

CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM ROCHAS ORNAMENTAIS
BRASILEIRAS TIPO “CAFÉ BAHIA” E CONSEQUENTE IMPACTO NA
POPULAÇÃO E NO MEIO AMBIENTE

Paulo Roberto Rocha Ferreira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE,
da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro

Janeiro de 2025

CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM ROCHAS ORNAMENTAIS
BRASILEIRAS TIPO “CAFÉ BAHIA” E CONSEQUENTE IMPACTO NA
POPULAÇÃO E NO MEIO AMBIENTE

Paulo Roberto Rocha Ferreira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Aprovada por: Prof. Ademir Xavier da Silva

Prof. Jardel Lemos Thalhoffer

Prof. Rogério de Andrade Filgueiras

Prof. Fernando Carlos Araujo Ribeiro

Prof. José Ubiratan Delgado

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2025

Ferreira, Paulo Roberto Rocha

Concentração de radônio em rochas ornamentais brasileiras tipo “Café Bahia” e consequente impacto na população e no meio ambiente"/Paulo Roberto Rocha Ferreira – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XV, 69p: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 66-69.

1. Radônio em Rochas Ornamentais. 2. Técnicas de medição. 3. AlphaQuad. 4. Espectrometria gama. 5 Containers controladas de radônio. 6. Proteção radiológica. 7. Exposição do público e do meio ambiente. I. Silva, Ademir Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*À minha esposa Isabella, minha grande
incentivadora em todos os momentos da minha vida,
pela paciência, ensinamentos, compreensão e muito
carinho e aos meus amados filhos Guilherme e
Nathália por todo carinho, amizade e incentivo na
minha vida profissional.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) pelo conhecimento técnico-científico adquirido para a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer ao orientador e amigo Prof. Dr. Ademir Xavier da Silva pela oportunidade dada a mim, por sua amizade, orientação e principalmente na compreensão das minhas ausências relacionadas a execução de minhas atividades profissionais.

Aos professores da COPPE/PEN pelos conhecimentos transmitidos ao longo da minha trajetória no curso de doutorado e a todo corpo administrativo pela ajuda em todos os processos administrativos.

Aos meus pais, Adalberto e Conceição pelo esforço realizado durante minha educação e instrução que me propiciou chegar até aqui, fato este de suma importância para toda minha família e para mim.

Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria, instituição onde iniciei minha vida profissional como bolsista de Iniciação Científica, responsável pela minha formação profissional e onde estou a 42 anos.

A Direção do Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD na liberação e ao apoio total para a realização deste trabalho, sem este não poderia ter realizado.

Aos amigos Charles Dickens do Carmo Lacerda Mouço (in memoriam), Cesar Luiz Vieira Ney, Júlio José da Silva Estrada (in memoriam) e Reynaldo Xavier (in memoriam) com os quais adquiri grande conhecimento relacionado as minhas atividades profissionais desenvolvidas no IRD.

Em especial ao amigo Luiz Ernesto Santos de Carvalho Matta pela amizade de mais de 40 anos neste instituto.

As amigas Sueli da Silva Peres, Lais de Souza, Mariza Ramalho Franklin e Heliane Zilberberg pelo carinho e incentivo na realização e término deste trabalho e Fernando Ribeiro pelo trabalho de revisão e sugestões do texto nas diversas etapas do desenvolvimento desse trabalho.

Agradecimento a Ex Diretora do IRD Dra. Dejanira da Costa Lauria uma amiga muito especial e grande incentivadora deste e de tantos outros trabalhos que desenvolvi no IRD.

Agradecimento aos Ex Diretores do IRD os Drs. José Ubiratan Delgado e Renato de Prinzio no apoio a minha carreira e a realização deste trabalho e principalmente pela amizade.

Aos amigos da Divisão de Radioproteção Ambiental e Ocupacional do Instituto de Radioproteção e Dosimetria – DIRAD/IRD/CNEN pelos ensinamentos, pela amizade e incentivo na realização deste trabalho e de muitos outros que desenvolvemos ao longo destes anos.

Ao Centro de Tecnologia Mineral CETEN na gentileza e realização da moagem das rochas ornamentais para análise por espectrometria gama.

Reafirmo meus agradecimentos a todos que citei e aproveito para agradecer também aos que, porventura, tenha deixado de citar. Dedico a vocês este trabalho, mérito da cooperação de todos.

“Alguns colegas olhavam-me como se eu fosse um animal, ninguém me dava uma palavra, os professores pareciam nem estar lá para mim, e nem sempre tomavam as minhas perguntas quando eu pedia.

Mas, dediquei-me tanto que, depois, começaram a procurar-me para lhes dar explicações e esclarecer as suas perguntas”

Palavras de George McLaurin, o primeiro homem negro admitido na Universidade de Oklahoma em 1948.

“A única arma capaz de transformar o mundo é a educação.”

“Estudem Sempre!”

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM ROCHAS ORNAMENTAIS BRASILEIRAS
TIPO “CAFÉ BAHIA” E CONSEQUENTE IMPACTO NA POPULAÇÃO E NO
MEIO AMBIENTE

Paulo Roberto Rocha Ferreira

Janeiro/2025

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Programa: Engenharia Nuclear

A maior parte da exposição da população no mundo à radiação ionizante é causada principalmente pelo radônio, razão pela qual, é importante identificarmos o problema e medirmos os níveis de radônio em residências, independentemente das diferentes contribuições feitas pelos materiais de construção ^(6, 9 e 10).

O objetivo deste estudo foi medir os níveis de radioatividade da rocha ornamental “Café Bahia” e consequente impacto na população e no meio ambiente uma vez que este tipo de rocha é muito utilizada como revestimento em residências nos mercados brasileiros e internacionais ⁽⁸⁾.

Amostras deste tipo de rocha granítica foram obtidas e a concentração de radônio foi medida com o AlphaGUARD e um Container para Emissão e Calibração ^(2, 3 e 12).

As concentrações de radônio (²²²Rn) e seus produtos de decaimento foram determinadas após 25 dias de medição, os resultados variaram de 1,508 a 7,850 kBq.m⁻³ com uma média de 4,679 kBq.m⁻³, os resultados estão acima dos níveis de referência para a situação de exposição existente para residências ⁽⁵⁾ e acima dos níveis da legislação brasileira para o público e meio ambiente ⁽⁴⁾.

A taxa de dose foi obtida com um sistema portátil de medições E600 com SHP 270, os resultados variaram de 0,014 µSv.h⁻¹ a 0,354 µSv.h⁻¹ na face polida, e de 0,014 µSv.h⁻¹ a 0,304 µSv.h⁻¹ com a face não polida. As taxas de dose medidas estão abaixo dos limites recomendados para o público, que é de 0,5 µSv.h⁻¹ ⁽⁴⁾.

