

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**FERNANDA NICOLODI BRUM**

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE RADÔNIO NO CAMPUS CAÇAPAVA DO SUL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**Caçapava do Sul**

**2021**

**FERNANDA NICOLODI BRUM**

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE RADÔNIO NO CAMPUS CAÇAPAVA DO SUL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

Projeto de Conclusão de Curso II  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Ambiental e Sanitária da Universidade  
Federal do Pampa, como requisito parcial  
para obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Ambiental e Sanitária.

·  
Orientador: Prof. Dr. Thiago Henrique  
Lugokenski.

**Caçapava do Sul**

**2021**

**FERNANDA NICOLODI BRUM**

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE RADÔNIO NO CAMPUS CAÇAPAVA DO SUL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

Projeto de Conclusão de Curso II  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Ambiental e Sanitária da Universidade  
Federal do Pampa, como requisito parcial  
para obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 06, outubro de 2021.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Thiago Henrique Lugokenski  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Mateus Guimaraes da Silva  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Vinicius de Abreu Oliveira.  
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **VINICIUS DE ABREU OLIVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIOSUPERIOR**, em 07/10/2021, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MATEUS GUIMARAES DA SILVA, Coordenador de Planejamento, Desenvolvimento, Avaliação e Acreditação**, em 08/10/2021, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **THIAGO HENRIQUE LUGOKENSKI, PROFESSOR DO MAGISTERIOSUPERIOR**, em 08/10/2021, às 14:06, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0631052** eo código CRC **8B44BAFC**.

Dedico este trabalho a minha querida família, obrigada por serem minha base, aos meus pais Ieda e Luis Carlos por sempre batalharem com muita força e garra para que eu pudesse realizar um dos meus maiores sonhos. Vocês são o que eu tenho de mais valioso.

## AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais e minhas irmãs Daiani, Edimara e Michele por todo o apoio, incentivo e orientações ao longo de todos os anos, principalmente nesses de universidade. Vocês me ajudaram a levantar, a voar e percorrer caminhos difíceis, que eu talvez não imaginasse que conseguiria ultrapassar. Mãe, pai, vocês moldaram características muito importantes em mim, essas, que me fazem seguir com imponência e garra, a minha trajetória. Obrigada por existirem na minha vida!

Agradeço ao meu namorado Ariel por todo amor, toda ajuda, toda compreensão e todo apoio. Você foi e é luz na minha vida. Nunca vou ter palavras suficientes para agradecer todo cuidado de sempre. Obrigada, meu amor. Eu amo você.

Agradeço com muito carinho meu orientador, Dr. Thiago Henrique Lugokenski, que sempre me questionou quando necessário, que brincou, que me ajudou, que fez a diferença e somou em minha jornada na graduação. Eu levo você como uma inspiração profissional. Obrigada por toda compreensão, empenho e dedicação nestes meses de desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso.

Agradeço aos meus amigos, principalmente aos que fiz durante os anos de graduação, com vocês esses anos foram mais leves, felizes e repletos de histórias incríveis. Vocês fizeram a diferença e encheram minha vida de felicidade, durante todo esse período. Agradeço o apoio, compreensão e conselhos. Vocês são essenciais na minha vida!

Agradeço a todos os professores, em especial os que tive a oportunidade de ter mais contato devido às aulas ou o desenvolvimento de trabalhos, vocês me proporcionaram o conhecimento não apenas racional, mas com a efetividade da educação na formação profissional.

Por fim, eu agradeço a todas as pessoas que contribuíram com palavras, gestos ou ações que me ajudaram diretamente ou indiretamente a chegar exatamente até aqui, ao fim de um trabalho e o início de uma nova etapa em minha vida. Muito obrigada a todos!

“A vida tem duas faces:  
Positiva e negativa  
O passado foi duro  
mas deixou o seu legado  
Saber viver é a grande sabedoria.”

Cora Carolina

## RESUMO

O Radônio ( $Rn^{222}$ ) é um gás nobre de ocorrência natural que emite partículas alfa, possuindo, desse modo, atividade radioativa e, potencialmente, cancerígena. Apesar das evidências relacionando à exposição ao Radônio, e o risco a saúde, não há no Brasil nenhuma recomendação específica regulamentada de controle quanto à exposição ao Radônio, mesmo sendo um país com grande potencial de extração mineral e grandes reservas de Urânio, a partir do qual o Radônio é gerado. Especificamente na região de Caçapava do Sul, a formação geológica sobre a qual a cidade se encontra é uma formação granítica, a qual tem forte relação com altos índices de emanção de Radônio. Desse modo, o objetivo deste estudo é o monitoramento ambiental dos níveis de Radônio em ambientes do campus Caçapava do Sul na Universidade Federal do Pampa – Rio Grande do Sul, bem como nos compartimentos ambientais da água. Para tal, utilizamos o equipamento Radon Eye e fizemos medições de, ao menos, 24 horas em cada ambiente dos prédios Prof<sup>a</sup> Daniela de Rosso Tolfo, prédio do Centro de Ciências e Tecnologia Ambiental e prédio de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios, além de medição do nível de Radônio na água superficial de área alagada do campus. Os resultados mostraram níveis médios diários variando de 13,00 a 142,29 Bq/m<sup>3</sup>, com picos diários variando de 24,00 a 230,00 Bq/m<sup>3</sup>, tendo algumas salas/laboratórios com níveis superiores ao nível máximo recomendado pela União Europeia, de 140,00 Bq/m<sup>3</sup>. Ainda não existem níveis seguros de exposição ao Radônio segundo a literatura, sendo que concentrações de 50 Bq/m<sup>3</sup> são relacionadas como a maior incidência de câncer de pulmão e leucemia em exposições crônicas. Já a amostra de água coletada na área alagada do campus, mostrou uma concentração de 1,658 Bq/L, ficando dentro dos parâmetros relacionado a alguns trabalhos na literatura, porém ainda apresentando um resultado preocupante. Sendo assim, este trabalho conclui que os níveis de  $Rn^{222}$  no campus apresentam potencial risco a saúde, particularmente nos ambientes térreos e, em especial, para servidores e alunos que frequentam os espaços por muitas horas diárias, sendo sugeridas medidas de adequação que podem ser simples e de baixo custo, como o ato de abrir a porta de um local fechado e deixar o ar entrar por alguns minutos antes de ficar naquele local por mais tempo, visando aumentar a aeração destes espaços e reduzir o risco ocupacional.

Palavras-chave: Radiação, Radônio, Universidade Federal do Pampa, Câncer.

## ABSTRACT

Radon ( $\text{Rn}^{222}$ ) is a naturally occurring noble gas that emits alpha particles, thus having radioactive and potentially carcinogenic activity. In the United States and throughout the European Community, there is great concern to avoid the risks that radon can bring to public health, mainly due to occupational and residential exposure. Despite the evidence relating to exposure to radon, there is no specific regulated recommendation in Brazil for controlling exposure to radon, even though it is a country with great potential for mineral extraction and large reserves of uranium, from which radon is generated. Specifically in the region of Caçapava do Sul, the geological formation on which the city is located is a granitic formation, which has a strong relationship with high levels of Radon emanation. Thus, the objective of this study is the environmental monitoring of Radon levels in environments of the Federal University of Pampa in the city of Caçapava do Sul – Rio Grande do Sul, as well as in the environmental compartments of the water. For this, we used the Radon Eye equipment and made measurements for at least 24 hours in each environment of the Prof. Daniela de Rosso Tolfo buildings, Center for Environmental Science and Technology building and the Mining, Planning and Ore Treatment building, in addition to measuring the radon level in the campus wetland surface water. The results showed daily average levels ranging from 13.00 to 142.29 Bq/m<sup>3</sup>, with daily peaks ranging from 24.00 to 230.00 Bq/m<sup>3</sup>, with some rooms/laboratories having levels above the maximum level recommended by the European Union, of 140.00 Bq/m<sup>3</sup>. There are still no safe levels of exposure to Radon according to the literature, and concentrations of 50 Bq/m<sup>3</sup> are related to the highest incidence of lung cancer and leukemia in chronic exposures. The water sample collected in the flooded area of the campus showed a concentration of 1.658 Bq/L, remaining within the parameters related to some works in the literature, but still presenting a worrying result. Therefore, this work concludes that  $\text{Rn}^{222}$  levels on campus present potential health risk, particularly in ground floor environments and for employees who frequent the spaces for many hours a day, and adequacy measures are suggested that can be simple and effective. low cost, such as the act of opening the door of an enclosed space and letting the air in for a few minutes before staying in that place for a longer time, to increase the aeration of these spaces and reduce occupational risk.

Keywords: Radiation, Radon, Federal University of Pampa, Cancer.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Decaimento do Radônio.....                          | 28 |
| Figura 2 - Localização da cidade de Caçapava do Sul – RS. .... | 38 |
| Figura 3 - Caracterização do solo da UNIPAMPA.....             | 39 |
| Figura 4 – Localização Universidade Federal do Pampa .....     | 41 |
| Figura 5 - Método de detecção em laboratório.....              | 42 |
| Figura 6 - Equipamento utilizado para análise da água .....    | 43 |
| Figura 7 - Pontos 1º andar .....                               | 49 |
| Figura 8 - Pontos 2º andar .....                               | 50 |
| Figura 9 - Pontos 3º andar .....                               | 50 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Fontes de exposição à radiação e contribuição relativa para a dose de radiação média anual por pessoa para a população dos Estados Unidos. .... | 23 |
| Tabela 2 - Risco de morte por câncer de pulmão por exposição de 200 Bq/m <sup>3</sup> de Radônio durante toda uma vida. ....                               | 25 |
| Tabela 3 - Conversão de unidades de exposição de Radônio. ....   | 26 |
| Tabela 4 - Propriedades de decadência do Radônio e a vida curta da sua progênie. ....  | 27 |
| Tabela 5 - Concentrações médias de Tório para alguns tipos de rochas. ....   | 28 |
| Tabela 6 - Concentrações médias de urânio em alguns tipos de rochas. ....  | 30 |
| Tabela 7 - Limites de dose efetiva ocupacional. ....   | 33 |
| Tabela 8 - Várias formas e fontes de radiação que são carcinógenos humanos - Grupo 1, e prováveis carcinógenos humanos - Grupo 2A. ....                    | 35 |
| Tabela 9 - Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. ....  | 36 |
| Tabela 10 - Efeitos da exposição aguda a radiação. ....  | 37 |
| Tabela 11 – Pontos de análises. ....   | 44 |
| Tabela 12 - Resultados análise do ar. ....   | 47 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

- Bi - Bismuto
- Bq - Becquerel
- Ci - Curie
- cm - Centímetros
- cm<sup>2</sup> - Centímetro ao quadrado
- F - Fator de Equilíbrio
- h - Hora
- Hg - Mercúrio
- GBq - Gigabecquerel
- kBq - Kilobecquerel
- KT - Coeficiente de partição
- km - Quilômetros
- km<sup>2</sup> - Quilômetros quadrados
- m - Metros
- m<sup>3</sup> - Metros cúbicos
- MBq - Megabecquerel
- MeV - Megaelectronvolt
- mJ - Megajoule
- mSv - Millisievert
- nCi - Nanocurie
- Pa - Protactínio
- Pb - Chumbo
- pCi - Picocurie
- Po - Polônio
- ppm - Parte por milhão
- Ra - Rádio
- Rn – Radônio
- RU – Restaurante Universitário
- Sv - Sievert

- Th - Torônio
- Tl - Tálío
- TLV - Theresold Limit Value
- U - Urânio
- WL - Working Level
- WLM - Working Level Month
- $\alpha$  – Partícula Alfa
- $\beta$  - Partícula Beta
- °C – Graus Celsius
- $\mu\text{S}$  – Microsiemens

## **LISTA DE SIGLAS**

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CETEM - Centro de Tecnologia Mineral
- COMAP - Conselho Municipal de Administração Pública
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral
- EPA - Environmental Protection Agency
- IAEA - International Atomic Energy Agency
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICRP - International Commission On Radiological Protection
- IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
- NBR - Norma Brasileira
- NCRP - National Council on Radiation Protection and Measurements
- NRPB - National Radiological Protection Board
- OMS - Organização Mundial da Saúde
- UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
- WHO - World Health Organization

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 17 |
| 2. OBJETIVOS.....   | 19 |
| 2.1 Objetivo geral .....                                      | 19 |
| 2.2 Objetivos específicos .....                               | 19 |
| 3. JUSTIFICATIVA.....   | 20 |
| 4. REFERENCIAL TEÓRICO .....                                  | 21 |
| 4.1 Radônio.....  | 21 |
| 4.2 O Radônio em ambientes interno .....                      | 23 |
| 4.3 Unidades do Sistema Internacional (SI) para radiação..... | 25 |
| 4.4 Radônio e sua progênie.....                               | 26 |
| 4.5 Ocorrência de Urânio e Tório nas rochas .....             | 27 |
| 4.5.1 Tório.....  | 27 |
| 4.5.2 Urânio.....   | 30 |
| 4.6 Taxa de exalação de Radônio .....                         | 32 |
| 4.7 Transporte do Radônio .....                               | 33 |
| 4.8 Câncer no pulmão .....                                    | 34 |
| 4.9 Mitigação .....   | 37 |
| 5. MATERIAIS E MÉTODOS .....                                  | 38 |
| 5.1 Área de estudo .....                                      | 38 |
| 5.2 Geologia local.....                                       | 39 |
| 5.2 Trabalho de campo.....                                    | 40 |
| 5.3 Teste de níveis de Radônio <i>in situ</i> .....           | 41 |
| 5.4 Determinação da taxa de exalação de Radônio .....         | 42 |
| 5.5 Determinação da concentração de Radônio no ar .....       | 43 |

|  |    |
|--|----|
| 5.6 Análise dos dados .....                                    | 45 |
| 5.9 Radônio na água .....                                      | 45 |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                | 46 |
| 6.1 Análise do ar .....  | 46 |
| 6.2 Análise de concentração do Rn <sup>222</sup> na água ..... | 53 |
| 7. CONCLUSÃO .....   | 53 |
| 8. REFERÊNCIAS .....   | 54 |
| 9. APÊNDICE .....  | 66 |

## 1. INTRODUÇÃO

O Radônio ( $Rn^{222}$ ) é um gás nobre de ocorrência natural que emite partículas alfa, possuindo, desse modo, atividade radioativa (WHO, 2009). Este gás tem origem a partir do decaimento do Rádio ( $Ra^{226}$ ), que por sua vez se origina diretamente do decaimento do Urânio ( $U^{238}$ ). Esses radionuclídeos de ocorrência natural estão armazenados em concentrações variadas nos materiais geológicos, especialmente em rochas e solos (DE OLIVEIRA SANTOS, 2015).

O Radônio e sua progênie são as principais fontes de exposição à radiação natural em minas (BALDIK et al, 2006). Esse gás pertencente à família dos gases naturais, que se faz presente no corpo mineral e por recuo emana da matriz sólida dos materiais para os intervalos entre grãos ou para os planos de fraturas das rochas (SANTOS, 2008). Sendo um gás, com meia-vida de 3,8 dias, ao ser formado, o Radônio emana desses reservatórios e tendem a se concentrar em ambientes fechados ou em reservatórios de água, de origem natural ou antrópica.

