a indicação dos pontos onde foram instalados os detectores n município de Carambeí - PR

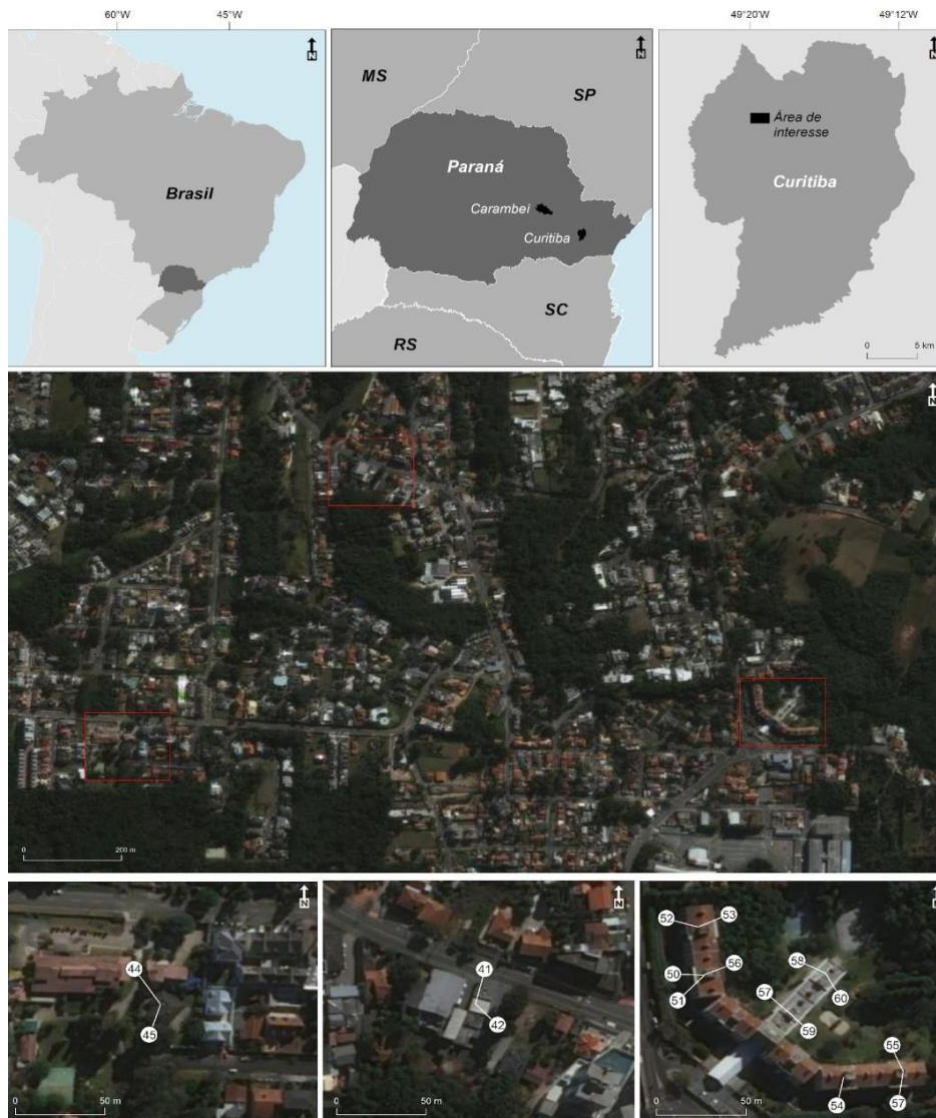


Fonte: Autoria Própria.

As câmaras com números 41, 42, 44, 45 e de 50 a 60 foram destinadas a região de Santa Felicidade, totalizando as 15 câmaras montadas com seus respectivos detectores e sua posição geográfica podendo ser observada na figura 14. Os números neste mapa representação os pontos de instalação dos detectores no bairro de Santa Felicidade, município de Curitiba – PR.

Da mesma forma que no município de Carambeí uma planilha de controle foi desenvolvida pelo LFNA e destinada para a pesquisa no município de Curitiba- PR contendo número da câmara, detector, endereço, morador responsável, característica da construção da residência, foram complementadas com informações da data, horário e local da instalação do detector no interior da residência, latitude e longitude de cada ponto de instalação e podem ser observadas na figura 15.

Figura 15- Mapa com a marcação dos pontos de instalação no bairro de Santa Felicidade – Curitiba - PR



Fonte: Autoria Própria.

Neste trabalho os períodos mínimos e máximos para que os detectores permanecessem instalados na residência, foram 90 e 95 dias respectivamente, tempo suficiente para que os detectores colem os dados necessários e evita a sobreposição de traços (CORRÊA, 2011).

A retirada das câmaras de difusão nas residências cumpriu o cronograma pré-definido, a data e horário da retirada foram anotadas na planilha.

As câmaras foram conduzidas ao LFNA/UTFPR, desmontadas e o detectores foram preparados para a revelação.

3.4 Revelação e Leitura dos Detectores

A revelação dos detectores é realizada por meio de tratamento químico, os detectores são depositados em uma solução de 6,25 M de NaOH acrescido 2% em volume de álcool etílico, a uma temperatura de 70°C, em banho-maria por 14 horas (CORRÊA, 2011), decorrido este tempo os mesmos passam pro ducha de água corrente e seco com papel absorvente garantindo a interrupção da revelação.

Concluída a revelação química inicia-se a leitura manual dos detectores através de microscópio com aumento óptico de 100 vezes, com o acessório de uma tela de divisão de área de visualização e o auxílio de um contador automático.

A leitura dos traços nos detectores feita no LFNA/UTFPR foi registrada na figura 16.

Figura 16- Processo de leitura no microscópio óptico (LFNA)



Fonte: Autoria própria.