As amostras também foram analisadas pela técnica de espectrometria gama com as concentrações médias dos radionuclídeos de interesse variando no intervalo de: 214Pb (1,846E+02 a 4,029E+02); 214Bi (1,798E+02 a 3,862E+02) e 228Ac (3,463E+02 a 5,268E+02).

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

RADON CONCENTRATION IN BRAZILIAN ORNAMENTAL ROCKS OF THE
“CAFÉ BAHIA” TYPE AND CONSEQUENT IMPACT ON THE POPULATION
AND THE ENVIRONMENT

Paulo Roberto Rocha Ferreira

January/2025

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Department: Nuclear Engineering

Most of the world's population's exposure to ionizing radiation is caused primarily by radon, which is why it is important to identify the problem and measure radon levels in homes, regardless of the different contributions made by building materials ^(6, 9 and 10).

The objective of this study was to measure the radioactivity levels of the ornamental rock “Café Bahia” and the consequent impact on the population and the environment, since this type of rock is widely used as cladding in homes in the Brazilian and international markets ⁽⁸⁾.

Samples of this type of granite rock were obtained and the radon concentration was measured with the AlphaGUARD and a Container for Emanation and Calibration ^(2, 3 and 12).

The concentrations of radon (^{222}Rn) and its decay products were determined after 25 days of measurement, the results ranged from 1,508 to 7,850 kBq.m^{-3} with an average of 4,679 kBq.m^{-3} , the results are above the reference levels for the existing exposure situation for residences ⁽⁵⁾ and above the levels of Brazilian legislation for the public and the environment ⁽⁴⁾.

The dose rate was obtained with a portable E600 measurement system with SHP 270, the results ranged from 0.014 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ to 0.354 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ on the polished face, and from 0.014 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ to 0.304 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ with the unpolished face. The measured dose rates are below the recommended limits for the public, which is 0.5 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ ⁽⁴⁾.

The samples were also analyzed by the gamma spectrometry technique with the average concentrations of the radionuclides of interest ranging in the range of: ^{214}Pb (1.846E+02 to 4.029E+02); ^{214}Bi (1.798E+02 to 3.862E+02) and ^{228}Ac (3.463E+02 to 5.268E+02).

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA	iii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
SUMÁRIO.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xv
CAPÍTULO I.....	1
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Problemas Encontrados no Mercado Externo - China e EUA um caso e Análise.....	2
1.2 - Objetivo.....	3
CAPÍTULO II.....	5
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1 - Tipos e Rochas.....	5
2.1.1 - Rochas ígneas ou magmáticas.....	6
2.1.2 - Rochas metamórficas.....	6
2.1.3 - Rochas sedimentares.....	7
2.2 - Produção das Rochas Ornamentais Brasileiras.....	7
2.3 - Mercado de Rochas Ornamentais.....	8
2.4 - Granito.....	10
2.4.1 - Composição Mineralógica.....	12
2.4.2 - A Rocha Ornamental - Café Bahia.....	12
2.5 - O radônio e o Meio Ambiente.....	14
2.6 - Medições de Radônio.....	23
2.7 - Dispositivos de Medição.....	26
2.7.1 - Detetores de Radônio.....	26
2.8 - Medições de Avaliação da Concentração de Radônio Relacionadas aos Materiais de Construção	32
2.9 Risco de Câncer de Pulmão para a Público e Meio Ambiente: Radônio em ambientes Internos.....	32
2.10 - Base teórica para o desenvolvimento deste trabalho.....	33

CAPÍTULO III	37
3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 - Divisão de Radioproteção Ambiental, Ocupacional e de Análises Ambientais	37
3.2 - Laboratório de Radiometria.....	38
3.3 - Laboratório de Radônio - LabRn.....	40
3.4 - Metodologia para a Quantificação da Exalação do Gás Radônio em Rochas Ornamentais.....	44
3.5 - AlphaGUARD PQ2000 PRO.....	46
3.6 – Preparação de amostras para o Sistema de Espectrometria Gama.....	48
3.7 – Medições de Taxa de Dose.....	49
CAPÍTULO IV	50
4 –RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1 Resultados das Medições Realizadas e Análises	50
4.1.1 - Análises para as Amostras de Rochas Ornamentais em 24 horas	50
4.1.2 - Análises para as Amostras de Rochas Ornamentais em 25 dias.....	52
4.1.3 - Análises para as Amostras de Rochas Ornamentais por Espectrometria Gama.....	55
CAPÍTULO V	62
5- CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exportações brasileiras em 2023.....	1
Figura 2: Camadas da Terra.....	4
Figura 3: Exemplo de rocha ígneas ou magmáticas.....	5
Figura 4: Exemplo de rocha metamórfica.....	5
Figura 5: Exemplo de rocha sedimentar.....	6
Figura 6: Sequência de sedimentação.....	7
Figura 7: Blocos de Sienitos.....	8
Figura 8: Distribuição mundial de exposição à radiação – UNEP/UNSCEAR.....	14
Figura 9: Exposições médias do público por fontes de radiação – UNEP/UNSCEAR....	14
Figura 10 Apresenta as vias de como o gás radônio penetra no interior das residências..	16
Figura 11: Série natural do ^{238}U	20
Figura 12: Série natural do ^{232}Th	21
Figura 13: Fenômenos de emanação e exalação.....	21
Figura 14: Montagem do container de difusão	25
Figura 15: Montagem do container de difusão.....	25
Figura 16: Câmara de difusão.....	25
Figura 17: Filtro (1) impede a entrada dos produtos de decaimento do radônio dentro da câmara.....	26
Figura 18: Detalhes do detector passivo CR39 RSKS RADOSYS	26
Figura 19: Traços da partícula alfa revelados no CR39 da RADOSYS.....	27
Figura 20: (a) Carvão ativado acondicionado em recipiente de alumínio coberto com filtro de fibra de vidro; (b) carvão ativado acondicionado em recipiente de alumínio coberto com filtro de fibra de vidro e tela metálica; (c) dosímetros de carvão ativado prontos para serem inseridos na câmara.....	28
Figura 21: Dosímetros de carvão ativado na estufa e transferidos para o dissecador.....	28
Figura 22: Dispositivo AlphaGUARD.....	29
Figura 23: Dispositivo RAD 7.....	29
Figura 24: AlphaGUARD e RAD 7 para coleta e medição de radônio em água.....	30
Figura 25: Dispositivo para borbulhar e emanar o radônio.....	31
Figura 26: Sistema AlphaGUARD, bomba de ar e borbulhador para emanação	31