Por ser um gás, o Radônio gerado no interior das rochas e do solo pode se difundir facilmente por meio de rachaduras, canos, buracos e lençóis freáticos até atingir a superfície da Terra, onde se dissipa no ar. Desse modo, altas concentrações de Radônio podem ocorrer em ambientes fechados, portanto, representam uma ameaça potencial à saúde das pessoas que muitas vezes trabalham nesses locais (GERALDO et al, 2005). Este conjunto de características levam o Radônio a ser a principal fonte de radiação ionizante a qual os humanos estão expostos (WHO, 2009). Importante destacar, que o processamento técnico de minerais resulta na liberação de radionuclídeos de curta e meia-vida, oriundo desses radio-elementos (OTHMAN et al, 1992).

A ICRP (1986) explica que o processo de transferência de Radônio está relacionado diretamente com as fraturas tectônicas, fraturas geológicas e o comportamento hidro geológico. Onde a umidade dos solos, tem grande influência na taxa de emanação do Radônio e na sua difusão, através das rochas e dos solos.

Altos níveis de exposição desse gás radioativo, podem causar câncer de pulmão, indução às mutações genéticas, destruição de tecidos vivos entre muitos outros problemas e, conseqüentemente, o conhecimento da concentração deste gás

em ambientes internos é de extrema importância (PETTA, 2013). Especialmente em ambientes de atividade de mineração, o Comitê sobre os Efeitos Biológicos de Radiação Ionizante (BEIR VI, 1999), fez uma ampla revisão de estudos envolvendo a exposição ao Radônio por trabalhadores da atividade de mineração. Sua análise, que englobava um total de cerca de 60.000 trabalhadores de diferentes partes do mundo, concluiu que há um aumento linear na incidência de câncer de pulmão em direta relação com o aumento dos níveis de Radônio. Desde a sua publicação, vários outros trabalhos demonstraram efeitos semelhantes, em países como Polônia (SKOWRONEK, 2003), Brasil (VEIGA e cols., 2004), França (LAURIE e cols., 2004), entre muitos outros. De modo particularmente importante, relatório da Organização Mundial da Saúde indica que não há níveis seguros de exposição ao Radônio (WHO, 2009), pontuando que, mesmo pequenas doses de Radônio, podem levar a um aumento, mesmo que pequeno, na incidência de câncer de pulmão.

A inalação de Radônio e seus descendentes leva as partículas radioativas a irradiar os pulmões, com o passar do tempo essa inalação pode provocar a formação de cânceres. Apesar da ampla evidência apontando para os efeitos deletérios do Radônio sobre a vida humana, no Brasil o número de estudos envolvendo a exposição ocupacional ou residencial de Radônio ainda são escassos.

Tendo destaque trabalho de Santos (2015), que quantificou a liberação de Radônio em 6 diferentes mineradores de Minas Gerais, e alguns trabalhos que avaliaram os níveis de Radônio em ambientes de extração de ametistas, como o trabalho "Controle de Radônio nas minas de ametista no Rio Grande do Sul" (BOM, 2008). Contudo, por mais importantes que sejam estes trabalhos, ainda faltam muitas informações a respeito da dinâmica da liberação de Radônio em ambientes mineradores no Brasil, bem como de exposição ocupacional em ambientes internos. Vale ressaltar também que o Brasil não conta no presente momento com qualquer legislação que regulamenta os níveis de Radônio, sejam em ambientes de trabalho ou residenciais.

Recentemente houve o crescimento de alguns estudos investigando fatores de riscos ocupacionais, através disso foi possível observar dois principais fatores de exposição a carcinógenos ocupacionais e ambientais, o Radônio e o amianto (MAGALHÃES et al., 2003). O estudo "Medições de concentração de Radônio ( $Rn^{222}$ ) em água interna em Giresun - Áreas de campus universitário" foi um trabalho realizado na universidade de Giresun, Turquia. A região oriental do mar negro, foi afetada pelo

trágico acidente de Chernobyl no ano 1986 e desde então faz-se estudos anuais em diversos pontos do país, para monitorar e controlar a radioatividade do ar, solo e água do ambiente, a fim de detectar mudanças naturais na radiação. Com esse projeto a análise interna da concentração de Radônio lhes permitiu descobrir a atividade gama nas amostras de solo da universidade de Giresun (HALIM BÜYÜKUSLU et al., 2018).

Também, há uma relação direta entre as emanações de Radônio e o tipo de formação rochosa subjacente, sendo algumas mais relacionadas a altos níveis de elementos da série do decaimento do U, que leva a formação de Radônio., sendo as rochas graníticas de especial destaque neste sentido (ROGERS e ADAMS, 1969a). A emanação de  $Rn^{222}$  destas rochas não necessariamente leva a seu acúmulo nos ambientes, estando altas concentrações relacionadas ao solo que se encontra abaixo, aos materiais construtivos e a pouca aeração dos ambientes (JINYOUNG e HYEKYOUNG, 2021), sendo de particular importância em locais de clima frio, onde as resistências e prédios comerciais tendem a ficar fechados por longo tempo.

Desse modo, o estudo buscará avaliar e fazer o monitoramento ambiental das concentrações de Radônio presentes na Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul, com o objetivo de analisar os níveis de emanação encontrados e comparar com os níveis de exposição relatados na literatura. Verificando esses índices monitorando assim a radioatividade presente no ar e na água. A fim de avaliar os impactos ocupacionais e ambientais gerados por essa exposição.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar e monitorar ambientalmente as concentrações de Radônio no Campus Caçapava do Sul na Universidade Federal do Pampa - Rio Grande do Sul.

### **2.2 Objetivos específicos**

A fim de alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os níveis de Radônio presentes do ar.
- Avaliar os níveis de Radônio na água superficial de área alagada do campus.
- Verificar se os valores encontrados estão dentro dos níveis de exposição relatados na literatura.

### 3. JUSTIFICATIVA

O Radônio é produzido no interior de rochas e solo, sendo ele um gás se dissipa rapidamente até estar na superfície terrestre. Por isso em ambientes abertos (ar livre) as concentrações do  $Rn^{222}$  são baixas e acabam não sendo um risco a saúde (MARQUES et al., 2004). Quando as rochas, água ou solos, permitem uma grande difusão deste gás até o exterior, as edificações construídas acima terão altas concentrações do Radônio (GERALDO et al., 2005). Desse modo, ambientes fechados com pouca ventilação, poucas portas e janelas, pouca circulação de pessoas, ocorre um acúmulo do gás tornando-se um fator de risco para a saúde de todos os ocupantes. Assim quase todas as casas apresentam Radônio em seus ambientes (OLIVEIRA, 2013). O Radônio em altas concentrações está diretamente relacionado com o possível surgimento de cânceres, pois o Radônio é um agente carcinogênico comprovado (CORRÊA, 2011).

O Brasil não contém leis que limitam os níveis permissíveis de exposição ao gás Radônio, tanto para áreas profissionais, quanto para ambientes domésticos e de domínio público. Para casos semelhantes a esse, a OMS criou leis de limites de saúde ocupacionais, que podem e devem ser seguidas por países que ainda não desenvolveram seu próprio regulamento. Por conseguinte, grande parte dos estudos e análises referente a esse tema ocorre em países que contém sua própria legislação definida (como Canadá e Estados Unidos da América). A falta de dados locais sobre os níveis de Radônio em ambientes fechados, foi uma das principais motivações para esse estudo.

O artigo “Concentrações de Radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre, RS” evidencia que diferentes tipos de rochas e solos, tem um impacto direto nos níveis (altos ou baixos) de emissão do gás  $Rn^{222}$  (FIANCO, 2011). A Universidade Federal do Pampa, está situada na cidade de Caçapava do Sul, que se

localiza no centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul e possui grande diversidade de contextos geológicos. Deixando o estudo ainda mais relevante.

Este relatório resume a extensão do conhecimento atual sobre os efeitos do Radônio inalado e de sua progênie na saúde e faz recomendações para o controle dessa exposição na Universidade Federal do Pampa. Com objetivo de orientar as agências nacionais de aconselhamento e regulamentação e os profissionais de proteção radiológica preocupados com os níveis de concentração do Radônio em ambientes ocupacionais.

Do ponto de vista regional, a cidade de Caçapava do Sul assenta-se sobre uma formação geológica chamada Granito Caçapava, que possivelmente emane grandes quantias de Radônio, sendo que há trabalhos geofísicos que apontam nesta direção (FARIAS, 2019). Além disso, o padrão construtivo associado a um clima frio e úmido favorecem hábitos que tendem a concentrar o Radônio nos ambientes, tais como manter os ambientes fechados por longo tempo. Apesar disso, o monitoramento ambiental tanto em áreas comerciais como residências usualmente não compreende a medição dos níveis de Radônio, o que pode levar a uma situação de perigo a saúde humana.

Desse modo, o estudo buscou avaliar e monitorar as concentrações de Radônio no Campus Caçapava do Sul na Universidade Federal do Pampa, com o objetivo de analisar os níveis encontrados e comparar com os níveis de exposição relatados na literatura. A importância desse estudo se dá ao fato de que o Brasil não contém uma lei vigente que delimita os níveis de exposição de Radônio em ambientes internos, então a verificação desses índices será através de literatura estrangeira, monitorando assim a radioatividade presente no ar e água. O presente estudo inspecionou diversos prédios da faculdade UNIPAMPA na cidade de Caçapava do Sul que se localiza no estado do Rio Grande do Sul, a fim de avaliar os impactos gerados e propor meios para reduzir essa exposição.

## **4. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **4.1 Radônio**

Descoberto pelo físico Ernest Rutherford em 1899, o Radônio é um elemento altamente radioativo, é um gás inerte sendo o mais pesado já conhecido, geralmente

é encontrado nas rochas e no solo. Existe naturalmente em vários isótopos, mas existem apenas duas altas concentrações no ambiente:  $Rn^{220}$  e  $Rn^{222}$  (MOUNTAHA e KEVIN, 2020).

O  $Rn^{222}$  tem meia-vida, de 3,8 dias sendo o isótopo mais estável do Radônio. Meia-vida é o tempo necessário para que metade do número de átomos do isótopo radioativo presente em uma amostra desintegre-se. Ele é o produto de decomposição imediato do rádio<sup>226</sup> sendo transitório no processo de decaimento do urânio<sup>238</sup>. Devido à sua meia-vida ser mais longa, está presente na atmosfera livre, em casas e edifícios. É, portanto, uma fonte inescapável de exposição à radiação, tanto em casa quanto no trabalho. Níveis elevados de Radônio no ar podem ocorrer em algumas localizações geográficas, como cavernas naturais, túneis e minas subterrâneas. (ICRP, 1993).

O Radônio existe na água subterrânea, solo, rocha e espaços confinados (incluindo edifícios e porões). Logo, os seres humanos são suscetíveis à exposição de várias fontes, incluindo através do solo e abastecimento de água. A exposição humana ao Radônio ocorre principalmente por ingestão e inalação (MOUNTAHA e KEVIN, 2020).

As fontes naturais de radiação, provém dos raios cósmicos e dos radionuclídeos naturais originados na crosta terrestre, que se espalham nos diversos sistemas geológicos. A radioatividade natural varia entre regiões. Segundo a UNSCEAR (2000), áreas com níveis de radiação elevada são encontradas no mundo decorrente de diversos fatores como: o conteúdo dos solos que pode conter concentração maior do gás Radônio, altitude (a radiação cósmica aumenta com a altitude) e a geologia local, como a presença de urânio e outros minerais radioativos.

Estudos informam que apesar da difusão ser a via dominante de transporte do Radônio, o fluxo convectivo também ocorre promovido por condições de ventos e alterações na pressão atmosférica (UNSCEAR, 2000). Níveis elevados desse gás podem ser observados se o Radônio exalado fica retido em ambientes fechados, como ambientes residências ou ambientes de trabalho, por exemplo. Em locais fechados, as concentrações de Radônio e sua progênie variam de uma maneira considerável com o tempo e o espaço do ponto de entrada do ar fresco até o ponto de exaustão (YU et. al, 2008).

A exposição por Radônio está cada vez mais presente e mais difícil de ser evitada. A Tabela 1 demonstra algumas dessas fontes de exposição.

Tabela 1 - Fontes de exposição à radiação e contribuição relativa para a dose de radiação média anual por pessoa para a população dos Estados Unidos.

| <b>Fontes de exposição à radiação</b>  | <b>Radiação média anual (%)</b> |
|--|---------------------------------|
| Radônio e Torônio                      | 37%                             |
| Raios cósmicos                         | 5%                              |
| Exposição Interna                      | 5%                              |
| Radiação terrestre                     | 3%                              |
| Tomografia computadorizada             | 24%                             |
| Medicina nuclear                       | 12%                             |
| Fluoroscopia intervencionista          | 7%                              |
| Radiografia convencional/ fluoroscopia | 5%                              |
| Produtos consumidos                    | 2%                              |
| Exposição ocupacional                  | 0,10%                           |
| Indústria                              | 0,10%                           |

fonte: NCRP Report No. 160, 2009 apud EPA 2015.

#### **4.2 O Radônio em ambientes interno**

Segundo Haerting e Hesse (1879), a existência de uma alta taxa de mortalidade entre os mineiros na Europa central foi reconhecida antes de 1600, e a principal causa de morte foi identificada como câncer de pulmão. A hipótese foi de que o câncer poderia ser atribuído à exposição ao Radônio (LUDEWIG e LORENSER, 1924).

A contaminação ambiental por Radônio e sua progênie tem sido bastante estudada em todo o mundo depois do início da década de 80 (NARAROFF, 1988; NEUBERGER, 1991). A motivação para esse aumento significativo, decorreu de estimativas feitas que aproximadamente 10.000 casos de câncer das vias

respiratórias (por ano) nos Estados Unidos da América (EUA), seriam decorrência de doses ingeridas pela população em residências e locais de trabalho (COHEN, 1980).

O trabalho em um ambiente com altas concentrações de  $Rn^{222}$ , pode conter inúmeros riscos à segurança do trabalhador, pois os operários são expostos internamente aos radionuclídeos presentes nos aerossóis e externamente à radiação gama e beta (FATHABADI et. al, 2006).

A ICRP (1986) explica que a principal fonte de exposição à radiação natural é decorrente do Radônio e sua progênie, pois o processo de transferência de Radônio está relacionado diretamente com as fraturas tectônicas, fraturas geológicas, incluindo também o comportamento hidro geológico do aquífero. Quando há alguma construção sobre um local como esse, o gás emana para as edificações fazendo com que as concentrações desse gás sejam altas, precisando de muito ar circulante para evaporar (GERALDO et al., 2005).

Atualmente, a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer classifica o Radônio como um carcinógeno de classe I (WHO, 2003). Em muitos países, a água potável é obtida de fontes subterrâneas, como nascentes, poços e furos. Segundo a Organização Mundial de Saúde - OMS, essas fontes de água normalmente têm concentrações mais altas de Radônio do que as águas superficiais de reservatórios, rios ou lagos.