A visualização de uma área após a revelação de um detector no microscópio com aumento de 100 vezes pode ser verificado na figura 17. Nesta imagem a visualização corresponde a 1/100 do detector, por meio de uma grade quadriculada em mm², facilitando a delimitação da contagem para posterior contabilização.

A contabilização dos traços foi feita por meio de leitura de área específica do detector e o erro estatístico na leitura dos traços foi estabelecido.

Figura 17- Visualização de 1mm² do detector CR-39 com a grade



Fonte: Autoria própria.

A equação de calibração dos detectores do estado sólido CR-39 foi o resultado de um trabalho realizado pela UTFPR, CDTN/CNEN, IRD/CNEN, UFRN, conforme citado anteriormente, permitindo cálculos de concentração de radônio em ambientes fechados (IAEA, 2017).

A relação entre o número de traços lidos no detector CR-39 e a concentração de gás radônio, com base na curva de calibração construída após experimento citado anteriormente, está representada na equação a seguir.

$$C = (405 \pm 30)n(Bq.cm^2.h.m^{-3})$$

Sendo: C a concentração de gás radônio (Bq/m³) do ambiente interno medido e n é a densidade de traços/hora de exposição obtidos em 1cm² do detector lido, com erro associado propagado no cálculo da concentração final.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Medições *Indoor*

4.1.1 Concentração de Radônio nas Residências na Região de Carambeí- PR

O número de traços resultantes da radiação alfa nos detectores lidos no LFNA através de microscópio óptico foram registrados na Tabela 6 e estão relacionados com o número de câmara de difusão e detectores respectivos.

Tabela 6- Números de traços lidos nos detectores CR-39 do município de Carambeí

CÂMARAS	DETECTOR	Nº de traços (efetivo) Valor médio por 1 cm ²	Erro (efetivo) nº de traços em 1 cm ²
1	8374429	1790	140
2	8374430	1630	130
3	8374431	1780	140
4	8374432	1750	140
5	8374433	2080	150
6	8374434	1910	140
7	8374435	1590	130
8	8374436	1790	140
9	8374437	1780	140
10	8374438	1770	140
11	8374582	2720	170
12	8374446	2460	160
13	8374448	1970	150
14	8374583	2110	150
15	8373235	1970	150
16	8374447	1640	130
17	8374660	1920	140
18	8374527	1820	140
19	8374374	1650	130
22	8374553	1700	140

23	8374612	2440	160
24	8374387	1590	130
25	8374439	7350	270
26	8374723	1790	140
27	8374722	1510	130
28	8374721	1710	140
29	8374619	1820	140
30	8374412	1910	140
31	8374620	1790	140
32	8374618	2010	150
33	8374584	2000	150
34	8374445	1820	140
35	8374415	2010	147
36	8374414	1780	140
37	8374413	1990	150
38	8374724	1650	130
39	8374733	2080	150
40	8374732	1790	140

Fonte: Autoria própria.

As concentrações de radônio nos ambientes foram calculadas a partir da contabilização dos traços nos detectores com respectivos erros sistemáticos e aleatórios analisados. Na tabela 6 estão apresentados os números de traços de partículas alfa nos detectores CR-39 por cm^2 e erros associados. Ressalta-se que o tratamento estatístico permitiu a propagação dos erros para as concentrações, obtidas pela equação 3.1.

Das 40 câmaras de difusão destinados ao município de Carambeí, duas foram excluídas da pesquisa, são elas as câmaras números 20 e 21, os moradores mudaram de imóvel durante o período da coleta de dados e levaram consigo as câmaras. As concentrações e erros associados por ponto instalado, através do tratamento de dados conforme Equação 3.1, apresentando valores finais das concentrações após desconto dos valores encontrados nos dois detectores de background podem ser observados na Tabela 7.

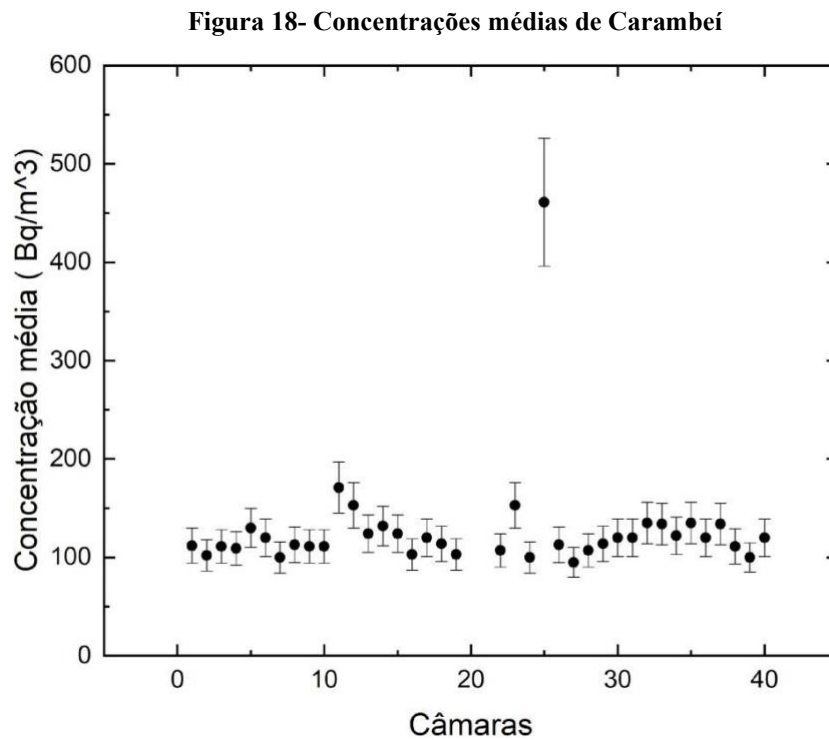
Tabela 7- Concentração de gás radônio em ambientes residenciais no Município de Carambei