Figura 27: Sistema composto de AlphaGUARD, bomba de ar e garrafão (container) contendo as rochas.....	35
Figura 28: Visão e detalhes do container para emanção e calibração da SAPHYMO....	36
Figura 29: Sistema Espectrometria Gama CAMBERRA.....	39
Figura 30: Sistema Espectrometria Alfa EG&G ORTEC.....	39
Figura 31: Sistema para determinação alfa Total: MS-2 e RD14 e SAC4.....	39
Figura 32: Sistemas para determinação Beta Total: BC 4.....	40
Figura 33: Sistema de revelação e contagens de traços da RadoMeter 2000 e TASLImage.....	41
Figura 34: Sistema de medição de radônio AlphaGUARD e Rad 7.....	42
Figura 35: Sistema AquaKit do Alpha Guard.....	42
Figura 36: Material de referência ^{222}Rn (padrão de emanção).....	43
Figura 37: PYLON 190 Padrão para filhos (^{226}Ra e ^{228}Th).....	43
Figura 38: PYLON 1025 Padrão de calibração de fluxo contínuo ^{226}Ra (^{222}Rn).....	43
Figura 39: PYLON 1150 Padrão para calibração (^{226}Ra)	43
Figura 40: Container para emanção e calibração da SHAPHYMO.....	44
Figura 41: Posicionamento da amostra e do AlphaGUARD no interior do container.....	45
Figura 42: Conexões externas do container.....	46
Figura 43: Esquema do AlphaGUARD.....	47
Figura 44: Sistema montado para o ensaio.....	47
Figura 45: Amostras preparadas para análises por espectrometria gama	48
Figura 46: Exemplos de geometria de medição para o sistema de espectrometria gama..	49
Figura 47: Sistema de medição de taxa de dose – E600 e SHP 270.....	49
Figura 48: Comparação da exalação máxima de radônio das seis amostras selecionadas durante 25 dias de exposição.....	54
Figura 49: Comparação da exalação média de radônio das seis amostras selecionadas durante 25 dias de exposição.....	55
Figura 50: Localização e distância entre a Província de Riacho Santana e a Unidade de Concentrado de Urânio – URA/Caeté/BA – 75 Km.....	57
Figura 51: Levantamentos aerogamaespectrometrica projeto Vale do Paramirim.....	58
Figura 52: Unidades Litoestratigráficas do Brasil – Serviço Geológico do Brasil.....	59

Figura 53: Litoestratigrafia 1000000 – Serviço Geológico do Brasil.....	60
Figura 54: Equivalente em Urânio – Serviço Geológico do Brasil.....	60
Figura 55: Geologia de interesse – Serviço Geológico do Brasil.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Perfil da produção brasileira por tipo de rocha – 2023.....	9
Tabela 2: Distribuição estadual da produção de rochas ornamentais no Brasil – 2020.....	10
Tabela 3: Resultado da Caracterização Tecnológica da Rocha Silicáticas Café Bahia da Região Nordeste.....	13
Tabela 4: Rochas da Ornamentais do Brasil - Principal Jazimento do Café Bahia.....	13
Tabela 5: Dose efetiva anual agregada para um ocupante vai depender do tempo de ocupação anual.....	17
Tabela 6: Características dos diferentes dispositivos de medição do gás radônio.....	24
Tabela 7: Principais métodos e detectores para a medição de radônio em ambientes residenciais.....	24
Tabela 8: Resultado das medições realizadas para 24 horas.....	51
Tabela 9: Resultado das medições realizadas para 25 dias.....	53
Tabela 10: Resultados da análise por espectrometria gama.....	56

CAPÍTULO I

1 – INTRODUÇÃO

Em 2008, algumas agências de comunicação dos EUA noticiaram a existência de problemas relativos aos níveis de radioatividade e particularmente de exalação de gás radônio nas rochas graníticas, que constituem materiais largamente utilizados para a elaboração de “countertops” (bancadas) naquele país. Destituídas do mínimo rigor técnico e com viés alarmista, essas notícias causaram preocupação entre os consumidores e geraram numerosos pedidos de esclarecimento para os fornecedores. O tema tornou-se, portanto, motivo de mobilização de instituições e empresas brasileiras, na medida em que o Brasil naquela época e até hoje é o maior exportador de rochas, em valor e volume físico, para o mercado dos EUA, destacando-se aí os granitos com uma participação de 80% do total exportado ⁽⁷⁾, (Figura 1).

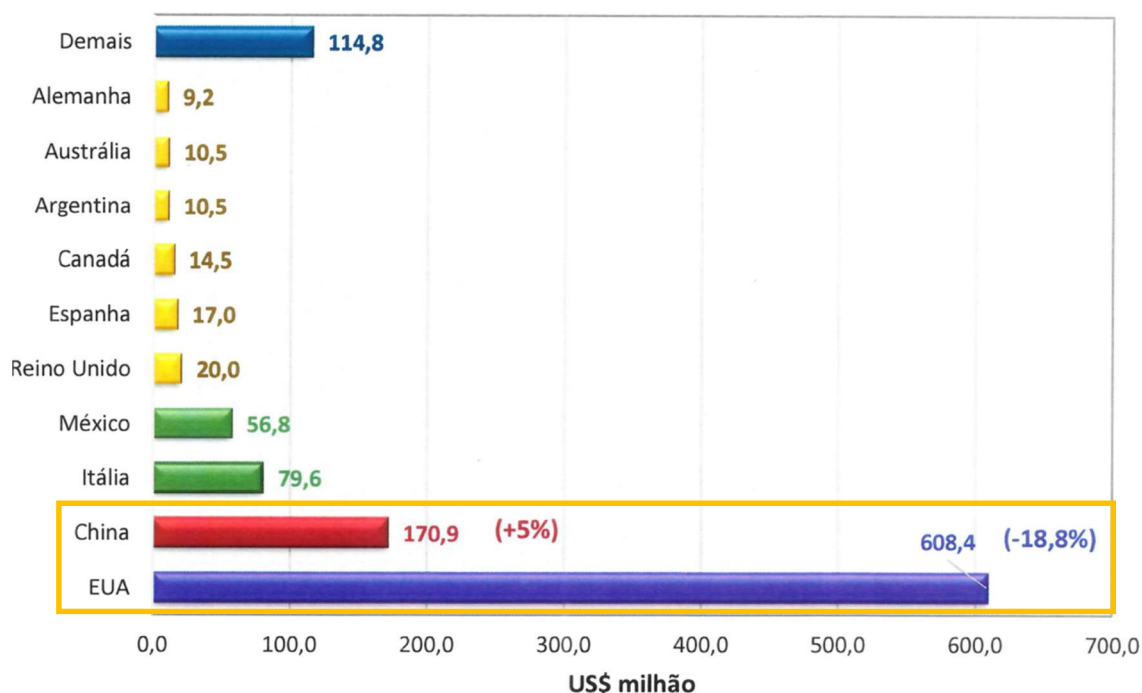


Figura 1: Exportações brasileiras em 2023

As notícias veiculadas em 2008 nos EUA relacionando as rochas ornamentais brasileiras com concentrações de radônio e taxas de exposição gama elevadas colocaram

esse mercado partir deste momento vulnerável em relação ao comércio interno e externo brasileiro de rochas ornamentais.