Na avaliação de dose, a maioria das vezes, mede-se a concentração de Radônio e assume-se um Fator de Equilíbrio (F) entre a progênie do Radônio e o Radônio tipicamente igual a 0,4 e 0,5. A UNSCEAR (2000) sugere o valor de 0,4 (mais utilizado) para o fator de equilíbrio.

Em ambientes internos, pessoas expostas por um longo período a um ambiente de trabalho com elevada concentração de Radônio e seus produtos de decaimento; provavelmente terão alguns efeitos à saúde decorrentes desta exposição (VEIGA, 2004). A Tabela 2 refere-se ao risco de morte por câncer de pulmão através da exposição de níveis  $200 \text{ Bq/m}^3$ .

Tabela 2 - Risco de morte por câncer de pulmão por exposição de 200 Bq/m<sup>3</sup> de Radônio durante toda uma vida.

| <b>Grupo</b>    | <b>Risco (%)</b> |
|-----------------|------------------|
| População geral | 3-5              |
| Fumantes        | 10-15            |
| Não-Fumantes    | 1-3              |

fonte: NRPB, 2000.

### **4.3 Unidades do Sistema Internacional (SI) para radiação**

A radioatividade/força da fonte radioativa é medida em unidades de becquerel (Bq). Um becquerel é uma quantidade extremamente pequena de radioatividade. Os múltiplos comumente usados da unidade Bq são kBq (kilobecquerel), MBq (megabecquerel) e GBq (gigabecquerel).

- 1 Bq = 1 evento de emissão de radiação ou desintegração por segundo.
- 1 kBq = 1000 Bq, 1 MBq = 1000 kBq, 1 GBq = 1000 MBq.

Ainda existem unidades antigas que podem ser encontradas na medição da radioatividade, como o curie (Ci). Um curie é uma grande quantidade de radioatividade, equivalente a 37 GBq ou 37.000 MBq.

Tanto Becquerel (Bq) ou Curie (Ci), são medidas da taxa (não energia) de emissão de radiação de uma fonte. A Tabela 3, demonstra algumas unidades comumente utilizadas, quando se utiliza o fator de equilíbrio de 0,40.

Sievert é uma unidade usada para dar uma avaliação do impacto da radiação ionizante sobre os seres humanos. É a unidade do Sistema Internacional de Unidades da dose equivalente e dose eficaz.

Tabela 3 - Conversão de unidades de exposição de Radônio.

| <b>Conversão de unidades de exposição de Radônio (fator de equilíbrio = 0.40)</b> |                             |  |
|---|-----------------------------|--|
| <b>Exposição anual a partir da concentração de Radônio medida</b>                 | <b>Unidade de exposição</b> | <b>Conversão</b>                             |
|   | 1 WLM                       | 3.54 mJ-h/m <sup>3</sup>                     |
| -----   | 1 MBq-h/m <sup>3</sup>      | 2.22 mJ-h/m <sup>3</sup>                     |
|   | 1 MBq-h/m <sup>3</sup>      | 0.628 WLM                                    |
| (A) Em casa - Assumindo 7.000 horas dentro de casa por ano                        | 1 Bq/m <sup>3</sup>         | 0.0156 mJ-h/m <sup>3</sup>                   |
|   | 1 Bq/m <sup>3</sup>         | 0.0044 WLM                                   |
|   | 1 WLM                       | 4 mSv  |
|   | 1 mJ-h/m <sup>3</sup>       | 1.1 mSv                                      |
| (B) No trabalho - Assumindo 2.000 horas de trabalho por ano                       | 1 Bq/m <sup>3</sup>         | 0.00445 mJ-h/M <sup>3</sup> =<br>0.00126 WLM |
|   | 1 mJ-h/m <sup>3</sup>       | 1.4 mSv                                      |
|   | 1 WLM                       | 5 mSv  |

Fonte: The Canadian Radiation Protection Regulations, Schedule 1 (SOR / 2000-203).

#### 4.4 Radônio e sua progênie

Os dois isótopos significativos do Radônio são o Radônio<sup>222</sup> e o Radônio<sup>220</sup> (torônio). O Rn<sup>222</sup> é o decaimento imediato do rádio-226, derivado da série de radionuclídeos naturais do urânio. Já o Rn<sup>220</sup> é o produto de decomposição imediato do rádio<sup>224</sup>, derivado do Tório. Por causa de suas origens, os dois isótopos são normalmente conhecidos como Radônio e Torônio, um derivado do Rádio outro do Tório portanto. Ambos os isótopos tornam-se isótopos de elementos sólidos, cujos átomos se ligam aos núcleos de condensação e partículas de poeira presente no ar.

Os problemas apresentados pelo Radônio<sup>220</sup> são muito menos comuns, e geralmente mais tratáveis. Para proteção contra Torônio, geralmente é suficiente

controlar a ingestão do produto de decomposição, chumbo<sup>212</sup>, que tem meia-vida de 10,6 horas (ICRP, 1993).

A Tabela 4, demonstra as propriedades de decadência do Radônio e sua progênie de vida curta. Pois sabe-se que radiação alpha, beta e gama emitida em decorrência do decaimento dos elementos radioativos se faz presente na superfície terrestre, por isso pode ser detectada.

Tabela 4 - Propriedades de decadência do Radônio e a vida curta da sua progênie.

| Radionuclídeo     | Meia-vida  | Principais energias e rendimentos de radiação |       |                    |       |               |       |
|-------------------|------------|---|-------|--------------------|-------|---------------|-------|
|                   |            | Alpha   |       | Beta               |       | Gamma         |       |
|                   |            | Energia (MeV)                                 | y (%) | Energia (máx.) MeV | y (%) | Energia (MeV) | y (%) |
| <sup>222</sup> Rn | 3.824 dias | 5.49  | 100   | —                  | —     | —             | —     |
| <sup>218</sup> Po | 3.05 min   | 6.00  | 100   | —                  | —     | —             | —     |
| <sup>214</sup> Pb | 26.8 min   | —   | —     | 1.02               | 6     | 0.35          | 37    |
| <sup>214</sup> Pb |            | —   | —     | 0.70               | 42    | 0.30          | 19    |
| <sup>214</sup> Pb |            | —   | —     | 0.65               | 48    | 0.24          | 8     |
| <sup>214</sup> Bi | 19.9 min   | —   | —     | 3.27               | 18    | 0.61          | 46    |
| <sup>214</sup> Bi |            | —   | —     | 1.54               | 18    | 1.77          | 16    |
| <sup>214</sup> Bi |            | —   | —     | 1.51               | 18    | 1.12          | 15    |
| <sup>214</sup> Po | 164 μS     | 7.69  | 100   | —                  | —     | —             | —     |

fonte: ICRP (1983).

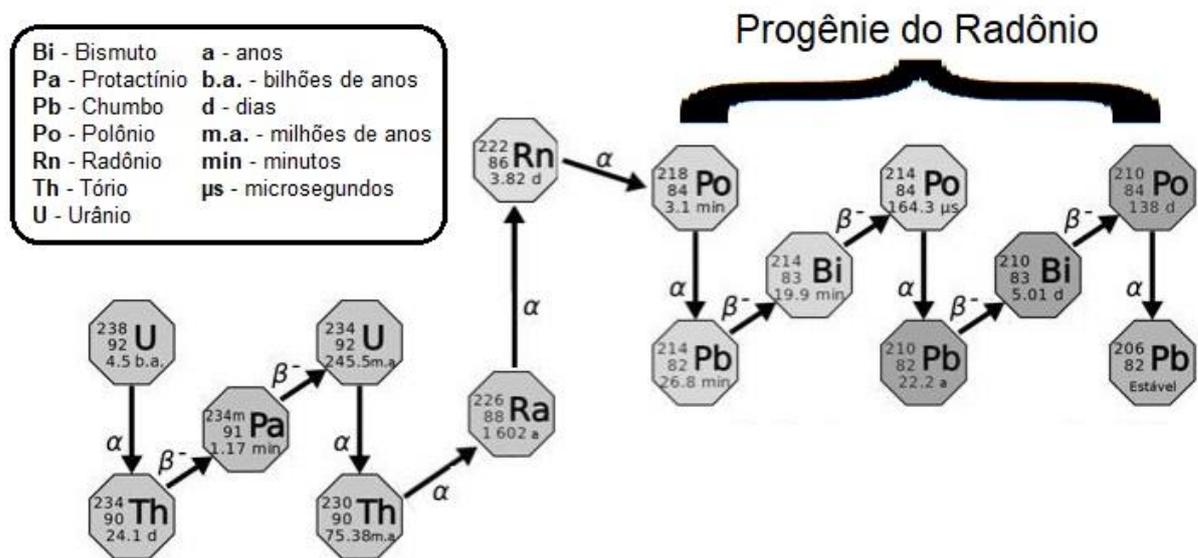
## 4.5 Ocorrência de Urânio e Tório nas rochas

### 4.5.1 Tório

A série do Th<sup>232</sup> “é um elemento instável”, sendo o Pb<sup>208</sup> o produto da sequência natural de decaimento (da série do Tório), que irá gerar Pb<sup>208</sup> após 12

conversões. O Tório também existe na cadeia de decaimento natural (série do urânio). O Radônio é um gás radioativo que ocorre nas rochas, no ar, nos solos e na água, sendo gerado por decaimento do  $U^{238}$ , como podemos observar na Figura 1, que ajuda a ter um melhor entendimento, sobre esse decaimento. Onde o  $Rn^{222}$  decai por emissão alfa em  $Po^{218}$  com meia-vida de 3,82 dias.  $Po^{214}$  decai para  $Pb^{210}$ , que tem meia-vida de 23,3 anos e que eventualmente decai para  $Pb^{206}$  estável.

Figura 1 - Decaimento do Radônio



fonte: DNPM, 1973.

Os minerais portadores de Tório são encontrados principalmente em granitos, pegmatitos, carbonatitos, veios hidrominerais e em placeres. Na Tabela 5, é possível visualizar as concentrações médias de Tório para alguns tipos de rochas.

Tabela 5 - Concentrações médias de Tório para alguns tipos de rochas.

|        | <b>Rochas</b> | <b>Th (ppm)</b> |
|--------|---------------|-----------------|
| ÍGNEAS | Graníticas    | 21,5            |
|        | Ultramáficas  | 0,05            |
|        | Eclogitos     | 0,37            |

|                               | <b>Rochas</b>        | <b>Th (ppm)</b>   |      |
|-------------------------------|----------------------|-------------------|------|
|                               | Alcalinas intrusivas | 17,1              |      |
|                               | Basálticas           | 1,58              |      |
|                               | Gabróicas            | 3,84              |      |
| METAMÓRFICAS                  | Anfibolito           | 5                 |      |
|                               | Gnaisse              | 6,4               |      |
|                               | Paragnaisse          | 21                |      |
|                               | Granulito            | 5,5               |      |
|                               | Ortognaisse          | 21,8              |      |
|                               | Cordierita gnaisse   | 0,03              |      |
|                               | Mármore              | 5,5               |      |
|                               | Filito               | 7,5               |      |
|                               | Xisto                | 10                |      |
|                               | Rochas máficas       | 13,1              |      |
|                               | SEDIMENTARES         | Arenitos          | 1,7  |
| Areia de praia Atlântica      |                      | 9,5               |      |
| Grauvaca vulcânica            |                      | 2,6               |      |
| Arcóseos                      |                      | 5                 |      |
| Folhelhos                     |                      | 11,8              |      |
| Bauxita                       |                      | 48,9              |      |
| Bentonita                     |                      | 24                |      |
| Calcários                     |                      | 1,75              |      |
| Fosfáticas                    |                      | 1 – 5             |      |
| <b>Sedimentos do Pacífico</b> |                      |                   |      |
|                               |                      | Areia             | 1,2  |
|                               |                      | Lamas             | 2,7  |
|                               |                      | lamas argilosas   | 4,8  |
|                               |                      | argilas pelágicas | 7,78 |

fonte: Rogers e Adams (1969a).

Nas rochas ígneas, as concentrações de Tório são relativamente maiores que as observadas nas sedimentares, embora algumas areias podem, por processos mecânicos, concentrar minerais enriquecidos em Tório. Nas rochas metamórficas, o Tório presente depende da matriz que serviu de origem (GASCOYNE, 1992), podendo ainda ser encontrado adsorvido em argilas e colóides (LIESER; HILL, 1992).

#### 4.5.2 Urânio

O aumento da mineração de urânio nos anos 40, foi o causador de um aumento nos casos de câncer de pulmão em mineiros, o que levou a associação entre a exposição e o câncer (KHAN et al., 1993).

Urânio é um elemento natural, quatro vezes menos abundante que o Tório. À temperatura ambiente, encontra-se no estado sólido e pertencente à família dos actinídeos. A *Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA)* estimou as reservas mundiais de urânio em 5,4 milhões de toneladas em todo o mundo em 2009, sendo as principais: 31% está na Austrália, 12% no Cazaquistão, 9% no Canadá e 9% na Rússia.

A emissão de Radônio em trabalhos mineiros ocorre devido à presença de urânio (Tório e/ou Rádio) nas rochas da mineração e paredes das galerias. A Tabela 6, facilita a comparação dos teores de urânio em diferentes tipos de rochas.

Tabela 6 - Concentrações médias de urânio em alguns tipos de rochas.

|        | <b>Rochas</b>        | <b>U (ppm)</b> |
|--------|----------------------|----------------|
| ÍGNEAS | Graníticas           | 4,19           |
|        | Gabróides            | 0,84           |
|        | Ultramáficas         | 0,022          |
|        | Eclogitos            | 0,2            |
|        | Intrusivas alcalinas | 9,82           |

|                               | <b>Rochas</b>          | <b>U (ppm)</b> |      |
|-------------------------------|------------------------|----------------|------|
|                               | Intrusivas silicáticas | 5              |      |
|                               | Basáticas              | 0,43           |      |
| <b>METAMÓRFICAS</b>           | Anfibolito             | 3,5            |      |
|                               | Gnaisse                | 2,2            |      |
|                               | Paragnaisse            | 4,5            |      |
|                               | Granulito              | 4,9            |      |
|                               | Ortognaisse            | 3,6            |      |
|                               | Cordierita gnaisse     | 5,8            |      |
|                               | Mármore                | 0,17           |      |
|                               | Filito                 | 1,9            |      |
|                               | Xisto                  | 2,5            |      |
|                               | Rochas máficas         | 3,2            |      |
|                               | <b>SEDIMENTARES</b>    | Arenitos       | 1,48 |
|                               |                        | Grauvacas      | 2,1  |
| Arcóseos                      |                        | 1,5            |      |
| Folhelhos                     |                        | 3,25           |      |
| Bauxita                       |                        | 11,4           |      |
| Bentonita                     |                        | 5              |      |
| Calcários                     |                        | 2,19           |      |
| Dolomitos                     |                        | 0,03 - 2,0     |      |
| Fosfáticas                    |                        | 50 - 300       |      |
| Evaporitos                    |                        | <0,1           |      |
| <b>Sedimentos do Pacífico</b> |                        |                |      |
|                               | Areias                 | 3              |      |
|                               | Lamas                  | 2,3            |      |
|                               | lamas argilosas        | 2,7            |      |
|                               | argilas pelágicas      | 2              |      |

fonte: Duarte, 2000.