Câmara	Latitude	Longitude	Tempo de exposição (horas)	Concentração média (Bq/m ³)	Erro (Bq/m ³)
1	24°57'28"	50°01'58"	2261	112	18
2	24°57'28"	50°01'58"	2261	102	16
3	24°57'28"	50°01'58"	2261	111	17
4	24°57'28"	50°01'58"	2261	109	17
5	24°56'04"	50°00'41"	2260	130	20
6	24°56'04"	50°00'41"	2260	120	19
7	24°56'44"	50°00'48"	2260	100	16
8	24°56'44"	50°00'48"	2260	113	18
9	24°56'46"	50°00'47"	2260	111	17
10	24°56'46"	50°00'47"	2260	111	17
11	24°57'35"	50°01'14"	2281	171	26
12	24°57'35"	50°01'14"	2281	153	23
13	24°57'29"	50°01'18"	2259	124	19
14	24°57'29"	50°01'18"	2258	132	20
15	24°57'30"	50°01'04"	2259	124	19
16	24°57'30"	50°01'04"	2259	103	16
17	24°57'30"	50°01'04"	2259	120	19
18	24°57'27"	50°00'31"	2260	114	18
19	24°57'27"	50°00'31"	2259	103	16
22	24°57'30"	50°00'27"	2257	107	17
23	24°57'30"	50°00'27"	2257	153	23
24	24°55'55"	50°00'41"	2256	100	16
25	24°55'55"	50°00'41"	2256	461	65
26	24°56'55"	50°06'52"	2253	113	18
27	24°56'55"	50°06'52"	2257	95	15
28	24°56'55"	50°06'52"	2257	107	17
29	24°57'00"	50°07'12"	2259	114	18
30	24°57'00"	50°07'12"	2259	120	19
31	24°57'10"	50°07'18"	2112	120	19
32	24°57'10"	50°07'18"	2112	135	21
33	24°59'07"	50°06'39"	2113	134	21
34	24°59'07"	50°06'39"	2113	122	19
35	24°56'58"	50°06'42"	2113	135	21
36	24°56'58"	50°06'42"	2113	120	19
37	24°55'07"	50°08'38"	2112	134	21
38	24°55'07"	50°08'38"	2112	111	18
39	24°58'33"	50°06'38"	2113	100	15
40	24°58'33"	50°06'38"	2113	120	19

Fonte: Autoria própria.

Dos 38 detectores analisados observa-se que 37 variam de $95 \pm 15 \text{Bq/m}^3$ a $171 \pm 25 \text{Bq/m}^3$, mas a câmara número 25 apresenta uma concentração de $461 \pm 65 \text{Bq/m}^3$, ultrapassando o limite de segurança 300Bq/m^3 recomendado pela ICRP (ICRP, 2014).

A representação gráfica dos resultados das concentrações médias de ^{222}Rn e o erro calculado na região de Carambeí podem ser observados na figura 18.



Fonte: Autoria Própria.

4.1.2 Concentrações de Radônio nas Residências na Região de Curitiba - PR

No segundo local de pesquisa, o bairro de Santa Felicidade no município de Curitiba Paraná, as informações brutas contendo traços lidos no LFNA fazem parte tabela 8 e estão relacionados com o número de câmara de difusão e detectores respectivos.

Tabela 8- Números de traços lidos nos detectores CR-39 em Curitiba - PR

CÂMARAS	DETECTORES	Nº médio de traços 100 mm ² (com Bg)	Erro do nº de traçosem em 100 mm ²
41	8374731	1780	140
42	8374730	2190	150
44	8374729	1890	140
45	8374728	1970	150
50	8374423	1380	120
51	8374424	1600	130
52	8374425	2270	156
53	8374426	1560	130
54	8374449	2040	150
55	8374450	1840	140
56	8374451	1800	140
57	8374452	1870	140
58	8374454	1960	150
59	8374453	1760	140
60	8374593	1560	130

Fonte: Autoria própria.

As concentrações e erros associados por ponto instalado, com respectivas coordenadas podem ser observados na Tabela 9. O erro associado foi obtido através do tratamento de dados conforme Equação 3.1. Os valores finais das concentrações médias foram obtidos após desconto dos valores encontrados nos detectores de background.