A preocupação da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS) em relação às barreiras alfandegárias com os diversos tipos de rochas ornamentais brasileiras teve início em 2010 quando foi iniciado o projeto “Apoio a Normalização e Avaliação da Conformidade de Rochas Ornamentais” com a participação das seguintes instituições:

Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP;

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT;

Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO;

Centro de Tecnologia Mineral – CETEM;

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIRochas e;

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD/CNEN.

Durante a execução do “Projeto Rochas” a Divisão de Radioproteção Ambiental, Ocupacional e de Análises Ambientais - DIRAD do Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD obteve êxito em equipar, montar e padronizar os ensaios relacionados com as medições de radônio consolidando assim o Laboratório de Radônio – LabRn da DIRAD bem como as medições realizadas com o sistema de espectrometria gama do Laboratório de Radiometria da DIRAD para determinar e quantificar a os radionuclídeos naturais, no entanto não obtivemos êxito na acreditação do ensaio de medição gama em rochas ornamentais junto ao INMETRO.

Em 2023 o Brasil exportou rochas ornamentais para 140 países. Os dez principais destinos foram EUA, China, Itália, México, Espanha, Canadá, Argentina, Austrália e Alemanha nesta ordem. No balanço geral as exportações para estes dez países contribuíram com US\$ 997 milhões.

1.1 - Problemas Encontrados no Mercado Externo – China e USA um Caso em Análise

A China, o segundo maior importador de rochas ornamentais brasileiras as autoridades alfandegárias do porto de Xiamen, dificultaram naquele período a entrada de *Sienitos*, especialmente o Café Bahia, com base em uma suposta concentração mais elevada de radionuclídeos, o produto exportado para a China é o bloco de *Sienito*.

Os principais usos para o produto Café Bahia estão no segmento da Construção Civil. Os blocos são serrados e as chapas obtidas (slabs), polidas e recortadas (cut to size), são utilizadas para revestimentos de pisos e fachadas ou aplicadas como material decorativo em edificações imobiliárias. O produto brasileiro preenche inúmeras requisições desejadas pelo mercado chinês, tais como cor, textura, dureza, uniformidade, confiabilidade, preço e escala de produção. Tais condições contribuíram para consagrar o *Café Bahia* nesse mercado.

Foi verificado ao longo do tempo, através de alguns clientes chineses, uma restrição ao produto brasileiro, em decorria da concentração de radioatividade medida na rocha Café Bahia, e seu enquadramento no padrão estabelecido na Norma Chinesa GB6566-2010⁽¹⁴⁾, que dispõe sobre "Limite de Radionuclídeos em Material de Construção".

1.2 – Objetivo deste Trabalho

Dado a importância econômica do tema e do potencial exposição de membros do público e o meio ambiente ao gás radônio e da taxa de dose gama provenientes do uso da rocha tipo “Café Bahia” em residências este trabalho se propõe avaliar os níveis de radioatividade das rochas Café Bahia.

Com o desenvolvimento deste trabalho iremos responder e propor questões importantes como:

1. Obter e analisar um número diversificado de rochas tipo “Café Bahia” do Brasil para avaliação radiológica;
2. A *taxa de exalação* de radônio (Bq.m^{-3}) da rocha Café Bahia;
3. A *exposição* ($\text{Bq.m}^{-3}.\text{h}$)
4. A *taxa de dose* da rocha Café Bahia (Sv.h);
5. As *concentrações dos radionuclídeos* encontradas na rocha Café Bahia pela técnica de espectrometria gama;
6. Elaboração de um *mapa das estimativas* de áreas com probabilidade de encontramos concentrações de radônio que possam impactar no público e meio ambiente e;

CAPÍTULO II

2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 - Tipos de Rochas

A litosfera (Figura 2), a camada superficial e sólida da Terra, é composta por rochas, que, por sua vez, são formadas pela união natural entre os diferentes minerais.

Por definição “rocha” é um agregado sólido e natural de: grãos minerais, matéria orgânica, material vítreo, ou combinação dos três.

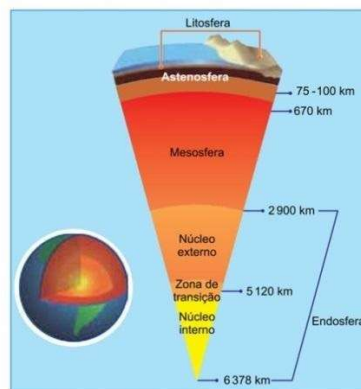


Figura 2: Camada superficial e sólida da Terra

Assim, em razão do caráter dinâmico da superfície, através de processos como o *tectonismo*, *intemperismo*, *erosão entre outros*, existe uma grande variação de tipos de rochas.

Dessa forma, foram elaborados vários tipos de classificação das rochas.

A forma mais conhecida concebe-as a partir de sua origem, isto é, a partir do processo que resultou na formação dos seus diferentes tipos.

Nessa divisão, existem três tipos principais:

2.1.1 - *Rochas ígneas ou magmáticas*: são aquelas que se originam a partir da solidificação do magma ou da lava vulcânica. Elas costumam apresentar uma maior resistência e subtipos geologicamente recentes e de formações antigas.

As rochas ígneas ou magmáticas dividem-se em dois tipos:

a) Rochas ígneas extrusivas ou vulcânicas: são aquelas que surgem a partir do *resfriamento do magma* expelido em forma de lava por vulcões, formando a rocha na superfície e em áreas oceânicas. Como nesse processo a formação da rocha é rápida, ela apresenta características diferentes das rochas intrusivas. Um exemplo é o *basalto*.

b) Rochas ígneas intrusivas ou plutônicas: são aquelas que se formam no *interior da Terra*, geralmente nas zonas de encontro entre a astenosfera (astenosfera localiza-se abaixo da litosfera e está em constante interação com ela, o que evidencia o caráter dinâmico do planeta) e a litosfera, em um processo constitutivo mais longo. Elas surgem na superfície somente através de afloramentos, que se formam graças ao movimento das placas tectônicas, como ocorre com a constituição das montanhas. E.g. é o *gabro* (uma rocha plutônica intrusiva).



Figura 3: Exemplo de rocha ígnea ou magmática

2.1.2 - Rochas metamórficas: são as rochas que surgem a partir de outros tipos de rochas previamente existentes (rochas-mãe) sem que essas se decomponham durante o processo, que é chamado de metamorfismo. Quando a rocha original é transportada para outro ponto da litosfera que apresenta temperatura e pressão diferentes do seu local de origem, ela altera as suas propriedades mineralógicas, transformando-se em rochas metamórficas. E.g. é o mármore.