#### 4.6 Taxa de exalação de Radônio

Os radionuclídeos dependem de alguns fatores que contribuem para a variabilidade da sua concentração, são eles: a formação geológica, o teor de urânio e tório, a taxa de exalação de Radônio devido às diferenças de pressão (pode ser induzida naturalmente e mecanicamente), o grau de diluição, a porosidade, a umidade, a idade do ar dentro do ambiente e principalmente as condições de trabalho, especificamente o grau de ventilação (CILE et al, 2010; FATHABADI et al, 2006; ICRP, 1986).

Existem três categorias de classificação para os radionuclídeos naturais, dependendo da origem segundo Eisenbud & Gessel (1997), essas são: cosmogênicos, primordiais e secundários. Dentre os elementos primordiais, destaque-se (do ponto de vista ambiental), Urânio, Actínio e o Tório.

A umidade dos solos, tem grande influência na taxa de emissão do Radônio e na sua difusão, através das rochas e dos solos. A película de água que está ao redor dos grãos, absorve a energia cinética dos átomos de Radônio recuados e essa captura aumenta a probabilidade dos átomos de Radônio de permanecer nos poros.

Segundo a UNSCEAR (2000), a solubilidade do Radônio na água diminui com o aumento da temperatura. Tal fenômeno é controlado pelo coeficiente de partição (KT), que é a razão entre a concentração de Radônio na água e de ar. O valor de KT varia de acordo com a temperatura, sendo em 0°C de 0,53 e em 25°C de 0,23 e um valor típico de 0,30 para 15°C. A partição e o aumento da emissão facilitam maiores concentrações de Radônio em rochas ou em solos úmidos, do que secos. No entanto, o Radônio se desloca - difusão e convecção- mais lentamente nas moléculas de águas do que no ar.

A taxa de exalação é a taxa com que o Radônio é emitido da superfície de materiais como rochas, solos e lamas. Nos Estados Unidos, a taxa máxima de exalação em solos admitida em minas subterrâneas é 0,74 Bq/m<sup>2</sup> (LUBIN,1994). Sabe-se também que algumas minas na África do Sul, não conseguiram ficar abaixo desse limite estabelecido, não alcançando níveis inferiores ao valor de 20 mSv/a dado

pela *Agência Internacional de Energia Atômica*. A UNSCEAR e a EPA têm como valor de referência limite, considerado normal, 140 Bq/m<sup>3</sup>, nesse valor inicialmente era de e 200 Bq/m<sup>3</sup>.

Um estudo demonstrou que cerca de 25 a 30% dos casos de câncer de pulmão atribuíveis à exposição ao Radônio poderiam ser evitados se todas as concentrações de Radônio de 200 Bq/m<sup>3</sup>, fossem reduzidas, também identificou que se se todas as exposições acima de 100 Bq/m<sup>3</sup> fossem reduzidas para 100 Bq/m<sup>3</sup> até 40% destes casos poderiam ser evitados (AXELSSON et al, 2015). Por tanto, valor referência utilizado para esse estudo será de 140 Bq/m<sup>3</sup>. A Tabela 7, declara limites de dose efetiva ocupacional, segundo a CNEN.

Tabela 7 - Limites de dose efetiva ocupacional.

| <b>Produtos de<br/>Decaimento<br/>(descendentes)</b> | <b>Limite de dose efetiva anual<br/>(média de até 5 anos<br/>consecutivos)</b> | <b>Limite máximo em<br/>qualquer ano</b> |
|--|--|--|
| Radônio – Rn <sup>222</sup>                          | 20 mSv ou 4 WLM  | 50 mSv ou 10 WLM                         |
| Torônio – Rn <sup>220</sup>                          | 20 mSv ou 12 WLM   | 50 mSv ou 30 WLM                         |

fonte: CNEN, 2005.

#### 4.7 Transporte do Radônio

Dois mecanismos diferentes são responsáveis pela migração do Radônio (IAEA, 2003). O primeiro é a difusão, pelo qual esse gás se move em relação ao fluido ou ao ar que preenche os poros presentes no meio; o segundo é o movimento do próprio líquido ou ar através do meio poroso, carregando o Radônio consigo, como o movimento de convecção do ar.

A velocidade de difusão é controlada por sua porosidade ou seu grau de compactação do material; pelo grau de umidade e temperatura. O transporte do Radônio em solos ou em rochas é influenciado (também) por forças mecânicas, como compressão, compactação e operações com explosivos.

A exalação em afloramentos ou amostras de rochas pode ser menor do que a

proveniente das rochas das paredes de um prédio devido ao seu maior número de fraturas e à presença de rachaduras; a taxa de exalação ainda cresce com o aumento do tamanho dos blocos ou partículas das rochas que contém urânio e ou tório associados (SANTOS, 2008). A alta ou baixa concentração de Radônio no interior de um ambiente depende de vários fatores, dentre eles: (I) o solo no qual a edificação está; (II) os materiais de construção (por exemplo, concreto protege o ambiente melhor que madeira); (III) as estações do ano; (IV) as condições climáticas; (V) níveis de circulação de ar por janelas e portas; entre outros (GERALDO et al., 2005).

#### **4.8 Câncer no pulmão**

A radioatividade é a alteração espontânea de um tipo de átomo em outro com uma emissão de radiação para atingir sua estabilidade (IPEN, 2002). A inalação de Radônio e seus descendentes (progênie) leva as partículas radioativas a irradiar os pulmões e a irradiação provoca a formação de câncer. Apesar de as partículas alfa emitidas pelo decaimento do Radônio apresentar pouco poder de penetração (não é capaz de atravessar a nossa pele), ele pode ser inalado, e quando isso acontece essa mesma falta de poder de penetração, faz com que o Radônio não consiga sair do nosso corpo, depositando-se em nosso pulmão podendo causar lesões de diversos graus (PETTA, 2013).

Dessa forma, se o processo de decaimento do Radônio ocorrer no pulmão dois eventos potencialmente nocivos ocorrem: a emissão de partículas alfa ionizante e causadoras de mutações no DNA, principalmente nas células proximalmente expostas; e o acúmulo dos elementos resultado deste decaimento, os quais não são voláteis como o Radônio e podem se acumular nos tecidos biológicos, tais como o Polônio e o Chumbo (WHO, 2003). Existem inúmeras fontes de radiação que podem causar câncer.

A Tabela 8, separa em dois grupos. Onde o Grupo 1, são os prováveis carcinógenos humanos e então o Grupo 2A.

Tabela 8 - Várias formas e fontes de radiação que são carcinógenos humanos - Grupo 1, e prováveis carcinógenos humanos - Grupo 2A.

| <b>Agente/Substância</b>   | <b>Câncer</b>         |
|--|-----------------------|
| <b>Grupo 1 (IARC): Carcinógeno humano</b>                        |                       |
| Raio-X e raios gama  | Vários                |
| Radiação solar   | Pele                  |
| Radônio <sup>222</sup> e seus produtos de decaimento             | pulmão                |
| Rádio <sup>224</sup> , e seus produtos de decaimento (226 - 228) | Osso                  |
| Tório <sup>232</sup> e seus produtos de decaimento               | fígado/leucemia       |
| Radioiodos (Incluindo o iodo-131)                                | Tireóide              |
| Plutônio-239 e seus produtos de decaimento (aerossóis)           | pulmão, fígado e osso |
| Fósforo-32   | Leucemia              |
| Nêutrons   | Vários                |
| Radionuclídeos emissores alfas                                   | Vários                |
| Radionuclídeos emissores betas                                   | Vários                |
| <b>Grupo 2A (IARC): Prováveis carcinógenos humanos</b>           |                       |
| Radiação ultravioleta  | Pele                  |

fonte: WHO (2003).

O câncer de pulmão é o mais comum de todos os tumores malignos e representa a principal causa de morte por câncer em todo o mundo (SOUZA CRUZ et al., 2016). De acordo com a CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, o Radônio tem sido apontado como a segunda causa de câncer de pulmão em todo o mundo.

Segundo um artigo publicado por Marques et al. (2006) o Brasil foi identificado com uma concentração relativamente alta deste gás nas águas, residências, solo e cavidades onde, em alguns casos, atingiu valores acima dos limites máximos recomendados internacionalmente. O estudo sugere que ações de intervenção sejam implementadas para a dissipação do Radônio, tanto nos locais internos, como durante a coleta das águas para fins de consumo. As Diretrizes Básicas de Proteção

Radiológica, estão presentes na Tabela 9. A exposição normal dos indivíduos deve ser restrita de um jeito que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos, causadas pela possível combinação de exposições, excedam o limite de dose especificado. Esses limites de dose não se aplicam às exposições.

Tabela 9 - Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica.

| <b>Limites de Dose Anuais [a]</b> |               |  |                             |
|-----------------------------------|---------------|--|-----------------------------|
| <b>Grandeza</b>                   | <b>Órgão</b>  | <b>Indivíduo ocupacionalmente exposto</b>          | <b>Indivíduo do público</b> |
| Dose efetiva                      | Corpo Inteiro | 20 mSv [b]   | 1 mSv [c]                   |
|                                   | Cristalino    | 20 mSv [b] (Alterado pela Resolução CNEN 114/2011) | 15 mSv                      |
| Dose equivalente                  | Pele [d]      | 500 mSv  | 50 mSv                      |
|                                   | Mãos e pés    | 500 mSv  | —                           |

Fonte: CNEN, 2014.

Para fins de controle administrativo efetuado pela CNEN:

- [a] O termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.
- [b] A média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.
- [c] Alguns casos de circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.
- [d] Valor médio em 1 cm<sup>2</sup> de área, na região mais irradiada.

A norma tem como meta, estabelecer que as exposições ocupacionais normais de cada indivíduo decorrentes de todas as práticas, não devem exceder os limites anuais estabelecidos.

A Tabela 10 contém dados do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, que designou faixas de valores, de exposição à radiação e suas possíveis consequências.

Tabela 10 - Efeitos da exposição aguda a radiação.

| <b>Radiação (Sv)</b> | <b>Efeitos à exposição</b>   |
|----------------------|--|
| 10 Sv                | Risco de morte dentro de dias ou semanas                           |
| 1 Sv                 | Risco de câncer mais tarde na vida (5 em 100)                      |
| 100 mSv              | Risco de câncer mais tarde na vida (5 em 1000)                     |
| 50 mSv               | TLV para dose anual para trabalhadores de radiação em qualquer ano |
| 20 mSv               | TLV para dose média anual, em média ao longo de 5 anos             |

fonte: adaptada de Radiation effects and sources, 2016.

#### **4.9 Mitigação**

Através de estudos realizados com sobreviventes de bombas atômicas lançadas no Japão em 1945, foram estimados os riscos de câncer durante toda a vida para indivíduos ocupacionalmente expostos e para a população de um modo geral. Onde os primeiros, quando expostos a detritos ( $10^{-2}$  /SV), provavelmente terão câncer fatal; já a população inteira, quando exposta, terá ainda mais chance de ter câncer fatal (CNEN,2005).

O controle da exposição ao Radônio em ambientes internos e fechados pode ser feito de duas maneiras distintas: através da avaliação, classificação das áreas de trabalho e fazendo a monitoração das pessoas expostas. Já a diminuição das concentrações de Radônio no ambiente de trabalho de um local fechado pode ser feita

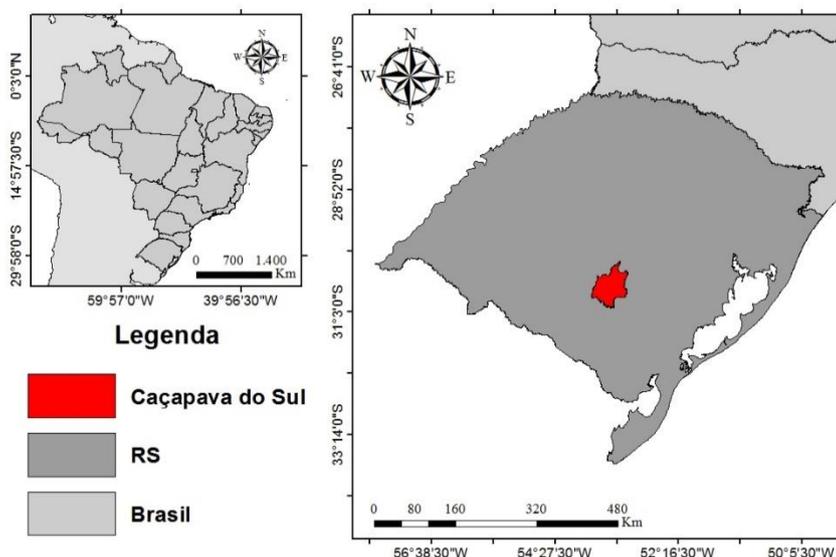
através de várias maneiras, destacando-se principalmente, um bom sistema de ventilação.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Área de estudo

O município de Caçapava do Sul é um município brasileiro, do estado do Rio Grande do Sul. Com uma extensão territorial de 3.047,113 km<sup>2</sup> e com aproximadamente 33.548 habitantes, segundo os dados do IBGE de 2020. Localiza-se a uma distância de 259,3 km até a capital do estado, Porto Alegre, ficando assim na região da Campanha Gaúcha/Pampa Gaúcho. É conhecida como a Capital da Geodiversidade, por possuir uma diversidade de contextos geológicos sem paralelo em escala estadual. Possui grandes ocorrências de praticamente todos os principais tipos de rochas, estruturas e mineralizações. A Figura 2, demonstra onde situa-se Caçapava do Sul.

Figura 2 - Localização da cidade de Caçapava do Sul – RS.



fonte: autora, 2021.

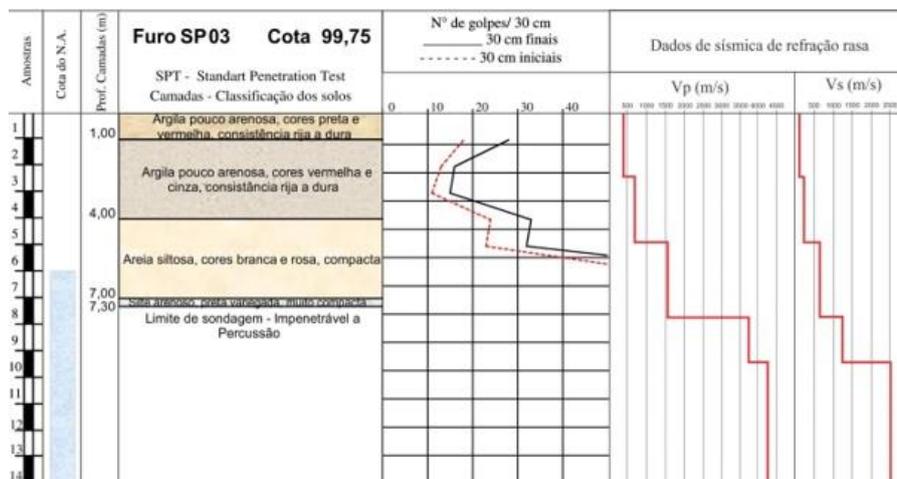
## 5.2 Geologia local

Caçapava do Sul encontra-se na área denominada Suíte Granítica, sob o Escudo Sul – Riograndense, que acontecem, geralmente, em áreas topográficas acidentadas associadas a afloramento de rochas, onde nesse caso o tipo de solo é gerado por rochas graníticas (BORBA et al., 2019). Ainda segundo Borba et al., a cidade possui ocorrências de todos os principais tipos de rochas (plutônicas, vulcânicas, sedimentares e metamórficas). Segundo Streck (2008), o Escudo Sul-rio-grandense tem predomínio de litologias pré-cambrianas. O que deixa o estudo ainda mais relevante, pois através dos diferentes tipos de rochas, pode ocorrer uma correção com uma possível taxa maior de concentrações de Radônio.