Tabela 9- Concentração de ²²²Rn em ambientes residenciais em Curitiba - PR

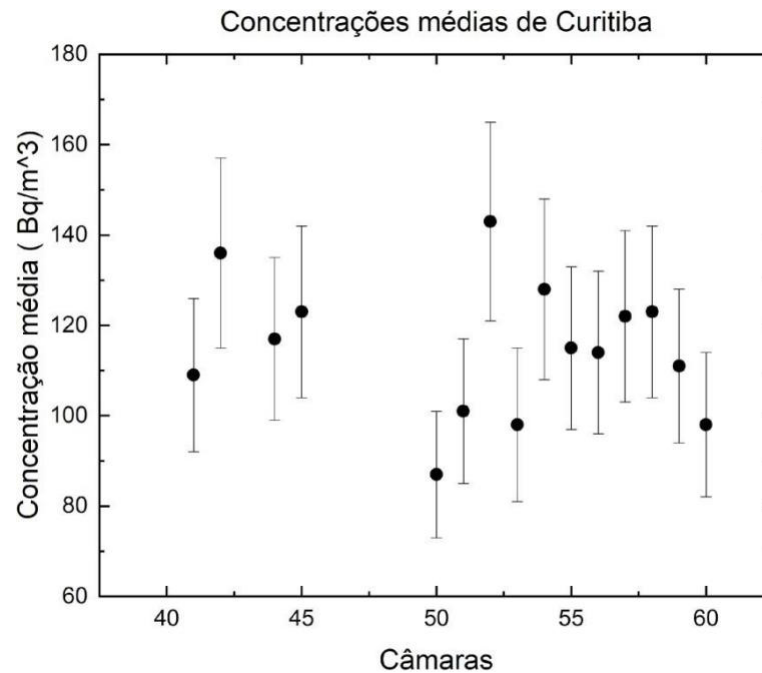
Câmara	Latitude	Longitude	Tempo de exposição (Horas)	Concentração (Bq/m ³)	Erro da Concentração (Bq/m ³)
41	-25,41704670000	-49,32637580430	2281	109	17
42	-25,41704670000	-49,32637580430	2281	136	21
44	-25,42231330380	-49,33084841510	2281	117	18
45	-25,42231330380	-49,33084841510	2281	123	19
50	-25,42150656710	-49,31925323400	2255	87	14
51	-25,42150656710	-49,31925323400	2255	101	16
52	-25,42125091170	-49,31928451850	2256	143	22
53	-25,42125091170	-49,31928451850	2256	98	17
54	-25,42204224430	-49,31855232310	2256	128	20
55	-25,42201292860	-49,31825383630	2256	115	18
56	-25,42150656710	-49,31925323400	2256	114	18
57	-25,42201292860	-49,31825383630	2256	122	19
58	-25,42149457440	-49,31864426770	2256	123	19
59	-25,42169578640	-49,31883748460	2257	111	17
60	-25,42149457440	-49,31864426770	2256	98	16

Fonte: Autoria Própria.

As 15 câmaras instaladas nas residências no bairro de Santa Felicidade em Curitiba – PR, apresentaram um resultado final com concentrações variam de $87 \pm 14 \text{ Bq/m}^3$ a $143 \pm 22 \text{ Bq/m}^3$, todos os valores abaixo do limite recomendado pela ICPR de 300 Bq/m^3 (ICPR, 2014). Além disso, os valores encontram-se compatíveis com os dados da UNSCEAR (2000), citados no gráfico 1 desta dissertação.

A representação gráfica dos resultados das concentrações médias de ²²²Rn e o erro calculado na região de Curitiba podem ser observados na figura 19.

Tabela 10- Concentrações médias de Curitiba



Fonte: Autoria Própria.

4.2 Orientações para ações mitigatórias

O gás radônio pode penetrar em ambientes residências pois a pressão do ar existente no solo onde se encontra esta construção é maior que a pressão do ar na residência, criando uma diferença de pressão, fazendo com que a casa atue como uma espécie de vácuo. Com isso, o ar e seus componentes, entre eles o gás radônio, acabam sendo sugados do solo para dentro das residências por meio de pequenas fissuras nas fundações, rachaduras nos pisos, fendas ao redor de cabos ou canos (EPA, 2000).

São diversas as soluções para minimizar o nível de concentração do gás radônio em ambiente internos. A ação imediata a ser feita é utilizar materiais que proporcionem um lacre hermético permanente fechando todas fendas ou aberturas citadas, que possam permitir a entrada do ar. Em aberturas maiores recomenda-se o uso de argamassa que não encolha ou materiais de espuma expansiva. Em brechas menores ou juntas utilizar material como selante elastomérico (MEDEIROS *et al.*, 2007).

Segundo Medeiros *et al.*, (2007), alguns métodos são sugeridos, considerando as experiências já validadas em países que fazem o controle de gás radônio em ambientes fechados tais como:

- Aumentar a circulação de ar na parte interna da construção, fazendo com que o radônio que adentra o ambiente seja liberado.
- Na parte inferior ao piso, promover uma ventilação de ar, fazendo com que o volume de gás que entraria na construção diminua.
- Instalar sistema de ventilação específico no sótão gerando uma pressurização positiva (pressão interna ligeiramente positiva em relação a área externa da residência impedindo a entrada de gás).
- Construir uma cavidade, com diâmetro aproximado de 40 cm, no solo imediatamente abaixo da laje do piso, anexando um cano posicionado verticalmente acompanhando toda a altura da construção para que o gás percorra o cano e seja liberado para o lado de fora da construção, onde dispersará naturalmente sem promover danos à saúde pública (despressurização do sub-piso).

5 CONCLUSÃO

Com relação aos níveis de concentração do gás radônio em residências na região de Carambeí, os resultados das medições realizadas na região foram feitas em locais com base nos mapas fornecidos pelo Programa de Risco de Radônio para o Brasil, utilizando os detectores CR-39. Os resultados encontram-se em sua grande maioria inferiores aos índices de segurança recomendado pelo ICRP (300Bq/m^3). As concentrações médias das 38 câmaras instaladas neste município ficaram na faixa de $95\pm 15\text{Bq/m}^3$ a $171\pm 25\text{Bq/m}^3$ e apenas 1 (2,63%) ultrapassou os níveis recomendados apresentando uma concentração média de $461\pm 65\text{Bq/m}^3$, o que sugere a proposta de ação mitigatória.

No município de Curitiba, na região de Santa Felicidade, as concentrações médias ficaram na faixa de $87\pm 14\text{Bq/m}^3$ a $143\pm 22\text{Bq/m}^3$, todas estão dentro dos parâmetros de segurança orientados pelas agências reguladoras e compatíveis com os dados obtidos na revisão da literatura.