Figura 4: Exemplo de rocha metamórfica

2.1.3 - Rochas sedimentares: são rochas que se originam a partir do acúmulo de sedimentos, que são partículas de rochas. Uma rocha preexistente sofre com as ações dos agentes externos ou exógenos de transformação do relevo, desgastando-se e segmentando-se em inúmeras partículas (meteorização); em seguida, esse material (e.g. pó e argila) é transportado pela água e pelos ventos para outras áreas, onde se acumulam e, a uma certa pressão, unem-se e solidificam-se novamente (diagênese), formando novas rochas. Esse tipo de constituição rochosa, em certos casos, favorece a preservação de fósseis, que, por esse motivo, só podem ser encontrados em rochas sedimentares. Além disso, nas chamadas bacias sedimentares, é possível a existência de petróleo, recurso mineral muito importante para a sociedade contemporânea. E.g. é o calcário



Figura 5: Exemplo de rocha sedimentar

As rochas sedimentares constituem apenas 5% da crosta terrestre, os restantes 95% são de rochas ígneas ou metamórficas.

Sabemos que a formação das rochas sedimentares acontece pela junção de inúmeros sedimentos, a união de pequenas partículas manifesta-se em duas etapas denominadas, respectivamente, por sedimentogênese e diagênese.

1. sedimentogênese: ocorre através da sucessão dos processos de meteorização, erosão, transporte e sedimentação. Apesar dessa série de nomes, é um processo simples e de fácil compreensão. Vejamos:

Meteorização →	Erosão →	Transporte →	Sedimentação
Quebra das rochas em partículas (sedimentos)	Remoção dos sedimentos	Deslocamento dos sedimentos	Deposição e junção dos sedimentos

Figura 6: Sequência de sedimentação

- 2) diagênese: ocorre após a sedimentogênese e engloba uma série de processos físico-químicos responsáveis por dar coesão aos sedimentos, formando, assim, as rochas sedimentares propriamente ditas. Ela manifesta-se a partir dos processos de compactação e cimentação.

A compactação ocorre quando as várias camadas de sedimentos vão sendo depositadas umas sobre as outras. Assim, o peso e a pressão exercidos sobre as camadas mais inferiores agem no sentido de compactar as partículas de rochas então dispersas.

Em seguida, durante a cimentação, as camadas desidratam-se e unem-se, formando, finalmente, as rochas.

O Sienito é uma rocha ígnea plutônica, de textura holocristalina grossa, leucocrática (clara), composta principalmente por feldspatos (microclina, ortoclase e alguma ou nenhuma plagioclase), anfíbios (geralmente hornblenda), clinopiroxênios (augita, egirina), pouca ou nenhuma biotita.

2.2 - Produção das Rochas Ornamentais Brasileiras

O Brasil por possuir uma grande diversidade litológica com padrões cromáticos vistosos e cobiçados pelo mercado consumidor tornou-se destaque mundial no setor de rochas ornamentais e para revestimento, movimentando um mercado de exportação de em 2023 de US\$ 1.112,2 milhões, correspondente a um volume físico de 1,82 Mt de rochas ⁽⁷⁾. Do total das rochas processadas, US\$ 608,4 milhões foram destinadas aos EUA.

Não é de hoje que a China é um dos maiores parceiros do Brasil em importação e exportação de matéria-prima e bens de consumo. No setor de rochas ornamentais, por exemplo, a China ocupa a segunda posição no ranking de importadores (Figura 1), sendo responsável pela compra de mais de US\$ 70,9 milhões do material de rochas produzido.

A produção brasileira de materiais rochosos naturais, para ornamentação e revestimento, inclui granitos, pegmatitos e várias outras rochas silicáticas, além de mármore, travertinos, ardósias, quartzitos maciços e foliados, basaltos e gabros, serpentinitos, pedra-sabão e pedra-talco, calcários, metaconglomerados polimíticos e oligomíticos, cherts, arenitos, xistos diversos, etc. Assume-se a existência de pelo menos 1.100 frentes ativas de lavra, sempre a céu aberto e quase sempre em maciços, responsáveis por mais de 900 variedades comerciais de rochas colocadas nos mercados interno e externo. A Figura 7 apresenta exemplos da produção dos blocos das frentes de lavras de rochas ornamentais, os locais de extração e remoção são denominados frentes de lavra ou áreas de escavação. Em minas a céu aberto as atividades se iniciam com a preparação da área a ser lavrada para que ela possa ser perfurada e detonada.



Figura 7: Blocos de Sienitos

O perfil da produção brasileira, por tipo de rocha, é mostrado na Tabela 1, observando-se que os materiais comercialmente classificados como granitos correspondem a 55% do total produzido.

Tabela 1: Perfil da produção brasileira por tipo de rocha - 2023		
Tipo de rocha	Produção (Mt)	Participação (%)
Granitos e similares	3,8	38
Mármore e Travertino	2,9	29
Ardósia	0,4	4
Quartzito Foliado	0,2	2
Quartzito Maciço	2	20
Pedra Miracena (Paduana)	0,2	2
Outros (Basalto, Pedra Cariri, Pedra-Sabão, Pedra Morisca etc.)	0,5	5
Total estimado	10	100

2.3 - Mercado das Rochas Ornamentais

Principais destinos

Em 2023 o Brasil exportou rochas ornamentais para 124 países. Os dez principais destinos foram EUA, China, Itália, México, Espanha, Canadá, Argentina, Austrália e Alemanha nesta ordem. No balanço geral as exportações para estes dez países contribuíram com US\$ 997 milhões.

Produção estimada de 10 Mt de rochas ornamentais e de revestimento (\cong 7% da produção mundial), sendo que as exportações de US\$ 1,11 bilhão (77% de rochas processadas semiacabadas) e 1,8 Mt (53% de rochas processadas semiacabadas) é quinto maior produto de base mineral exportado pelo Brasil, atrás do minério de ferro, minério de cobre, ouro e ferro-nióbio e cerca de 12 mil empresas atuando na cadeia produtiva ⁽⁷⁾.

Em termos gerais, o Espírito Santo permanece como principal estado exportador de rochas; os EUA como principal país de destino das exportações. O embarque das exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento está concentrado, nesta ordem, nos portos do Rio de Janeiro/RJ, Vitória/ES e Santos/SP.