As análises ocorreram no interior da Universidade Federal do Pampa - Campus Caçapava do Sul, que se localiza na Avenida Pedro Anunciação, número 111, Bairro Vila Batista. Nesta área em questão encontram-se Neossolos, que são solos constituídos por material mineral/material orgânico pouco espesso (PEREIRA, 2015). Segundo a Embrapa (2006) apresentam domínio de características herdadas do seu material de origem, sendo então definidos como solos pouco evoluídos.

A figura 3 abaixo releva o tipo de solo encontrado no Campus Caçapava do Sul.

Figura 3 - Caracterização do solo da UNIPAMPA



Fonte: Pereira, 2015.

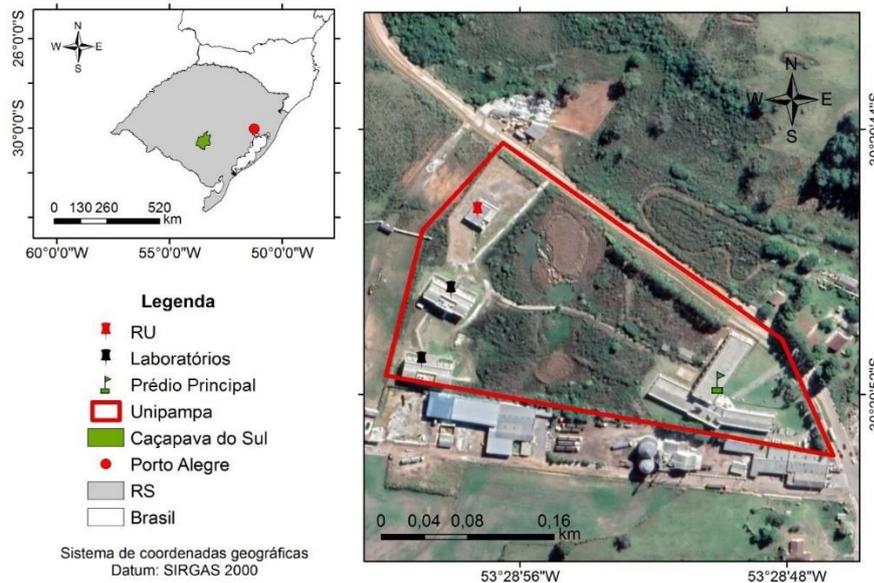
“O estudo comparativo entre a eficiência de sondagens SPT e sísmica rasa para determinação de parâmetros geotécnicos em uma área do município de Caçapava do Sul, RS” foi um estudo realizado na Universidade Federal do Pampa no ano de 2015. A partir do projeto intitulado foi possível identificar os tipos de solos encontrado nos resultados do estudo, no Campus Caçapava do Sul.

## **5.2 Trabalho de campo**

As análises e coletas foram feitas no município de Caçapava do Sul em uma única etapa, no período de 10 de agosto a 15 de setembro de 2021. Nesta, foram feitas as análises *in situ* da concentração de Radônio dentro do campus Caçapava do Sul. As determinações dos níveis de Radônio ocorreram em 32 pontos da faculdade, abrangendo pontos de alto e baixo fluxo de pessoas, e alta e baixa, ventilação em diferentes andares e prédios. Também, sucederam 2 coletas de amostras de água do lago da universidade, para teste de emissão de Radônio.

A figura 4 demonstra os edifícios da universidade. As análises ocorreram: Nos prédios Prof<sup>a</sup> Daniela de Rosso Tolfo (prédio principal), prédio Centro de Ciências e Tecnologia Ambiental e o prédio Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios. Não foi possível fazer análise do prédio do restaurante universitário (RU) pois não foi possível obter acesso; houve coleta e análise da água da lagoa da propriedade.

Figura 4 – Localização Universidade Federal do Pampa



Fonte: Autora, 2021.

### 5.3 Teste de níveis de Radônio *in situ*

Para determinar as concentrações de Radônio, será utilizado o equipamento Radon Eye modelo RD200, da fabricante RadonFTLab. Este equipamento utiliza uma câmara de ionização (pulsed ion chamber) que é o mais simples de todos os detectores de radiação, preenchidos com gás e é amplamente utilizada para a detecção e medição de certos tipos de radiação ionizante, como o Radônio, pois ele usa apenas as cargas discretas criadas por cada interação entre a radiação incidente e o gás, e não envolve os mecanismos de multiplicação de gás usados por outros instrumentos de radiação. Com relação a conversão das unidades de Radônio medidas pelo aparelho, ele mesmo faz sozinho as conversões.

Este equipamento detecta os níveis de Radônio de 7 a 3700 Bq/m<sup>3</sup>, com sensibilidade mínima de 1,110 Bq/m<sup>3</sup> (30pCi), com tempo de leitura de 60 minutos. Uma limitação deste equipamento é que ele detecta todos os emissores alfa, sem discriminação de energia, o que limita o grau de precisão do equipamento. Estudo anterior com o equipamento de referência AlphaGUARD, demonstrou uma sensibilidade relativa ao Radônio de 10% (ISHIKAWA, 2004), semelhante ao equipamento aqui usado. As leituras foram feitas de formas diretas, a utilização do

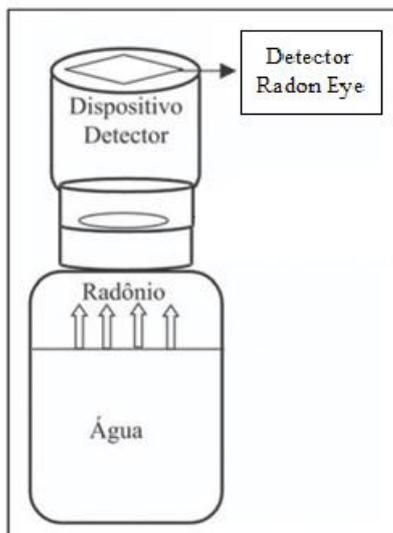
método de câmaras fechadas é mais comum e será utilizada nesse estudo, tanto pra análises de solo, quanto para água.

#### 5.4 Determinação da taxa de exalação de Radônio

O monitoramento de Radônio realizado em amostras do interior da Universidade Federal do Pampa, na cidade de Caçapava do Sul. Para esse estudo foi utilizado o método de detecção ativa, e realizado no laboratório da faculdade, a fim de se obter uma curva de emanção de Radônio.

O método utilizado é de câmaras fechadas, onde não há renovação do ar. O sistema foi inspirado no projeto de Marques et al. (2006). Assim, como a Figura 5 demonstra.

Figura 5 - Método de detecção em laboratório



fonte: Marques et al., 2006.

A água do lago foi coletada e adicionada dentro do garrafão de 20 L com o auxílio de um Becker de 1000 mL e com muito cuidado para que não houvesse a evaporação dos gases no momento do transporte, então o garrafão foi vedado imediatamente. Adicionou-se 10 L de água no garrafão de 20 L. Em seguida, o equipamento foi conectado na parte superior do galão, para que houvesse o início das

medições. Após 24 horas de análises, os dados foram coletados através do aplicativo Radon Eye e então para resultados mais precisos houve a repetição do experimento.

O sistema usado para medir a exalação do gás Radônio nas amostras foi composto de (1) Radon Eye D200; (2) 1 garrafão de 20L; (3) 1 garrafa pet 3L; (4) 1 tubo de cola de silicone (5) Fita adesiva. Assim como a Figura 6 demonstra.

Figura 6 - Equipamento utilizado para análise da água



Fonte: Autora, 2021.

Já a análise dos dados, ocorreu após a leitura do equipamento Radon Eye modelo RD200, que foi conectado a um celular, para que o aplicativo Radon Eye transferisse os dados obtidos. Os resultados foram passados para o computador e, utilizando o auxílio do software Excel 2016, foi possível realizar a análise gráfica dos dados.

### **5.5 Determinação da concentração de Radônio no ar**

A concentração de Radônio no interior dos prédios da universidade foi determinada utilizando o equipamento Radon Eye, modelo RD200. Inicialmente o equipamento foi ligado para que os níveis de Radônio pudessem começar a ser detectados. Então

garantindo que todo o Radônio medido fosse realmente daquele local, o Radon Eye foi configurado com o modo de fluxo em 60 minutos, sendo assim a cada 60 minutos uma medição (capacidade do equipamento). Onde a primeira saída de dados ocorreu em 60 minutos após a configuração do aparelho, e após 24 horas, houve a coleta dos dados e a mudança de local do aparelho para outro ponto, onde se repetiu o mesmo procedimento por um período de 24 horas. Assim sucessivamente em todos os outros pontos. Alguns pontos foram medidos por mais tempo que o padrão (24 horas), devido ao fato de que em finais de semana ou feriados, não se tinha acesso interno a universidade. Obtendo assim os dados analisados no local.

A tabela 11, demonstra todos os pontos analisados e suas localizações, juntamente com a data da coleta e os respectivos andares dos pontos dentro do edifício.

Tabela 11 – Pontos de análises.

| <b>Ponto</b> | <b>Data</b> | <b>Local</b> | <b>Andar</b> | <b>Ponto</b> | <b>Data</b> | <b>Local</b> | <b>Andar</b> |
|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| A01          | 10/ago      | Sala 101     | 1º           | C17          | 26/ago      | Sala 301     | 3º           |
| A02          | 11/ago      | Sala 102     | 1º           | C18          | 27/ago      | Sala 302     | 3º           |
| B03          | 12/ago      | Sala 205     | 2º           | C19          | 28/ago      | Sala 302     | 3º           |
| A04          | 13/ago      | Sala 107     | 1º           | C20          | 29/ago      | Sala 302     | 3º           |
| A05          | 14/ago      | Sala 107     | 1º           | C21          | 30/ago      | Sala 303     | 3º           |
| A06          | 15/ago      | Sala 107     | 1º           | C22          | 31/ago      | Sala 306/07  | 3º           |
| C07          | 16/ago      | Sala 305     | 3º           | C23          | 01/set      | Sala 306/01  | 3º           |
| A08          | 17/ago      | Sala 106     | 1º           | B24          | 02/set      | Sala Q201    | 2º           |
| A09          | 18/ago      | Sala 105     | 1º           | A25          | 03/set      | Sala Q116    | 1º           |
| A10          | 19/ago      | Sala 104     | 1º           | A26          | 04/set      | Sala Q116    | 1º           |
| A11          | 20/ago      | Sala 103     | 1º           | A27          | 05/set      | Sala Q116    | 1º           |
| A12          | 21/ago      | Sala 103     | 1º           | A28          | 06/set      | Sala Q116    | 1º           |
| A13          | 22/ago      | Sala 103     | 1º           | A29          | 07/set      | Sala Q116    | 1º           |
| B14          | 23/ago      | Sala 204     | 2º           | A30          | 08/set      | Sala Q115    | 1º           |
| B15          | 24/ago      | Sala 203     | 2º           | A36          | 14/set      | Sala L112    | 1º           |
| B16          | 25/ago      | Sala 201     | 2º           | A37          | 15/set      | Sala L110    | 1º           |

Fonte: Autora, 2021.

## 5.6 Análise dos dados

Para análise das concentrações de atividade de Radônio obtidas nas medidas, os dados foram transferidos para o software Excel 2016 para que a análise gráfica dos dados pudesse ser realizada. Para poder estimar as doses em cada um dos pontos e então gerar um gráfico de distribuição.

## 5.9 Radônio na água

Para analisar o Radônio na água, foi feita uma análise de medida indireta. Houve a coleta da água em um recipiente lacrado, bem cheio e sem conter ar dentro. Então levou-se esse recipiente ao laboratório de análises da Universidade Federal do Pampa Campus Caçapava do Sul, depois colocou-se a água em um recipiente dentro de uma câmara fechada e então foi possível ler o Radônio dentro da câmara. Pois, o gás Radônio volatiliza 100% em 24 horas, então é mais indicado ler a sua taxa de liberação no ar, já que o Radônio que estiver presente, irá se dissipar (SONG et al, 2020). As leituras das análises de água foram realizadas utilizando o mesmo método dos experimentos anteriores, método de câmara fechada, do equipamento Randon Eye.

A concentração na água foi calculada seguindo a equação sugerida para o “aquakit”, aparato de medição de Radônio no meio aquático para o aparelho de referência AlphaGuard, com pequenas modificações (Kasic et. al, 2016).

Cálculo 1:

$$C_{\text{Água}} = \frac{C_{\text{Ar}} \times \left( \frac{V_{\text{Sistema}} - V_{\text{Amostra}}}{V_{\text{Amostra}}} + k \right) - C_0}{1000}$$

Cálculo 2:

$$k = 0.106 + 0.405 e^{-0.052T}$$

Onde:

- $C_{\text{Água}}$  – É a concentração de Radônio na amostra de água Bq/L;
- $C_{\text{Ar}}$  – É a concentração de Radônio em Bq/m<sup>3</sup> medido pelo equipamento Radon Eye;
- $V_{\text{Sistema}}$  – é o volume interno do equipamento de medição, nesse caso 13 L transformado em mL;
- $V_{\text{Amostra}}$  – É o volume da amostra de água (mL);
- $C_0$  – É a concentração de Radônio na medição do equipamento antes da amostragem (Bq/m<sup>3</sup>);
- $k$  – É o coeficiente de difusão do Radônio;
- $T$  – É a temperatura da água (20° C).

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sequência são apresentados os resultados das análises de concentrações de Radônio, análises de água e do ar, para a compreensão das interações que são propostas nesse trabalho, encontradas pelas medições realizadas.

### 6.1 Análise do ar

A Tabela 11 demonstra as informações sobre os locais e datas. A Tabela 12 demonstra os valores das médias diárias, a média foi feita com os valores obtidos das 24 horas de análises de cada ponto. Também é possível observar os valores máximos de concentrações obtidos em cada ponto, onde as médias realizadas foram médias diárias, considerando apenas 24 horas. Caso um ponto ultrapasse o limite de 24 horas de análise, as horas seguintes foram consideradas como parte de um ponto seguinte, obtendo duas ou mais médias diárias no mesmo ponto.