Neste trabalho embora considerada uma amostra ainda pequena, obteve-se nas duas regiões estudadas um resultado médio de concentrações de ^{222}Rn abaixo da faixa da normalidade (200Bq/m^3), entretanto um ponto chamou a atenção por transpor a faixa da normalidade e do limite máximo (300Bq/m^3) recomendado pela UNSCEAR e ICPR, sugestionando a necessidade de intervenção com ações mitigatórias. O fato de um ponto transpor os limites recomendados de segurança, fundamenta a necessidade de ser conhecer as concentrações médias de ^{222}Rn em ambientes residenciais, e a implementação de soluções simples e de baixo custo podem minimizar a exposição.

Foi preparado um parecer com resultados particulares e recomendações mitigatórios aos moradores participantes da pesquisa. Os dados obtidos podem ser utilizados pelo Programa Nacional de Radônio, como base de dados para posteriores ações. A revisão literária indica a preocupação em diversos países inclusive no Brasil, pelo meio governamental e científico, em conhecer a que níveis de exposição à radiação natural o ser humano está exposto.

Os efeitos nocivos relacionados à exposição à radiação natural de diversas fontes como atmosfera, água, solo e alimentos incentivam a comunidade científica

a coletar e avaliar dados sobre níveis e efeitos destas radiações ionizantes nos seres vivos.

A relação da exposição humana ao gás radônio em ambientes fechados e o câncer de pulmão é uma questão de saúde pública, conforme estudos realizados.

Estes resultados contribuem para o estabelecimento de uma política de quantificação das concentrações de radônio em residências e pode auxiliar os órgãos governamentais brasileiros numa política voltada a saúde do povo brasileiro no que tange a exposição a radiação natural em ambientes fechados, estabelecendo critérios para a quantificação das concentrações de radônio em residências a que a população brasileira esta exposta.

REFERÊNCIAS

AFONSO, J.C. RADÔNIO, Vol.32 n°4, revista **Química Nova na Escola** (QNEsc) 2009. Disponível em: qnesc.sbq.org.br/online/qnesc32_4/09-EQ10909.pdf

ANTONELLI F., LPGA-UFPR; FERREIRA FJF, LPGA-UFPR. **Annual effective and air absorbed doses based on airborne and ground gamma-ray spectrometry: Serra do Carambeí and Joaquim Murtinho granites, southern Brazil**, SBGf – Sociedade Brasileira de Geofísica. 2019

ARAÚJO, G.S. **Estudos dos Níveis de Emissão do ^{222}Rn de Alguns Materiais de Construção Civil e Áreas Públicas**. 2003. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

CAMARGO, I.M.C. **Determinação da Concentração dos Isótopos Naturais de Urânio e Tório em Amostras de Água**. 1994. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 1994.

CAMPUS, Thomas Ferreira da Costa. **Conseqüências do Gás Radônio na Saúde Humana**. Laboratório de Radioatividade Natural do Rio Grande do Norte da UFRN. (2010) .

CARNEIRO, C. D. R.; MIZUSAKI, A. M. P.; ALMEIDA, F. F. M. de. **A determinação da idade das rochas. Terra e Didática**, Campinas, SP, v. 1, n. 1, p. 6–35, 2015.

CELA – Canadian Environmental Law Association Radon in Indoor Air: A review of Policy and Law in Canada. **Canadian environmental Law Association**. 2014.

CHOI, J.R.; PARK, S.Y.; NOH, O.K.; KOH, Y.W.; KANG, D.R. **Gene mutation discovery research of non-smoking lung cancer patients due to indoor radon exposure**. *Annals of occupational and Environmental Medicine*, 2016. DOI: 10.1186/s40557-016-0095-2.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. N3.01/005 **Restrição de dose, níveis de referência ocupacionais e classificação de áreas**. 2011. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>. Acesso em: Janeiro/2021.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Posição Regulatória 3.01/007. Níveis de intervenção e de ação para exposição crônica**. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

CORRÊA, J. N.; DEL CLARO, F.; PASCHUK, S. A.; PERNA, A. F. N.; DENYAK, V.; SCHELIN, H.R.; ROCHA, Z.; SANTOS, T.O. Radon Monitoring at Workplaces of Curitiba, PR (Brazil). In: **XXXV Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil**, 2012, Maresias, SP. XXXV RTFNB - Abstracts. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física - SBF, 2012. v. 1.

CORRÊA, J.N. **Avaliação da concentração de gás radônio em ambientes de convívio humano na região metropolitana de Curitiba**. 2006. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

CORRÊA, J.N. **Avaliação dos Níveis de Concentração de Radônio em Ambientes e Águas de Poços no Estado do Paraná**. 2011. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

CORRÊA, J.N.; PASCHUK, S.A.; KAPPKE.; PERNA, A.F.N.; FRANÇA, A.C.; SCHELIN, H.R.; DENYAK, V.; **Measurements of ^{222}Rn activity in well water of the Curitiba metropolitan area (Brazil)**, Radiation Physics and Chemistry vol. 104, pages 108-111, 2014.

CORRÊA, J.N.; KAPPKE, J.; DENYAK, V.; SCHELIN, H.R.; DEL CLARO, F.; PERNA, A.F.N.; REQUE, M.; ROCHA, Z.; SANTOS, T.O. **Monitoramento da radioatividade alfa relacionada ao radônio-222 em águas de poços da região metropolitana de Curitiba (PR)**. 2015.

COSTA, L. J. P. **Estudo da exalação de radônio em placas e tijolos de fosfogesso de diferentes procedências**. 2011. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear - Aplicações – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011.

DEL CLARO, F. ; PASCHUK, S.A. ; CORRÊA, J.N. ; DENYAK, V. ; KAPPKE, J. ; PERNA, A.F.N. ; MARTINS, M.R. ; SANTOS, T.O. ; ROCHA, Z. ; SCHELIN, H.R. . **RADIOISOTOPES PRESENT IN BUILDING MATERIALS OF WORKPLACES. RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY** , v. 140, p. 141-145, 2017.