Tabela 2: Distribuição estadual da produção de rochas ornamentais no Brasil - 2023			
Região	UF	Produção (1.000t)	Tipo de Rocha
Sudeste	Espírito Santo	2.6000	Granito e mármore
	Minas Gerais	1.900	Granito, pegmatito, ardósia, quartzito foliado, quartzito maciço, pedra-sabão e mármore
	RJ e SP	250	Granito, mármore e guinasse (Pedra Paduana) e arenito
Sul	PR , RGS e SC	500	Granito, mármore, basalto e ardósia folhelho
Centro-Oeste	GO, MT e MS	250	Granito, quartzito foliado, serpentinito e mármore
Nordeste	Bahia	1.900	Granito, pegmatito, mármore, travertino, arenito e quartzito maciço
	Ceará	1.300	Granito, pegmatito, calcário e mármore
	Paraíba	450	Granito e conglomerado
	PE, AL, RN e Pi	750	Granito, quartzito, mármore, calcário
Norte	RO, RR, PA e TO	100	Granito, anortosito, chert, serpentinito
Total do Brasil		9.000Mt	

Como indicadores de tendência mais expressivos nos últimos 10 anos, em termos brasileiros e mundiais, podem-se apontar, sucintamente, os seguintes:

- Crescimento da China no mercado internacional;
- Queda da participação dos players europeus no mercado internacional;
- Evolução dos projetos de promoção das exportações contemplados nos convênios entre a Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos – Apex e a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS;
- Aumento significativo da participação brasileira no mercado dos EUA;
- Polarização das exportações brasileiras para os EUA (chapas) e China (blocos), com redução das exportações para a Itália e outros países europeus;
- Aquecimento do mercado imobiliário brasileiro;

- Publicação do Guia de Aplicação de Rochas em Revestimentos, pela ABIROCHAS;
- Incremento da lavra de maciços rochosos, em detrimento daquela de matacões;
- Incremento da utilização de fio diamantado na lavra e no beneficiamento;
- Incremento das importações brasileiras de teares, primeiro dos multilâmina convencionais e, mais recentemente, dos multifio diamantados;
- Diversificação da produção de rochas no Brasil, envolvendo os denominados materiais exóticos, com destaque para pegmatitos e rochas quartzíticas; e
- Especialização brasileira na lavra e beneficiamento de granitos, materiais exóticos e rochas duras em geral.

2.4 - Granito

Granito é uma rocha magmática mais frequente da crosta terrestre. Os granitos ocorrem num contexto geológico muito variado. A sua maior concentração ocorre nos arcos magmáticos das cadeias de montanhas. Os arcos magmáticos são o produto da fusão de rochas acima das zonas de subducção que se formaram por ocasião do fechamento dos oceanos. Corpos menores ocorrem também em áreas estáveis (cratons), geralmente associados a falhas, domos crustais ou vales tectônicos.

Os granitos encontram-se expostos na superfície pela erosão das cadeias de montanhas. Supõe-se que essas rochas derivem dos magmas produzidos pelo aquecimento e fusão parcial das rochas nas áreas de subducção.

Nestes sítios devido aos esforços associados à subducção e ao forte fluxo de calor, as rochas pré-existentes são dobradas e metamorfizadas. Nos locais de maior calor ocorre a geração do magma granítico que, assim, origina as cadeias de montanhas.

Geralmente o termo “granito” é empregado para qualquer rocha dura, resistente e muitas vezes de considerável valor econômico. Comercialmente muitas rochas são denominadas impropriamente de "granito", incluindo até rochas não magmáticas. Além disso, recebem "nomes fantasia" dependendo da coloração e local de extração (Vermelho Capão Bonito, Amarelo Arabesco, Amarelo Minas, Verde Esperança, Verde Candeias, Verde Ubatuba, Azul Bahia, *Café Bahia*, Café Olinda, Preto São Gabriel, Dourado Paulista, Ouro Mel, Ouro Novo, Lilás Gerais, Rosa Biritiva, etc.).

2.4.1 - Composição Mineralógica

Constituído essencialmente por feldspatos (potássico e plagioclásio em proporções muito variáveis), quartzo, mica (biotita e/ou muscovita) e anfibólio (em geral hornblenda). Piroxênios são raros e típicos dos charnokitos, granitos de cor cinza esverdeada (Verde Ubatuba). Os principais minerais acessórios são magnetita, *ilmenita*, apatita, *zirconita*, esfênio ou titanita, topázio, fluorita. andaluzita, cordierita e granada são minerais típicos de granitos aluminosos ⁽⁸⁾.

2.4.2 - A Rocha Ornamental – Café Bahia

A fase de cratonização à qual foi submetida à crosta terrestre, notadamente nas áreas de domínio cratônico e dos cinturões móveis de alto grau, têm-se intrusões de “sienitos”, gabros, piroxenitos, anfíbolitos, anortositos e serpentinitos. Este evento datado do final do Paleoproterozoico foi responsável pela formação de rochas com elevado interesse comercial, exemplificados pelos “sienitos” aflorantes em “*Riacho Santana*” e conhecidos pelo nome de “*Granito Café Bahia*”.

O *Café Bahia* é uma das mais belas e principais rochas ornamentais produzidas em *Riacho Santana/Bahia*, pois apresenta uma alta qualidade de beleza estética e um padrão homogêneo. Destaca-se pela resistência a riscos e impactos. Essa rocha tem como composição: feldspatos alcalinos, nefelina, hornblenda, aegirina-augita e biotita (biotita é um filossilicato ferromagnésiano que contém potássio, a *rocha contendo biotita é fonte alternativa de potássio para uso como fertilizante*).

Os granitos com “*biotita*” são ricos em “*monazita*” e caracterizados por intensas anomalias *aerogamaespectrométricas no canal do tório*, evidenciadas em levantamentos aerogeofísicos recentes nos estados de Goiás e Tocantins ⁽⁸⁾.

Minerais de *urânio* ocorrem nos aglomerados de “*biotita*” recristalizada, juntamente com grãos de apatita, provavelmente magmática, e allanita secundária ⁽⁸⁾.

No que concerne ao granito Marrom Imperial, estas rochas constituem cumulus de k-feldspatos envolvidos por uma aureóla de microclima rósea em torno dos grãos, contendo ainda anfíbolito e piroxênio. Ocorrem encaixadas em quartzo-sienitos de alto potássio, que constitui o seu controle litológico. Apresentam aspecto homogêneo, destituídos de foliação. No caso do granito Marrom Imperial associam-se aos sienitos de idade neoproterozoicas, enquanto o denominado “Café Bahia” encaixa-se em plutonitos de composição semelhantes, mas datados do Paleoproterozoico.

Na Tabela 3 são apresentadas a caracterização tecnológica da rocha silicática e na Tabela 4 são apresentadas informações sobre o principal jazimento da rocha “*Café Bahia*” da Região Nordeste.

TABELA 3 – Resultado da Caracterização Tecnológica da Rocha Silicáticas Café Bahia da Região Nordeste	
Nome Comercial	Café Bahia
Classificação Petrográfica	Sienito
Massa Específica (k/m ³)	2732
Porosidade (%)	0,44
Absorção (%)	0,16
Compressão (MPa)	173,20
Flexão (MPa)	18,09
Desgaste Amsler (mm)	0,68
Impacto (m)	0,50

TABELA 4 – Rochas Ornamentais do Brasil - Principal Jazimento do Café Bahia	
Classificação Petrográfica	Mela-Sienito
Província Geológica	São Francisco
Idade da Rocha	Paleoproterozóico
Município e Estado	Riacho Santana - BA.