Tabela 12 - Resultados análise do ar.

| <b>Local</b> | <b>Nível<br/>Máximo<br/>(Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Média<br/>(Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Local</b> | <b>Nível<br/>Máximo<br/>(Bq/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Média<br/>(Bq/m<sup>3</sup>)</b> |
|--------------|--|-------------------------------------|--------------|--|-------------------------------------|
| A01          | 137,00   | 104,67                              | C17          | 40,00  | 23,33                               |
| A02          | 106,00   | 72,88                               | C18          | 45,00  | 29,92                               |
| B03          | 101,00   | 21,63                               | C19          | 61,00  | 35,79                               |
| A04          | 66,00  | 47,88                               | C20          | 66,00  | 37,71                               |
| A05          | 143,00   | 89,33                               | C21          | 34,00  | 18,96                               |
| A06          | 117,00   | 90,71                               | C22          | 25,00  | 12,42                               |
| C07          | 25,00  | 13,42                               | C23          | 35,00  | 19,46                               |
| A08          | 74,00  | 56,79                               | B24          | 91,00  | 65,92                               |
| A09          | 78,00  | 57,71                               | A25          | 197,00   | 140,92                              |
| A10          | 55,00  | 36,50                               | A26          | 170,00   | 107,67                              |
| A11          | 64,00  | 29,79                               | A27          | 174,00   | 123,54                              |
| A12          | 40,00  | 27,08                               | A28          | 176,00   | 113,83                              |
| A13          | 31,00  | 18,25                               | A29          | 191,00   | 142,29                              |
| B14          | 64,00  | 48,21                               | A30          | 97,00  | 31,46                               |
| B15          | 24,00  | 13,00                               | A36          | 230,00   | 126,88                              |
| B16          | 28,00  | 13,58                               | A37          | 168,00   | 126,46                              |

Fonte: Autora, 2021.

Todos os pontos iniciados com a letra A são referentes aos pontos localizados nos primeiros andares dos edifícios. Todos os pontos iniciados com a letra B são referentes aos segundos andares dos prédios. Já os pontos que são iniciados pela letra C, trata-se de pontos localizados no terceiro andar.

Fica possível observar que os valores das médias dos pontos que estavam em andares inferiores (1º andar) foram consideravelmente maiores que os dos andares superiores (2º e 3º), sendo eles, os pontos que se iniciam com a letra A. Esses valores estão coerentes com a literatura estudada, onde torna-se claro, que os pisos em contato com o solo, emanam maiores concentrações de Rn<sup>222</sup>.

As concentrações de Radônio dependem essencialmente das características dos materiais de construção usados, no caso da Universidade Federal do Pampa, o piso é constituído por concreto. Estudos apontam que locais com menores taxas de ventilação, que se localizam andares térreos e com piso de cimento ou cerâmica contribuem para o aumento das concentrações do gás (SILVA, 2005). Também devido ao campus, bem como toda a área urbana de Caçapava do Sul, se encontrar sobre o Granito Caçapava de formação neoproterozóica (PELOSI e FRAGOSO-CESAR, 2003), a possibilidade de emissão de altas quantidades de Radônio cresce, uma vez que granitos são as formações geológicas com a maior concentração de Tório de todas as rochas ígneas como a Tabela 5 demonstra (página 28), o qual é um intermediário do decaimento do urânio até o chumbo, sistema do qual o Radônio também é intermediário (MOREIRA-SILVA, 2019). Portanto, esses dois fatores têm sido relacionados a acúmulo de Radônio nos ambientes e consequente aumento do índice de câncer, principalmente de pulmão (BERLIVET et. al, 2021).

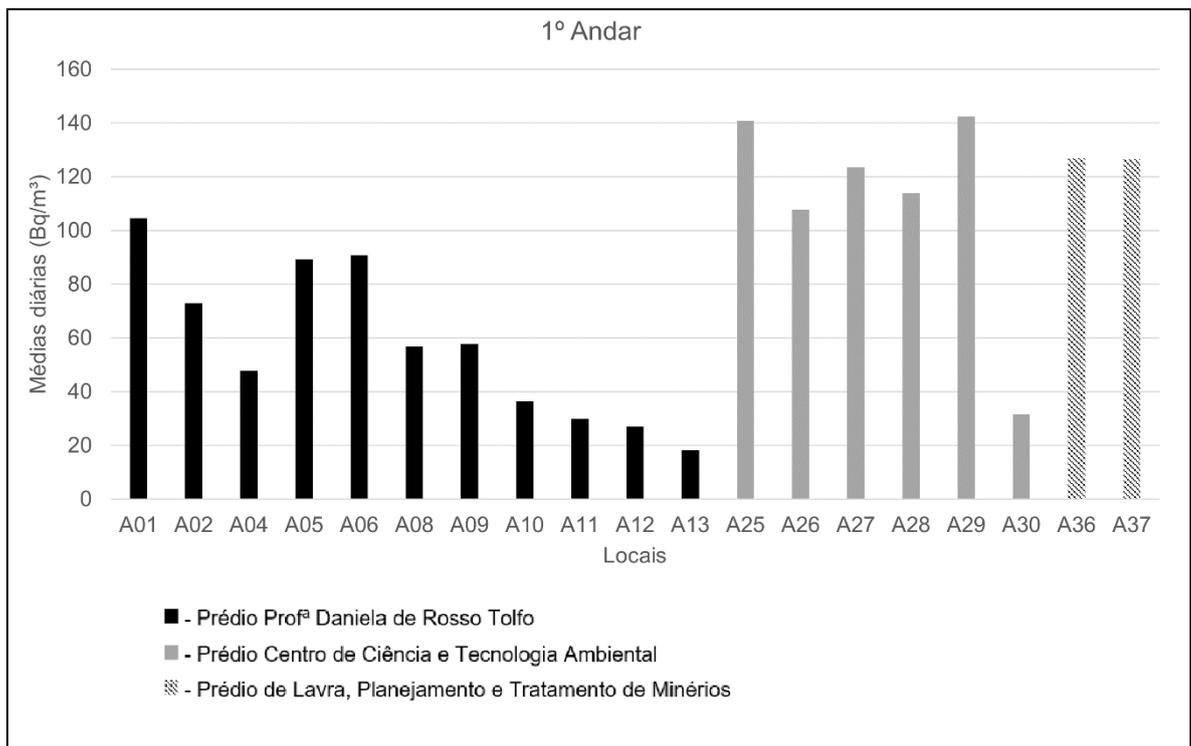
O clima também tem grande impacto na emissão do Radônio. Regiões de climas úmidos e quentes, tem uma redistribuição de tório e urânio nas paisagens devido os processos de intemperismo, isso gera um efeito direto na difusão do  $Rn^{222}$  do solo e rochas para as águas; águas freáticas em áreas graníticas tem grande probabilidade de estarem contaminadas por U, Ra e  $Rn^{222}$ , independentemente de qual tipo de paisagem se encontrem (REBELO, 1997).

O solo abaixo da Universidade Federal do Pampa é caracterizado como Neossolos. Neossolos Litólicos são caracterizados por apresentarem horizonte superficial sobre a rocha parcialmente alterada ou praticamente inalterada (MEDEIROS, 2007). Caçapava do Sul está sob o Suíte Granítica, as rochas graníticas tendem a ter porcentagens maiores contribuintes na evaporação de Radônio. Já o Tório pode ser encontrado adsorvido em argilas (LIESER; HILL, 1992). Isso explica por que alguns pontos de coletas obtiveram valores superiores a  $140 \text{ Bq/m}^3$ .

Entretanto, alguns pontos encontrados nos andares inferiores, obtiveram valores inferiores a  $140 \text{ Bq/m}^3$ . Isso pode ter ocorrido por interferência de muitos fatores, como a maior circulação de pessoas no local, a falta de vedação em janelas ou portas deixando assim que o ar entre com maior facilidade na área, ou até mesmo o fato de o piso ser composto pelo material concreto, que ajuda a reter grande parte da emissão. Já que estudos demonstram que cerca de 25 a 30% dos casos de câncer

de pulmão atribuíveis à exposição ao Radônio poderiam ser evitados se todas as concentrações de Radônio fossem inferiores a  $200 \text{ Bq/m}^3$  (AXELSSON et al, 2015). A Figura 7 demonstra os resultados das médias diárias das análises dos pontos dos andares térreos.

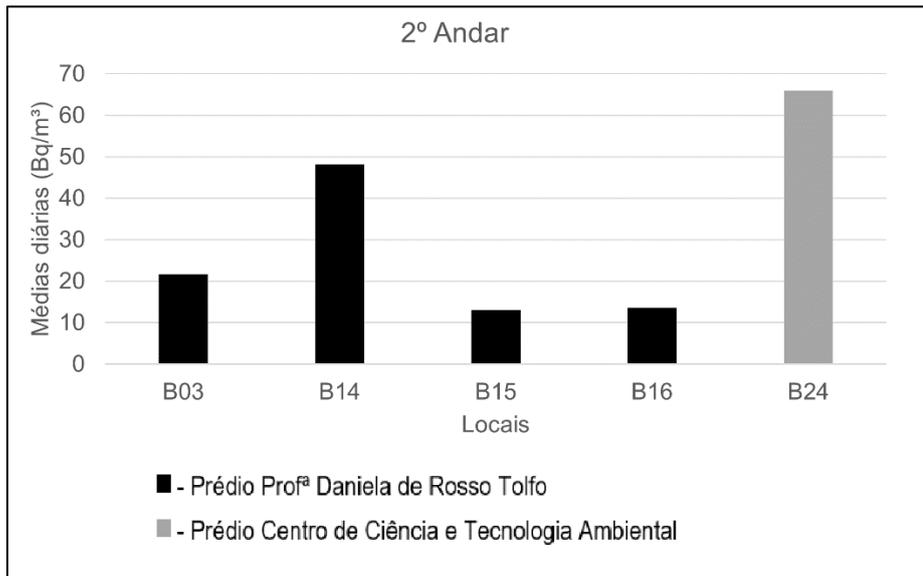
Figura 7 - Pontos 1º andar



Fonte: Autora, 2021.

Os riscos ocupacionais a saúde das pessoas expostas, estão presentes em alguns pontos da Universidade Federal do Pampa, porém a maioria dos pontos analisados obteve concentrações inferiores a  $140 \text{ Bq/m}^3$ , em sua média diária. A Figura 8, demonstra os resultados dos valores das concentrações obtidas nos pisos superiores das edificações.

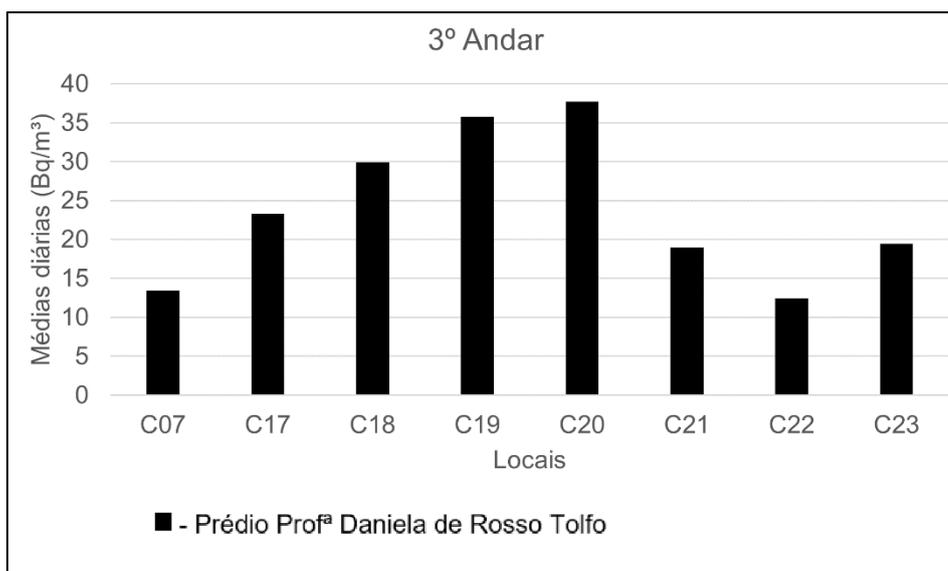
Figura 8 - Pontos 2º andar



Fonte: Autora, 2021.

É possível observar, uma queda significativa nos valores, em comparação com as médias de concentração do piso do 1º andar. A seguir, a Figura 9 demonstra os valores encontrados no 3º andar do edifício. Onde é possível identificar grande diferença em comparação com os valores de concentração encontrados no andar térreo e segundo andar.

Figura 9 - Pontos 3º andar



Fonte: Autora, 2021.

Sabe-se que quanto mais longe das rochas e solos, menores são os valores medidos de concentração do gás  $Rn^{222}$ , pois ele é um gás muito volátil que ao entrar em contato com o ar se dissipa facilmente e ao entrar em contato com outra estrutura feita de concreto acaba retendo grande parte e se acumulando no andar inferior.

A OMS indica que a exposição ao Radônio é o principal fator de risco para câncer de pulmão entre pessoas que nunca fumaram e o segundo maior fator de risco (atrás somente do uso de tabaco), entre os fumantes (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2009).

Segundo Darby et al. (2005) os estudos indicam que o Radônio aumenta o risco de câncer de pulmão linearmente, para cada 100 Bq/m<sup>3</sup> a mais de concentração de Radônio, o risco de câncer de pulmão aumenta em 16%. Logo, fica evidente que o risco de câncer de pulmão aumenta quando associado ao uso de tabaco.

Devemos destacar aqui que diversos estudos têm demonstrado que não existem valores seguros para exposição ao Radônio, ao contrário do que fica subentendido nas normas ambientais dos EUA e União Europeia, quando estes colocam valores de referência como limites seguros de exposição. Artigo de revisão da literatura de Darby et al. (2001), intitulado “Radônio: um provável cancerígeno em todas as exposições” demonstra bem este ponto, e relaciona aumento da incidência de câncer de pulmão no Reino Unido a valores bem abaixo do limite de 200 Bq/m<sup>3</sup> regulamentado naqueles países.

Ainda, desde a década de 80 no século XX, tem se relacionado a exposição ao Radônio a um aumento na incidência de leucemia, tanto em adultos como em crianças (LAW et. al, 2000). Este tópico tem sido palco de amplo debate e inúmeras evidências apontando para conclusões opostas tem sido demonstrada desde então. Neste sentido, Henshaw et. al, (1990) publicaram influente trabalho no renomado periódico The Lancet (uma revista científica sobre medicina), relacionando a exposição ao Radônio a leucemia mieloide bem como a outros tipos de canceres, tais como câncer renal, melanoma, e alguns tipos de cânceres infantil. Ainda sugere que doses tão baixas quanto 50 Bq/m<sup>3</sup> podem levar a um aumento de 13% a 25% na incidência de leucemia mieloide. Posteriormente, outros trabalhos demonstraram não haver relação entre a incidência de leucemia aguda em adultos e a exposição ao Radônio (LAW et. al. 2000), bem como não encontraram relação num estudo de coorte de 1990-2009 na França (BERLIVET et al., 2021).

Uma nova revisão de dados publicados no PubMed, feita por Jinyoung e HyeKyoung, e publicada este ano (2021) na *Environmental Research*, analisou estatisticamente diversos resultados previamente publicados, e demonstraram que, apesar da dificuldade em conduzir levantamentos epidemiológicos relacionados ao Radônio e das conseqüentes inconsistências observadas nos dados publicados, a tendência estatística é de um aumento na incidência de leucemia variando entre 3% e 12% a cada 100 Bq/m<sup>3</sup>, sem limites inferiores, portanto sem níveis seguros de exposição.