DEL CLARO, F. **Proposta de protocolo para medição de concentrações de radônio proveniente de rochas graníticas em marmorarias**. 2016. 125f. Tese- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

DEL CLARO, F.; PASCHUK, S.A.; CORRÊA, J.N.; ROCHA, Z.; KAPPKE, J.; PERNA, A.F.N.; SCHELIN, H.R.; SANTOS, T. O. **Indoor Radon Measurement in Dwellings and Workplaces of Curitiba Urban Area (Brazil)**. In: International Nuclear Atlantic

Conference-INAC, 2011, BeloHorizonte. Abstracts and Papers of 2011 International Nuclear Atlantic Conference - **INAC 2011**. Rio de Janeiro:ABEN,2011.

DUBOIS, G.; BOSSEW, P.; TOLLEFSEN, T. **First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map**. Journal of Environmental Radioactivity. Vol 101, Issue 10, 2010, Page 786-798.

Dunn, B.; Cooper, K. **Radon in Indoor Air: A Review of Policy and Law in Canada**. Canadian Environmental Law Association. November, 2014.

EISENBUD, M; GESSEL, T. **Environmental Radioactivity From Natural, Industrial, and Military Sources**. 4 ed. California, USA: Academic Press, 1997. environmental problems. 1992. 2º Ed. Oxford. Claredon Press. 571p.

EPA - Environmental Protection Agency, Building Radon Out, **Office of Air and Radiation**, USA, pp.84 (2001).

EPA - Environmental Protection Agency.National primary drinking water regulations; radionuclides; final rule. v. 65, n. 236. Washington, D.C, 2000

EPA, United States Environmental Protection Agency - How to protect your family from radon when buying a newly built home, 2020.

FARIAS, E.E.G. **Exalação de ^{222}Rn em solos: Paramêtros para Modelagem e Métodos de Determinação** Tese- Programa de Pós- Graduação Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.

GAVIOLI, Y; CORREIA, J; CARANASSIOS, A; RIBEIRO, R.; MELO, V. **Emissão de radônio em rochas ornamentais**. XXIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Centro de Tecnologia Mineral- CETEM –RJ, 2009.

GERALDO, L.P.; SANTOS, V.; MARQUES, A.L.; BOTARI, A. **Medidas dos níveis de radônio em diferentes tipos de ambientes internos na região da Baixada Santista-SP**. Radiol Bras.v.38, n 4, p.283-6, 2005.

GUSMÃO FILHO, J.A. **Solos: Da Formação Geológica ao Uso na Engenharia**. EditoraUniversitária UPFE: Pernambuco. 2 ed.v. 1, p.3– 8, 2008.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentals of Phisics Extended**, 5 ed., p. 1080 - 1083 USA: Wiley, 1997.

HOPKE, P. K.; BORAK, T. B.; DOULL, J.; CLEAVER, J. E.; ECKERMAN, K. F.;

HOWARTH, C.B. **Results of the 2014 Intercomparison of Passive Radon Detectores**, Public Health England, 2014.

HUANG, W., Besar, K., Lecover, R., Dulloor, P., Sinha, J., Josué, F., Hardigree, M., Pick, C., Swavola, J., Everett, A. D., Frechette, J., & Katz, H. E. (2013).

HULKA, J., VLCEK, J. THOMAS, J. **Natural radioactivity in building materials – Czech experience and European legislation.** International Symposium Las Vegas, 2008. Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists. NV, 2008.

IAEA – International Atomic Energy Agency. INIS - International Nuclear Information System – International Atomic Energy Cap. II **Fontes Naturais e Artificiais de Radiação Ionizante.**

IAG – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo – **Química e Geoquímica do Urânio.** Disponível em: <https://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/capitulo%202.pdf>.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. ICRP 126 – **Radiological Protection against Radon Exposure.** ICRP Publication 126. Ann. ICRP v. 43, n. 3, 2014.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. ICRP 65 – Protection Against Randon-222 at Home and at Work. **Oxford: Pergamob Press**, v.223, n.2, 1993.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. ICRP 126 – **Radiological Protection against Radon Exposure.** ICRP Publication 126. Ann. ICRP v. 43, n. 3, 2014.

INIS - International Nuclear Information System – International Atomic Energy Cap. II **Fontes Naturais e Artificiais de Radiação Ionizante.** Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073467.pdf

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. **Radioatividade no Meio Ambiente e Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental.** Divisão de Ensino – Secretaria de Pós Graduação, 2019.

IVANOVICH, M.; HARMON, R.S. Uranium series disequilibrium; Applications to environmental problems. 1992. 2º Ed. Oxford. Claredon Press. 571p.

KOVLER, K.; PEREVALOV, A.; STEINER, V.; METZGER, L. A. **Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part I – scientific background and testing of the cement and fly ash emanation.** *Journal of Environmental Radioactivity*. p 321-334. 2005.

LARANA – Laboratório de Radioatividade Natural do Rio Grande do Norte da UFRN. **Conseqüências do Gás Radônio na Saúde Humana.** (2010).. I, 1–11.

LINO, A.R.; ABRAHÃO, C.M.; AMARANTE, M.P.F.; CRUZ, M.R.S. **O papel da implementação depolíticas para a prevenção da exposição ao Radônio no Brasil.** 2015.

MACIOSKI, Gustavo; SOTO, Nicolli Talyta Arriagada; MAZER, Wellington; CORRÊA, Janini Nicolosi. **Avaliação dos níveis de concentração de radônio em marmorarias de Curitiba/PR.** Revista de Geologia, Fortaleza, v. 30, nº 1, p. 19-31, 2017.