2.5 – O Radônio e o Meio Ambiente

O radônio é um gás radioativo que emana das rochas e solos e tende a se concentrar em espaços fechados como minas subterrâneas, cavernas, tuneis, garagens subterrâneas e residências é um gás incolor, inodoro e sem sabor e nesse sentido o radônio é considerado nas recomendações internacionais e na legislação brasileira como exposição existente.

O gás radônio é a mais importante fonte de radiação ionizante ⁽⁹⁾ dentre aquelas que são de origem natural conforme mostrada na Figura 8. O ²²²Rn é um gás nobre formado a partir do ²²⁶Ra, que é um produto de decaimento do ²³⁸U. O urânio e o rádio ocorrem naturalmente em solos e rochas.

Outros produtos de decaimento do urânio e do tório incluem os isótopos torônio (^{220}Rn) e actínio (^{235}U), (^{219}Rn). O gás radônio, cuja meia-vida tem 3,8 dias e está presente em praticamente todos os lugares da crosta terrestre.



Figura 8: Distribuição mundial de exposição à radiação – UNEP/UNSCEAR

O ^{222}Rn é um emissor α (alfa) com meia-vida 3,82 dias e, juntamente com seus filhos não gasosos ^{218}Po e ^{214}Po , é responsável por aproximadamente 42% da dose efetiva equivalente produzida pela radiação ionizante natural. A Figura 9 apresenta as exposições médias do público por fontes de radiação tendo o radônio a maior contribuição ⁽⁹⁾.

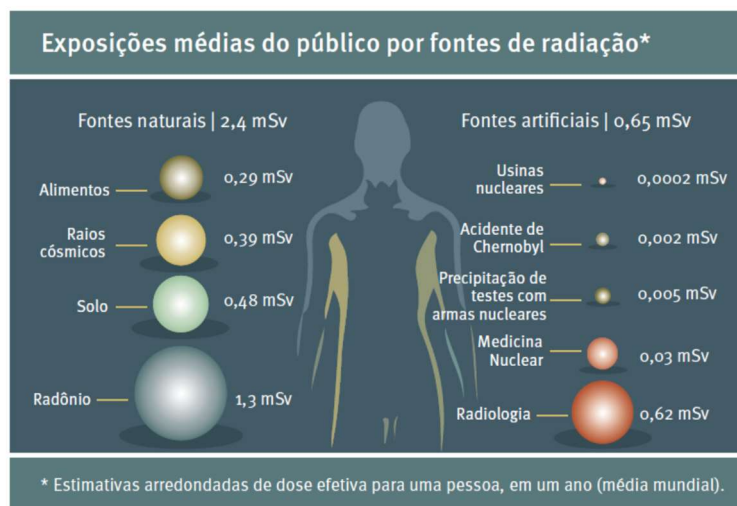
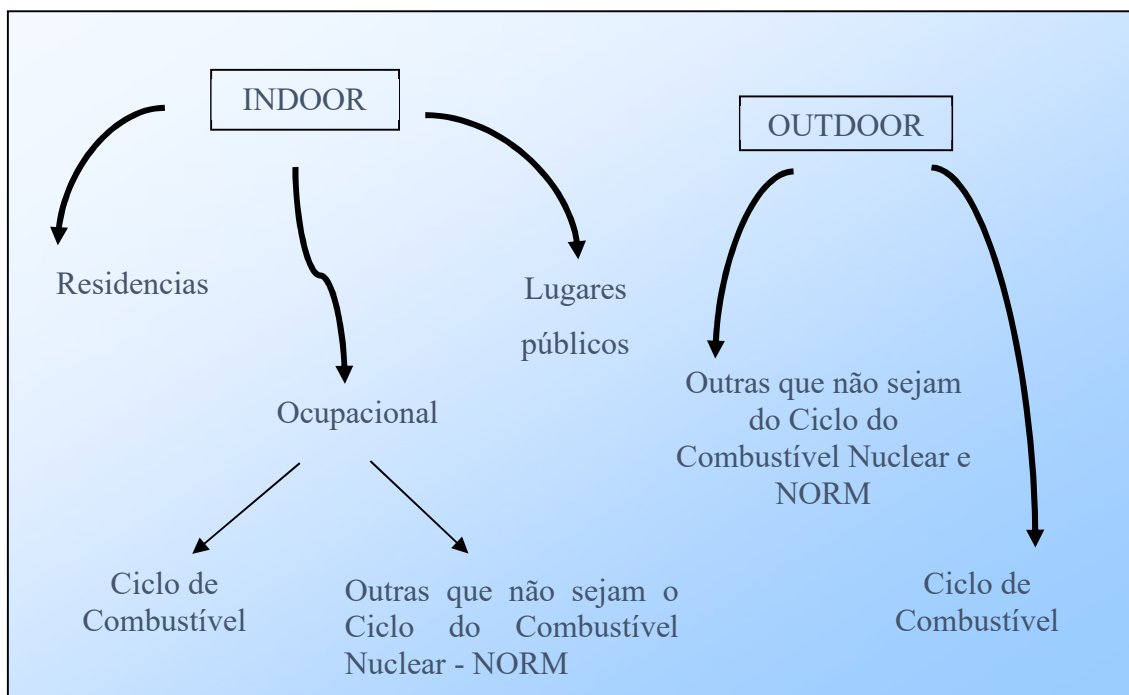


Figura 9: Exposições médias do público por fontes de radiação – UNEP/UNSCEAR

A infiltração de gases do solo é reconhecida como a fonte mais importante de radônio residencial. Outras fontes, que incluem materiais de construção e água extraída de poços. O radônio é um dos principais contribuintes para a dose de radiação ionizante recebida pela população em geral.

Cenários possíveis para a exposição ao gás radônio:

- Ambientes fechados teremos menos ventilação logo teremos uma maior concentração do gás radônio e;
- Tempo de permanência nos lugares.



Na maioria das construções, a pressão do ar ao nível do solo é ligeiramente mais baixa do que no exterior, porque o ar no interior do solo é mais quente. Isso gera uma passagem do ar do solo para o interior da construção e, junto com esse ar, o ^{222}Rn será também transportado. As principais vias de acesso são os espaços entre pisos e paredes, rachaduras nos pisos e espaços vazios em torno de tubos e cabos, Figura 10. Existem variações sazonais nos níveis de ^{222}Rn em ambientes fechados, correspondendo a variações na temperatura média no exterior (os níveis de ^{222}Rn no inverno são geralmente mais altos do que no verão) ^(10 – 2.5).