Dessa forma, os dados aqui apresentados indicam uma possível situação de risco associado aos ambientes do campus, em especial nas salas e laboratórios no subsolo e, em particular, aos servidores e alunos da universidade que se expõe durante longo tempo ao longo do dia, e durante muitos anos ao longo da vida profissional.

Algumas medidas simples podem ser tomadas para que esses ambientes aumentem o fluxo de ar nesses locais, visando assim a diminuição dos níveis de concentração de Rn<sup>222</sup>. Como o ato de abrir a/as porta e a/as janela de cada ambiente alguns minutos antes de fazer a utilização do local, para que ocorra a ventilação no local e a dissipação do Radônio presente no ar. Escalas quinzenais entre os servidores podem ser adotadas, para que o mesmo servidor não seja exposto com tanta frequência ao ambiente com níveis mais elevados de concentração desse gás, intercalando o responsável para fazer a aeração daquele local diariamente. Em casos mais graves, medidas podem ser aplicadas através da engenharia civil que podem evitar (ou até mesmo prevenir), de forma segura, a causa deste problema, com o aumento de fluxo de ar daquele local (BATISTA, 2017).

Alguns países têm incorporado na sua legislação (obrigatoriamente) a adoção de medidas preventivas contra o radônio em novas construções (SANTOS, 2010). Visando assim, a segurança da saúde ocupacional das pessoas que ali residem e, ao mesmo tempo, que evitam possíveis problemas futuros de exposição.

Devido a pandemia por covid 19, a faculdade se manteve fechada desde o início do ano de 2019, contando com a circulação somente de técnicos da manutenção, alguns professores e alunos autorizados que utilizaram os laboratórios para seus trabalhos de conclusão de curso. Logo, os locais analisados encontravam-se com pouca ventilação, devido à falta de circulação de pessoas, como acontece normalmente, em tempos não pandêmicos.

## 6.2 Análise de concentração do Rn<sup>222</sup> na água

Neste trabalho também foi analisado a quantia de Radônio dissolvido na água superficial em alagado presente no campus. Tal análise foi motivada como uma medida de exposição ambiental ao Radônio em seres aquáticos e terrestres que vivem neste ambiente rico em biodiversidade. Como descrito na metodologia, usamos uma abordagem indireta, tendo como referência o kit de medição de Rn<sup>222</sup> em água do equipamento de referência AlphaGuard, da mesma marca do Radon Eye aqui utilizado, com modificações conforme descrito por (ISHIKAWA, 2004). Em duas análises feitas em dias repetidos, obtivemos um valor médio de 1,658 Bq/L na água superficial da referida área. Tal valor está dentro do esperado e previamente descrito para águas superficiais, tendo em vista a emanção de Radônio diretamente na atmosfera. Em análises feitas por Louizi et. al (2004) na Grécia e no Chipre, análises de águas superficiais variaram de 1,2 a 24 Bq/L, dentro do valor encontrado aqui. Nestas áreas, altos valores foram encontrados em medições de águas subterrâneas e água potável oriunda de poços, reforçando o padrão aqui encontrado conforme demonstrado em trabalho de conclusão de curso de Geofísica da própria Unipampa, que mostrou níveis superiores a 300 Bq/L em águas subterrâneas da região, próximo ao campus Caçapava do Sul. (FARIAS, 2019).

## 7. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com as análises das concentrações do gás Radônio na água e no ar do Campus Caçapava do Sul na Universidade Federal do Pampa demonstraram preocupação, pois os dados literários sugerem que não existem níveis seguros de exposição ao Radônio.

Concentrações de 50 Bq/m<sup>3</sup> já estão sendo associados a maior incidência de câncer de pulmão, ou outros tipos de cânceres em casos de exposições crônicas. Sendo assim, este trabalho conclui que os níveis de Radônio no campus Caçapava do Sul apresentam potencial risco a saúde, especialmente nos ambientes térreos (inferiores), e em especial para servidores que frequentam os espaços por muitas horas diárias durante longos períodos. Os resultados obtidos com a análise da água

ficaram dentro do parâmetro de artigos estudados, porém também foram preocupantes, sendo então necessário um cuidado maior.

O presente estudo sugere medidas de adequação que podem ser realizadas de formas simples, para a diminuição da concentração de  $Rn^{222}$ , visando aumentar a aeração destes espaços, e reduzindo assim o risco à saúde ocupacional. Como abrir a porta de um local fechado e deixar o ar entrar por alguns minutos antes de ficar naquele ambiente por mais tempo, visando que a concentração de  $Rn^{222}$  (ali presente) se dissipe no ar, aumentando a aeração destes espaços e, portanto, reduzindo o risco ocupacional.

## 8. REFERÊNCIAS

AMARAL, P.G.Q. **Caracterização radiométrica e de exalação de Radônio em rochas ornamentais silicáticas beneficiadas no Estado do Espírito Santo**. 377f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2011.

AXELSSON G, ANDERSSON E. M., BARREGARD L. **Lung cancer risk from radon exposure in dwellings in Sweden: how many cases can be prevented if radon levels are lowered?** Cancer Causes Control. 2015.

BALDIK, R. et al., 2006. **Radon Concentration Measurement in the Amasra Coal Mine**, Turkey. Radiation Protection Dosimetry, 118, 122-125.

BATISTA, Wdileston Gomes. **(In) visibilidade regulamentar à exposição humana ao radônio na legislação brasileira e sua aferição indoor**. 2017.

BAYSSON, H., TIRMARCHE, M., TYMEN, G., GOUVA, S., CAILLAUD, D., ARTUS, J. C., ... & LAURIER, D. (2004). **Indoor radon and lung cancer in France**. *Epidemiology*, 15(6), 709-716.

BERLIVET, J.; HÉMON, D.; CLÉRO, É.; LELSCH, G.; LAURIER D.; FAURE L.; CLAVEL J.; GOUJON S. **Residential exposure to natural background radiation at birth and risk of childhood acute leukemia in France, 1990–2009**, Journal of Environmental Radioactivity, Volume 233, 2021.

BOM, Francisco Molina. **Controle de Radônio nas Minas de Ametista no RS**. Salão de Extensão (09.: 2008: Porto Alegre, RS). Caderno de resumos. Porto Alegre: UFRGS/PROEXT, 2008., 2008.

BORBA, A. W.; SILVA, E. L.; SELL J. C.; SOUZA, L. P. M. **Geomonumentos de Caçapava do Sul**. Universidade Federal de Santa Maria. Pró-Reitoria de Extensão – Santa Maria, RS: UFSM, PRE, 2019.

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral- **Impactos Radiológicos da Indústria do Fosfato**. [http://cetem.gov.br/publicacao/series\\_sed/sed-56.pdf](http://cetem.gov.br/publicacao/series_sed/sed-56.pdf). Accessed August 5, 2015.

CILE, S., ALTMSOY, N., CELEBI, N. **Radon Concentration in Three Underground Lignite Mines in Turkey**. Radiation Protection Dosimetry. v. 138, p. 78-82, 2010.

CNEN – NN – 3.01 de 13/03/2014. **“Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica”**

CNEN Comissão Nacional de Energia Nuclear (2005). **Diretrizes básicas de proteção radiológica**. Norma CNEN - NN - 3.01.

COHEN, B. L. (1980) **Health effects of radon from insulating buildings**, Health Physics, vol. 39. pp. 937-941.

CORRÊA, Janine Nicolosi. **Avaliação dos níveis de concentração de Radônio em ambientes e águas de poços no estado do Paraná.** 2011.

CRPR, The Canadian Radiation Protection Regulations, **Schedule 1** (SOR / 2000-203).

DARBY, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., et al., 2005 Jan 29. **Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies.** BMJ 330 (7485), 223.

DARBY, S., Hill, D., DOLL, R. **Radon: A likely carcinogen at all exposures.** Annals of Oncology, Volume 12, Issue 10, 2001, Pages 1341-1351.

DE OLIVEIRA SANTOS, Talita et al. **Estudo sobre o Radônio em minas subterrâneas brasileiras.** Águas Subterrâneas, 2015.

DEL CLARO, F. **Avaliação da concentração de Radônio-222 no ar de postos de trabalho de Curitiba/PR.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), Boletim nº28. **Perfil analítico do torônio e terras raras.** Rio de Janeiro, 1973, 72p.

DUARTE, C.R., BONOTTO, D.M., 2000. **Calibração em energia e concentração de espectrômetro gama para análise de U, The K.** Geociências, 19, 313 - 319.

EIDY M, TISHKOWSKY K. **Radon Toxicity.** [Atualizado em 27 de agosto de 2020]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; Janeiro de 2020.

EISENBUD, M.; GESSEL, T. **Environmental Radioactivity**. San Diego: Academic Press, 1997.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Radiation Sources and Doses**. Disponível em: <http://www.epa.gov/radiation/radiation-sources-and-doses>. Acesso em 21 dez 2015.

FARIAS, L. B. **Avaliação da concentração de Radônio-222 nas águas subterrâneas e o risco de exposição para a população de Caçapava do Sul**. Graduação em Geofísica. Universidade Federal do Pampa. 2019.

FATHABADI, N. et al. **Miners' Exposure to Radon and Its Decay Products in Some Iranian Non-Uranium Underground Mines**. Radiation Protection Dosimetry. v. 118, p. 111-116, 2006.

FIANCO, Ana Clara Butelli. **Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre, RS**. 2011.

FONSECA, Leandro Dalalibera. **A AIEA-Agência Internacional de Energia Atômica e a efetividade de suas medidas no cumprimento dos dispositivos do tratado de não-proliferação nuclear: estudo de caso do programa nuclear iraniano**. 2012.

FREITAS, C. M.; SILVA, M. A.; MENEZES, F. C. **O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres**. Ciência e Cultura, v. 68, n. 3, 2016.

GASCOYONE, M. **Uranium-series disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences**. Oxford: Claredon Press, cap.2, p.34-62, 1992.

GERALDO LP, SANTOS V, MARQUES AL, BOTARI A. **Medidas dos níveis de Radônio em diferentes tipos de ambientes internos na região da Baixada Santista, SP**. Radiologia Brasileira, v. 38, n. 4, p. 283-286, 2005.

HAERTING, F. H. & HESSE, W. **Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben**. Vierteljahresschrift für gerichtliche Medizin und Öffentliches Gesundheitswesen Sanitätswesen (1879).

HALIM Büyüksulu, F. Banu Özdemir, TUBA Özdemir Öge, HALIL Gökce, **Indoor and tap water radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) concentration measurements at Giresun University campus areas**, Applied Radiation and Isotopes, Volume 139, 2018, Pages 285-291, ISSN 0969-8043, 2018.

HENSHAW, D.L.; EATOUGH, J.P.; RICHARDSON, R.B. **Radon as a causative factor in induction of myeloid leukaemia and other cancers**, The Lancet, Volume 335, Issue 8696, 1990, Pages 1008-1012, ISSN 0140-6736.

IAEA, International Atomic Energy Agency (1989). **Radiation Monitoring in the Mining and Milling of Radioactive Ores, Report Safety Series N° 95**, Vienna.

IAEA, International Atomic Energy Agency (1996). **International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Source**, Vienna.

IAEA, International Atomic Energy Agency (2003). **Radiation protection against radon in workplaces other than mines**. Viena.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Caçapava do Sul**. 2020. Disponível em: <<https://brasil.rs/cacapava-do-sul/panorama>>. Acesso em: 15 de novembro de 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Introdução ao processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro. 2001.

ICRP - International Commission on Radiological Protection, 1993. **Protection against Radon-222 at Home and at Work**. Annals of ICRP publication 65, 23, Canada, United States.

ICRP, 1983. **Protection against Ionizing Radiation in the Teaching of Science**. ICRP Publication 36. Ann. ICRP 10.

ICRP - International Commission on Radiological Protection, 1986. **Radiation Protection of Workers in Mines**. Annals of ICRP Publication, 47, Canada, United States, 1986.

IPEN, 2002 - BELLINTANI, S. A.; GILI, F. das Neves - **Noções Básicas de Proteção Radiológica**, Apostila do IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares 2002.

JINYOUNG, Moon; HYEKYOUNG, Yoo. **Residential radon exposure and leukemia: A meta-analysis and dose-response meta-analyses for ecological, case-control, and cohort studies**. Environmental Research, Volume 202, 2021.

KASIĆ, Amela et al. **RADON ACTIVITY CONCENTRATION IN DRINKING WATER IN TUZLA CITY, BOSNIA AND HERZEGOVINA.** Volume 1. Pp 229 – 232. ISSN 2466-4294. 2016.

KHAN, H. A., QURESHI, I. E., TUFAIL, M., **Passive dosimetry of radon and its daughters using solid state nuclear track detectors (SSNTDs)**, Radiation Protection Dosimetry, v.46, n ° 3, p. 149-170, 1993.

LAW, R. G.; KANE, V. E.; ROMAN, E.; SMITH, A.; CARTWRIGHT, R. **Residential radon exposure and adult acute leukaemia.** The Lancet, Volume 355, Issue 9218, 2000, Page 1888, ISSN 0140-6736.

LIESAR, K. H.; HILL, R. **Hydrolysis and colloid formation of thorium in water and consequences for its migration behavior – comparison with uranium.** Radiochimica Acta, Munique, v.56, p. 37-45, 1992.

LINO, A. R., ABRAHÃO, C. M., AMARANTE, M. P. F., CRUZ, M. R. S. **O papel da implementação de políticas de prevenção da exposição ao Radônio no Brasil uma estratégia no controle do risco de desenvolver câncer de pulmão.** 2016.

LOUIZI, A., NIKOLOPOULOS, D., TZORTZI, A., THANASSAS, D., SEREFOGLOU, A., GEORGIU, E., ... & KOUKOULIOU. **Radon concentration measurements in waters in Greece and Cyprus.** V. (2004).

LUBIN, J. H., BOICE, J. D., EDLING, C., HORNUNG, R. W., HOWE, G., KUNZ, E., KUSIAK, R. A., MORRISON, H. I., RADFORD, E. P., SAMET, J.M., TIRMARCHE, M., WOODWAR, A., XIANG, LUDEWIG, P. and LORENZER, E. (1924). **Untersuchungen der Grubenluft in den Schneeberger Gruben auf den Gehalt von Radium-Emanation.**

MAGALHÃES MH; AMARAL ECS, SACHETT I, ROCHEDO ERR. **Radon-222 in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements.** J Environ Radioact. v. 67, p.131–43, 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 \***. 2006;39(3):215-218.

MARQUES A.L., SANTOS W., GERALDO L.P. **Direct measurements of radon activity in water from various natural sources using nuclear track detectors.** Appl Radiat Isot v. 60, p. 801–4, 2004.

MEDEIROS, PSC de et al. Caracterização de Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos do RS e análise do seu potencial agrícola. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo.** 2007.

MECHI, Andréa; SANCHES, Djalma Luiz. **Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo.** Estudos avançados, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

MOREIRA-SILVA, Marcos Roberto Junior. **Radioatividade natural em regiões do Brasil e Portugal: uma correlação entre exalação de Radônio e concentração de chumbo.** 2019.