MAGALHÃES, M.H.; AMARAL, E.C.S.; SACHETT, I.; ROCHEDO, E.R.R. Randon - 222 in Brazil:

an outline of indoor and outdoor measurements. *J EnvironRadioact.* v.67, 2003.

MARQUES, A.L.; GERALDO, L.P.; SANTOS, W. **Níveis de Radioatividade Natural Decorrente do Radônio no Complexo Rochoso da Serra de São Vicente, SP.** Radiologia Brasileira, 3 ed, v.39, p. 215 – 218, 2006.

MCKONE, T. E.; SEXTRO, R. G.; SIMON, S. L. **Health Risks Due to Radon in Drinking Water.** Environmental Science & Technology, v. 34, n.6, 2000.

MEDEIROS, F . C.; MATOSKI, A.; CORRÊA, J. N.; PASCHUK, S. A.; GIOVANNETTI, A. C. V. P.

Propostas de Ações de Mitigação de Radônio em Residências, 2007.

MELO, V. P. **Avaliação da Concentração de RadônioemResidências do Município de Monte Alegre-PA.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Biofísica, UFRJ. Rio de Janeiro, 1999.

MEREDITH, W. J. Report of the united nations scientific committee on the effects of atomic radiation.

International Journal of Radiation Biology, 12(1), 100–100. 1967.

NAZAROFF, W.W.;NERO Jr., A.V. (Eds.) (1988) **Radon and Its Decay Products in Indoor.**

Air.Wiley, New York, 65-69.

NIH – NATIONAL CANCER INSTITUTE – **Radiation – Radon . Radon and Cancer.** Disponível em: <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/radiation> , Acesso em 06.07.2021.

NNDC – National Nuclear Data Center. **Chart of Nuclides from Brookhaven National Laboratory**. Disponível em: www.nndc.bnl.gov/chart Acesso em: Agosto de 2020.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. **Físicas das Radiações**. Oficina de Textos: São Paulo. 1 ed. V.1, 2010.

OLIVEIRA, E. P. **Comparação De Técnicas Ativa E Passiva Na Medição De Concentração De Radônio (^{222}Rn) No Ar**. Dissertação de Mestrado, – IRD/CNEN na área Radioecologia. Rio de Janeiro, 2017.

OLIVEIRA, D.S. **Um estudo sobre o desequilíbrio radioativo da série do urânio em amostras de solo. 2006**. 79f. Dissertação–Instituto de Astronomia, Geofísica e C. Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PANTELIC, G; CELIKOVIC, I; ZIVANOVIC, M; VUKANAC, I; NIKOLIC, J. K.; CINELLI, G.; GRUBER, V. **Literature review of indoor radon surveys in Europe**. JRC Technical Reports, **European Commission** 2018. Disponível em ><https://core.ac.uk/download/pdf/168398811.pdf>.

PARK, T.H.; KANG, D.R.; PARK, S. H.; YOON, D. K.; LEE, C.M. **Indoor radon concentration in Korea residential environments**. Environmental Science and Pollution Research, 2018. Disponível em <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1531-3>

PERNA A. F. N. , PASCHUK S.A. , CORRÊA J. N. , NARLOCH D. C. , BARRETO R. C. , DEL CLARO F. , DENYAK V. **Exhalation rate of radon-222 from concrete and cement mortar**. 2018

RANA, M. A., **CR-39 nuclear track detector: An experimental guide, Nuclear Inst. and Methods in Physics research**, A. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.077>.

REIS, E.M.. **PROGRAMA DE INTEGRAÇÃO CNEN- PIC MÓDULO INFORMAÇÃO TÉCNICA**, 2003.

REIS, R.G. **NORM – Guia Prático**. 2016. 236 p.; 14 x 21cm. ISBN: 978-85-922211-0-2

SAKODA, A.; ISHIMORI, Y.; YAMAOKA, K. **A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock soil, Mill tailing and flyash**. Applied Radiation and Isotopes. v. 69, p. 1422-1435, 2011.

SANTOS, T. O. **Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2010.

SAPUCAIA, N.S.; ARGOLLO, R. M.; BARBOSA, J.S.F. **Teores de potássio, urânio, tório e taxa de produção de calor radiogênico no embasamento adjacente às bacias sedimentares de Camamu e Almada, Bahia, Brasil, 2005** Revista Brasileira de Geofísica.

SGB-CPRM, 2020, Serviço Geológico do Brasil, **CPRM**, 2020.
Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/publique/Noticias/Especialistas-debatem-riscos-do-gas-radonio-a-saude-como-indutor-de-cancer-6353.html>

TAUHATA, L., SALATI, I. P. A., DI PRINZIO, R., DI PRINZIO, M. A. R. **R.Radioproteção e**

dosimetria: Fundamentos - 9ª revisão novembro/2013 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN. 345p.

TAYLOR, D.M.; TAYLOR, S.K. **Environmental uranium and human health**. Rev Environ Health, v. 12, n. 3, p. 147-57, Jul-Sep 1997.

TOROK, S.; HEGEDUS, B.; LASZLO, V.; HODA, M. A.; GHANIM, B.; BERGER, W.; KLEPETKO,

W.; DOME, B. & OSTOROS, G. **Lung cancer in never smokers**. Published Online: 12 Oct 2011 TURNER, J. E. **Atoms, Radiation, and Radiation Protection**. 3ª ed. Wiley-VCH Verlag, 2007.

UNEP – United Nations Environment Programme **Radiação: efeitos e fontes**, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2016 publicada em IRD 2016

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Radiation from natural sources**, annex E. 1962. 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**, annex B, v. I, 2000. UNSCEAR report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces**, annex E, v. II, 2006.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, Anexo A, 2008. UNSCEAR report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR–United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation**, annex E, v. I, 2010. UNSCEAR report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR–United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation**, Sixty-fifth session , 2018. UNSCEAR report to the United Nations General Assembly.

VASCONCELOS, D.C. **Estudo da Radioatividade Natural em Areias de Praias do Extremo Sul da Bahia Utilizando Métodos de Análises Nucleares**, 2010. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

VEIGA, L.H.S.; KOIFMAN, S.; MELO, V.P.; AMARAL, E.C.S. **Preliminary indoor radon risk assessment at the Poços de Caldas Plateau, MG – Brazil**. Journal of Environmental Radioactivity, v. 70, p. 161-176, 2003.

VIMERCATI, L.; FUCILLI, F.; CAVONE, D.; DE MARIA, L.; BIRTOLO, F.; FERRI, G.M.; SOLEO,

L.; LOVREGGIO, P. **Radon Levels in Indoor Environments of the University Hospital in Bari- Apulia Region Southern Italy**. Int. J. Environ. Res. Public Health 2018.

WHO – World Health Organization. Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective, Switzerland: WHO press, 2009.

WHO – World Health Organization. Health Risk Assessment, Switzerland: WHO press, 2011.

WHO – World Health Organization. Radon and Health. 2004. Disponível em: <http://www.who.int/phe/radiation/en/2004Radon.pdf>. Acesso em: julho 2020.

APÊNDICE A – PARECER DAS MEDIDAS DE RADÔNIO EM RESIDÊNCIA (NORMAL)

**Ministério da Educação Universidade Tecnológica Federal do Paraná Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial**

Av. Sete de Setembro, 3165 –
80230-901 Curitiba – PR BRASIL

Ofício nº 25/07/2021

Curitiba, 25 de

julho de 2021. Ao Sr(a). XXXX

Endereço: XXXX

Referência: Medidas da Concentração de Radônio (^{222}Rn) na residência.

PARECER TÉCNICO (Modelo A)

1. Introdução

Com o objetivo de pesquisa, o Grupo do Laboratório de Radiações Ionizantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR realizou X medidas da Concentração de radônio (^{222}Rn) na residência situada à XXXXX, no Paraná. Assim, este parecer técnico tem como fim apresentar algumas considerações relevantes sobre os resultados encontrados.

2. Análise da Coleta de Dados

Vimos por meio desta, primeiramente, apresentar os agradecimentos pelo apoio e oportunidade de realizar nossa pesquisa sobre o gás radônio em ambientes. Os dados obtidos em sua residência contribuíram muito para nossos estudos e, conseqüentemente, para a compreensão das concentrações de radônio na região.

Comunicamos que, segundo os limites estabelecidos pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Ionizantes - UNSCEAR e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica - ICRP, a

concentração de gás radônio no interior de ambientes entre 0-200 Bq/m³ é considerada normal, de 200-400 Bq/m³ é tida como nível de atenção, de 400-600 Bq/m³ sugere-se uma monitoração continuada com ações mitigadoras e que acima do valor de 600 Bq/m³ recomenda-se intervenção para ação mitigadora. As medidas obtidas pelos Z detectores instalados em sua residência por um período aproximado de 93 dias apresentaram concentrações de radônio de XXX Bq/m³ e XXX Bq/m³. Consideramos que os valores obtidos estão dentro da normalidade, segundo os órgãos internacionais mencionados acima, e que não há recomendações quanto a possíveis ações mitigadoras a serem adotadas.

Agradecemos pela atenção e disponibilidade.

**APÊNDICE B – PARECER DAS MEDIDAS DE RADÔNIO EM
RESIDÊNCIA (ATENÇÃO)**

**Ministério da Educação Universidade Tecnológica Federal do Paraná Programa de Pós-
Graduação em Engenharia**

Elétrica e Informática Industrial

Av. Sete de Setembro, 3165 –
80230-901 Curitiba – PR BRASIL

APÊNDICE B

Ofício nº 25/07/2021

Curitiba, 25 de

julho de 2021. Ao Sr(a). XXXX

Endereço: XXXX

Referência: Medidas da Concentração de Radônio (^{222}Rn) na residência.

PARECER TÉCNICO (Modelo B)

1. Introdução

Com o objetivo de pesquisa, o Grupo do Laboratório de Radiações Ionizantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR realizou X medidas da Concentração de radônio (^{222}Rn) na residência situada à XXXXX, no Paraná. Assim, este parecer técnico tem como fim apresentar algumas considerações relevantes sobre os resultados encontrados.

2. Análise da Coleta de Dados

Vimos por meio desta, primeiramente, apresentar os agradecimentos pelo apoio e oportunidade de realizar nossa pesquisa sobre o gás radônio em ambientes. Os dados obtidos em sua residência contribuíram muito para nossos estudos e, conseqüentemente, para a compreensão das concentrações de radônio na região.

Comunicamos que, segundo os limites estabelecidos pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Ionizantes - UNSCEAR e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica - ICRP, a concentração de gás radônio no interior de ambientes entre 0-200 Bq/m³ é considerada normal, de 200-400 Bq/m³ é tida como nível de 72

atenção, de 400-600 Bq/m³ sugere-se uma monitoração continuada com ações mitigadoras e que superiores do valor de 600 Bq/m³ recomenda-se intervenção para ação mitigadora. As medidas obtidas pelos Z detectores instalados em sua residência por um período aproximado de 93 dias apresentaram concentrações de radônio de XXX Bq/m³ e XXX Bq/m³. Consideramos que os valores obtidos estão dentro da faixa de atenção o que sugere um monitoramento contínuo e implantação de ações mitigatórias, segundo os órgãos internacionais mencionados acima.

Agradecemos pela atenção e disponibilidade.

Grupo de Pesquisa sobre radiações ionizantes da UTFPR