NAZAROFF, W. W. and NERO JR. A. V. (1988) **Radon and its Decay Products in Indoor Air,** J. Wiley, New York.

NEUBERGER, J. (1991) **Residential radon exposure and lung cancer: An overview of published studies,** Cancer Detect. Prev, vol 15, 435-443.

NRC, National Research Council 1999. **Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI.** Washington, DC: The National Academies - BEIR VI (1999).

NRPB (1989). **Living with Radiation**, National Radiological Protection Board, UK.

NRPB (2000). **Health Risks from Radon**, National Radiological Protection Board, UK.

OLIVEIRA, Wilker Herkson de Almeida. **Exposição a Radônio em ambiente residencial e câncer de pulmão**: revisão de literatura. 2013.

OMS, Organização Mundial de Saúde. 2016. **Radon and Health: Key Facts**. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health> Obtido em. [Google Scholar]

OMS, Organização Mundial de Saúde. (Ed.). 2009. **WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective**. World Health Organization, Geneva, Switzerland, p. 94.

OTHMAN, I., AL-HUSHARI, M., RAJA, G., 1992. **Radiation Exposure Levels in Phosphate Mining Activities**. Radiation Protection Dosimetry, 45, 197 – 201.

PELOSI, Ana Paula de Meireles Reis; FRAGOSO-CESAR, Antonio Romalino S. **Proposta litoestratigráfica e considerações paleoambientais sobre o Grupo Maricá (Neoproterozóico III), Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul**. Revista Brasileira de Geociências, v. 33, n. 2, p. 137-148, 2003.

PEREIRA, Luisa Barbosa. **O estudo comparativo entre a eficiência de sondagens SPT e sísmica rasa para determinação de parâmetros geotécnicos em uma área do município de Caçapava do Sul, RS**. Universidade Federal do Pampa. 2015.

PETTA, Reinaldo Antonio; CAMPOS, T. F. C. **O gás Radônio e suas implicações para a saúde pública.** 2013.

REBELO, Antonio MA et al. Condicionamento climático-geológico na concentração de Radônio em águas subterrâneas. In: **Congresso geral de Energia Nuclear, Poços de Caldas.** 1997.

ROGERS, J.J.W.; ADAMS, J.A.S. **Thorium.** In: WEDEPOHL, K.H. (Ed.) Handbook of Geochemistry. New York: Springer-Verlag, 1969a. v.4, cap. 90.

ROGERS, J.J.W.; ADAMS, J.A.S. **Uranium.** In: WEDEPOHL, K.H. (Ed.) – Handbook of Geochemistry. New York: Springer-Verlag, 1969b. v.4, cap. 92.

SALIM, Leonardo Alfredo. **Radônio em área de extração de carvão mineral no município de Figueira (PR) - Rio Claro,** 2018. 146 f.: il., figs., tabs.

SANTOS, C. E. L., 2008. **Determinação dos Processos de Enriquecimento e das Concentrações de Radônio em Minas Subterrâneas de Fluorita e Carvão do Estado de Santa Catarina: Critérios para Avaliação dos Riscos Radiológicos.** Dissertação (Mestrado em Geociência). Instituto de Geociência. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SANTOS, M.E. **Desenvolvimento de metodologia para a determinação da razão isotópica  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$  por ICP-MS – um traçador natural para águas de produção em reservatórios de petróleo e águas subterrâneas.** Belo Horizonte; CDTN/CNEN, 2010. (Dissertação de mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais).

SANTOS, T. O. **Distribuição da concentração de radônio em residência e outras construções da região metropolitana de Belo Horizonte.** 2010. 146f. Universidade Federal de Minas Gerais.

SILVA, Almy Anacleto Rodrigues da. **Radônio e filhos em residências da cidade de São Paulo**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SKOWRONEK, J; ZEMLA B (2003). **Epidemiology of lung and larynx cancers in coal mines in Upper Silesia--preliminary results**. Health Phys, 85:365-370.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008, 222 p.

THUN M.J., RUDIN C.M. **Lung Cancer in Never Smokers: Clinical Epidemiology and Environmental Risk Factors**. 2011;15(18):5626-5645. doi: 10.1158/1078-0432.CCR-09-0376.LUNG.

UNEP, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, **Radiation effects and sources**, 2016.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee On The Effect Of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionization Radiation**. Vol. I – Sources, Report to General Assembly, with Scientific Annexes, United Nations, New York, 2000.

VEIGA, L. H. S., 2004. **Padrão de mortalidade em coorte histórica de trabalhadores expostos ao Radônio em uma mineração subterrânea de carvão, Paraná, Brasil**. Tese de Doutorado, Escola Nacional de Saúde Pública. Rio de Janeiro: s.n.

WARD, S.H. **Gamma-ray spectrometry in geologic mapping and uranium exploration**. Econ. Geol., v.75, p. 840 – 49, 1981.

WHO – World Health Organization. **World Cancer Report**. IARC Press, Lyon, 2003.

WHO – World Health Organization. **“Who Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective”**. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, France, 2009.

Y. S. and PIERCE, D. A., (1994). **Radon and Lung Cancer Risk: a Joint Analysis of 11 Underground Mines Studies**, US Department of Health and Human Services. Washington, DC.

YANCHAO, Song; JUNLIN, Wang; BING, Shang; HONGXING, Cui; YUNYUN, Wu; **Study on a new charcoal closed chamber method for measuring radon exhalation rate of building materials**, Radiation Measurements, Volume 134, 2020.

YU, K. N. et al. **Equilibrium Factor Determination Using SSNTDs**. Radiation Measurements. v. 43, p. 357 – 363, 2008.

## 9. APÊNDICE

## TABELA DE ANÁLISES DO AR OBTIDAS

| Pontos | Data   | Local       | Amostras coletadas a cada 60 minutos (Bq/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Média (Bq/m <sup>3</sup> ) |
|--------|--------|-------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|
|        |        |             | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  |                            |
| A01    | 10/ago | Sala 101    | 64  | 94  | 80  | 73  | 120 | 137 | 114 | 94  | 113 | 130 | 129 | 123 | 129 | 126 | 109 | 124 | 129 | 117 | 107 | 97  | 94  | 96  | 66  | 47  | 105                        |
| A02    | 11/ago | Sala 102    | 60  | 66  | 71  | 78  | 106 | 74  | 61  | 55  | 76  | 78  | 70  | 93  | 64  | 96  | 50  | 58  | 81  | 73  | 58  | 87  | 101 | 51  | 68  | 74  | 73                         |
| B03    | 12/ago | Sala 205    | 101   | 51  | 68  | 38  | 22  | 21  | 24  | 22  | 25  | 22  | 8   | 9   | 11  | 6   | 6   | 11  | 11  | 9   | 8   | 9   | 11  | 9   | 8   | 9   | 22                         |
| A04    | 13/ago | Sala 107    | 34  | 31  | 27  | 37  | 37  | 32  | 28  | 35  | 38  | 60  | 38  | 34  | 61  | 41  | 51  | 45  | 66  | 58  | 66  | 66  | 83  | 51  | 64  | 66  | 48                         |
| A05    | 14/ago | Sala 107    | 66  | 60  | 64  | 55  | 66  | 70  | 48  | 71  | 71  | 68  | 86  | 84  | 89  | 93  | 101 | 107 | 129 | 104 | 143 | 124 | 129 | 99  | 114 | 103 | 89                         |
| A06    | 15/ago | Sala 107    | 109   | 107 | 103 | 117 | 91  | 106 | 99  | 104 | 74  | 86  | 81  | 80  | 68  | 94  | 80  | 99  | 104 | 107 | 81  | 71  | 81  | 81  | 84  | 70  | 91                         |
| C07    | 16/ago | Sala 305    | 25  | 21  | 8   | 14  | 12  | 14  | 9   | 6   | 9   | 9   | 11  | 8   | 12  | 14  | 15  | 11  | 21  | 6   | 19  | 19  | 11  | 19  | 22  | 7   | 13                         |
| A08    | 17/ago | Sala 106    | 22  | 66  | 44  | 58  | 51  | 35  | 55  | 63  | 66  | 55  | 74  | 73  | 66  | 64  | 70  | 50  | 68  | 71  | 68  | 58  | 54  | 44  | 51  | 37  | 57                         |
| A09    | 18/ago | Sala 105    | 37  | 48  | 50  | 54  | 41  | 54  | 51  | 47  | 60  | 51  | 50  | 66  | 74  | 60  | 57  | 64  | 48  | 68  | 54  | 76  | 74  | 63  | 78  | 60  | 58                         |
| A10    | 19/ago | Sala 104    | 44  | 32  | 40  | 24  | 31  | 47  | 45  | 34  | 40  | 34  | 41  | 31  | 50  | 55  | 41  | 25  | 31  | 27  | 35  | 40  | 40  | 31  | 37  | 21  | 37                         |
| A11    | 20/ago | Sala 103    | 38  | 55  | 63  | 31  | 64  | 54  | 27  | 40  | 27  | 19  | 21  | 25  | 11  | 21  | 19  | 15  | 32  | 21  | 22  | 24  | 24  | 15  | 19  | 28  | 30                         |
| A12    | 21/ago | Sala 103    | 18  | 35  | 22  | 18  | 15  | 12  | 15  | 27  | 21  | 21  | 32  | 31  | 27  | 37  | 38  | 40  | 40  | 34  | 22  | 24  | 32  | 32  | 25  | 32  | 27                         |
| A13    | 22/ago | Sala 103    | 15  | 21  | 31  | 27  | 22  | 21  | 21  | 24  | 15  | 25  | 19  | 18  | 22  | 11  | 15  | 24  | 24  | 12  | 9   | 19  | 12  | 8   | 10  | 13  | 18                         |
| B14    | 23/ago | Sala 204    | 57  | 50  | 64  | 38  | 51  | 48  | 48  | 47  | 40  | 55  | 47  | 50  | 54  | 55  | 51  | 54  | 48  | 40  | 40  | 50  | 44  | 38  | 44  | 44  | 48                         |
| B15    | 24/ago | Sala 203    | 22  | 15  | 12  | 11  | 19  | 12  | 15  | 14  | 6   | 9   | 18  | 9   | 8   | 18  | 14  | 12  | 12  | 18  | 6   | 11  | 24  | 11  | 11  | 5   | 13                         |
| B16    | 25/ago | Sala 201    | 12  | 12  | 18  | 28  | 18  | 19  | 21  | 21  | 14  | 12  | 18  | 12  | 19  | 18  | 5   | 14  | 2   | 14  | 2   | 12  | 6   | 9   | 8   | 12  | 14                         |
| C17    | 26/ago | Sala 301    | 12  | 19  | 18  | 5   | 21  | 32  | 15  | 14  | 27  | 27  | 34  | 32  | 27  | 32  | 25  | 25  | 24  | 28  | 40  | 28  | 21  | 22  | 18  | 14  | 23                         |
| C18    | 27/ago | Sala 302    | 11  | 22  | 27  | 24  | 25  | 27  | 28  | 38  | 44  | 34  | 38  | 45  | 44  | 38  | 40  | 44  | 47  | 22  | 21  | 37  | 34  | 8   | 9   | 11  | 30                         |
| C19    | 28/ago | Sala 302    | 25  | 21  | 12  | 37  | 34  | 35  | 40  | 32  | 37  | 25  | 38  | 54  | 38  | 41  | 51  | 54  | 38  | 61  | 47  | 47  | 28  | 18  | 22  | 24  | 36                         |
| C20    | 29/ago | Sala 302    | 22  | 25  | 37  | 34  | 44  | 35  | 32  | 32  | 34  | 51  | 41  | 47  | 66  | 44  | 54  | 57  | 45  | 50  | 27  | 24  | 31  | 29  | 19  | 25  | 38                         |
| C21    | 30/ago | Sala 303    | 24  | 9   | 11  | 11  | 18  | 19  | 11  | 19  | 27  | 12  | 21  | 32  | 34  | 24  | 22  | 28  | 24  | 21  | 25  | 14  | 19  | 9   | 12  | 9   | 19                         |
| C22    | 31/ago | Sala 306/07 | 14  | 8   | 12  | 6   | 8   | 9   | 14  | 1   | 11  | 2   | 8   | 8   | 11  | 12  | 12  | 14  | 11  | 21  | 11  | 19  | 18  | 25  | 25  | 18  | 12                         |
| C23    | 01/set | Sala 306/01 | 15  | 15  | 11  | 11  | 8   | 8   | 11  | 19  | 21  | 24  | 14  | 24  | 27  | 24  | 32  | 34  | 35  | 18  | 25  | 24  | 19  | 18  | 12  | 18  | 19                         |
| B24    | 02/set | Sala Q201   | 83  | 73  | 84  | 91  | 63  | 73  | 73  | 68  | 60  | 63  | 58  | 86  | 61  | 54  | 66  | 55  | 68  | 60  | 51  | 45  | 64  | 58  | 64  | 61  | 66                         |
| A25    | 03/set | Sala Q116   | 84  | 101 | 101 | 116 | 114 | 119 | 101 | 97  | 153 | 129 | 164 | 133 | 119 | 129 | 143 | 160 | 150 | 196 | 164 | 180 | 197 | 187 | 159 | 186 | 141                        |
| A26    | 04/set | Sala Q116   | 170   | 143 | 134 | 164 | 139 | 139 | 123 | 106 | 106 | 93  | 70  | 70  | 78  | 68  | 101 | 109 | 91  | 114 | 86  | 120 | 101 | 101 | 74  | 84  | 108                        |
| A27    | 05/set | Sala Q116   | 84  | 89  | 83  | 78  | 84  | 96  | 104 | 109 | 96  | 126 | 123 | 137 | 127 | 133 | 149 | 170 | 174 | 144 | 120 | 139 | 153 | 160 | 150 | 137 | 124                        |
| A28    | 06/set | Sala Q116   | 147   | 169 | 146 | 156 | 137 | 136 | 120 | 116 | 103 | 86  | 91  | 64  | 68  | 70  | 70  | 87  | 89  | 93  | 99  | 129 | 127 | 124 | 129 | 176 | 114                        |
| A29    | 07/set | Sala Q116   | 191   | 153 | 159 | 177 | 137 | 143 | 119 | 150 | 140 | 149 | 167 | 147 | 167 | 143 | 147 | 130 | 126 | 140 | 126 | 127 | 124 | 124 | 116 | 113 | 142                        |
| A30    | 08/set | Sala Q115   | 97  | 89  | 48  | 37  | 50  | 41  | 24  | 25  | 25  | 19  | 40  | 21  | 31  | 14  | 19  | 12  | 21  | 18  | 34  | 25  | 21  | 18  | 14  | 12  | 31                         |
| A36    | 14/set | Sala L112   | 230   | 139 | 97  | 86  | 74  | 68  | 58  | 61  | 74  | 89  | 120 | 126 | 136 | 166 | 203 | 170 | 153 | 170 | 146 | 139 | 124 | 154 | 127 | 135 | 127                        |
| A37    | 15/set | Sala L110   | 80  | 103 | 113 | 109 | 121 | 111 | 156 | 146 | 126 | 117 | 129 | 136 | 168 | 154 | 125 | 113 | 131 | 154 | 148 | 125 | 121 | 123 | 112 | 114 | 126                        |