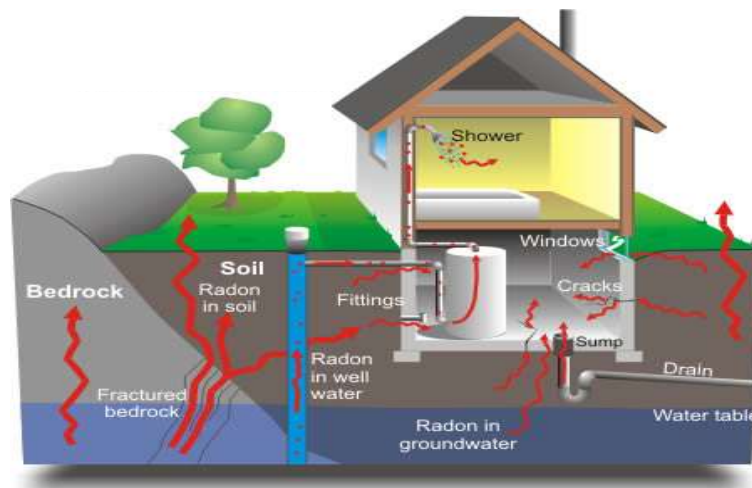


Figura 10: Apresenta as vias de como o gás radônio penetra no interior das

A média aritmética mundial ponderada pela população da concentração de ^{222}Rn de todas as fontes em residências é estimada em 39 Bq.m^{-3} (10-3.7).

Cálculos utilizados para um modelo de casa de alvenaria indicam que a emissão de ^{222}Rn de materiais de construção contribui, em média, com cerca de 10 Bq.m^{-3} para a concentração de ^{222}Rn em ambientes internos. Isso representa aproximadamente 25% da concentração média mundial de ^{222}Rn em ambientes fechados. Na União Europeia, a contribuição típica de materiais de construção para concentrações de ^{222}Rn em ambientes fechados é estimada entre 10 e 20 Bq.m^{-3} , correspondendo a uma dose efetiva individual anual na faixa de 0,3 a 0,6 mSv. Nos EUA, a contribuição de materiais de construção para concentrações de ^{222}Rn em ambientes fechados é estimada entre 4 e 7 Bq.m^{-3} (10-3.9).

Em alguns casos excepcionais, a contribuição de ^{222}Rn emanada por materiais de construção para a concentração de ^{222}Rn em espaços internos pode chegar a 1.000 Bq.m^{-3} ou mais ⁽¹¹⁾. Nesses casos, é muito provável que a taxa de dose efetiva correspondente da radiação gama interna exceda o valor máximo do nível de referência para materiais de construção em cerca de 1 mSv/ano. A emissão de ^{222}Rn de materiais de construção se identificada, também pode ser controlada através do preenchimento dos poros e uso de selantes entre outros produtos. (10-3.10)

A OMS ⁽⁶⁾ sobre Radônio em ambientes internos, propõe um nível de referência de 100 Bq.m^{-3} a fim de minimizar os riscos à saúde da exposição ao ^{222}Rn em ambientes fechados, e observa que se este nível não puder ser alcançado nas atuais circunstâncias concretas do país como não possuir especificações técnicas para materiais de construção, o nível de referência escolhido não deve exceder 300 Bq.m^{-3} em qualquer caso.

Nas bibliografias estudadas com a participação de países da Europa, América do Norte e Ásia presentes nos documentos da IAEA sobre o radônio presente em ambientes internos e câncer de pulmão fornecem fortes evidências de que o radônio provoca um número substancial de casos de câncer de pulmão em geral. As estimativas atuais sobre a proporção de casos de câncer de pulmão atribuíveis ao radônio variam entre 3% e 14%, dependendo da concentração média de radônio no país em questão e dos métodos de cálculo empregados. As análises indicam que o risco de câncer de pulmão aumenta proporcionalmente com o aumento da exposição ao radônio. Como muitas pessoas são expostas a níveis de concentração de radônio baixas e moderadas, a maioria dos casos de câncer de pulmão associados ao radônio são causados por estes níveis de exposição e não por concentrações mais elevadas. O radônio é a segunda causa de câncer de pulmão depois do fumo ^(6, 9 e 10). A maioria dos casos de cânceres de pulmão induzidos pelo radônio ocorrem entre os fumantes, devido a um forte efeito combinado entre o fumo e o radônio.

As partículas alfa emitidas pelo Radônio são altamente ionizantes, mas possuem pouco poder de penetração. As partículas alfa não são capazes de atravessar a pele humana, mas o gás, ao ser inalado, pode ficar retido nos pulmões do corpo humano por se desintegrar para partículas sólidas que depositam toda sua energia, ocasionando lesões ou patologias de gravidade diversa. ⁽¹⁾

Existem diversas técnicas de medição de radônio e são essenciais para avaliar a concentração de radônio em ambientes internos como as residências, Tabela 5. Elas são baseadas em protocolos padronizados para garantir medições precisas e consistentes ⁽⁶⁾.

Tabela 5: Dose efetiva anual agregada para um ocupante vai depender do tempo de ocupação anual. ^(VI-3.36)			
100% de ocupação:	= 8760 h / a x 0,232 μ Sv / h	= 2032 μ Sv / a	= 2,0 mSv / a
80% de ocupação:	= 7008 h / a x 0,232 μ Sv / h	= 1626 μ Sv / a	= 1,6 mSv / a
60% de ocupação:	= 5256 h / a x 0,232 μ Sv / h	= 1219 μ Sv / a	= 1,2 mSv / a

A concentração de radônio em ambientes internos varia de acordo com o tipo de construção, a utilização de rochas ornamentais, utilização de coberturas de fosfogesso e a ventilação destas residências ^(12, 13 e 14). Estas concentrações variam substancialmente não somente segundo as estações do ano, mas também durante o dia e a noite e até mesmo de hora em hora. Devido a essas flutuações, a estimativa da concentração média anual de

radônio exige medições confiáveis, durante pelo menos três meses, e de preferência por longo tempo (detetores passivos). Medições de curto prazo fornecem apenas uma indicação aproximada da concentração real do radônio (detetores ativos), medições mais precisas e efetivas necessitam de um tempo longo onde serão contabilizadas todas as influências no resultado (temperatura, humidade, sazonalidade, ventilação). A fim de garantir a qualidade das medições é altamente recomendado a existência de um programa de garantia da qualidade para as diversas técnicas utilizadas bem como os dispositivos utilizados, os programas poderão incluir as intercomparações praticadas com outros laboratórios, nacionais e ou internacionais, testes utilizando padrões de referência rastreáveis.

É importante abordar a questão do radônio tanto na construção de novos imóveis (prevenção), como nos imóveis existentes (mitigação ou remediação) ^(05; 06; 09; 10 e 15). As estratégias primárias de prevenção e mitigação do radônio focam na vedação das vias de entrada do radônio no imóvel, Figura 10 e em reverter as diferenças de pressão do ar entre o ambiente interno e o solo, por diferentes técnicas de despressurização do solo. Em muitos casos, a redução nas concentrações de radônio é alcançada pela combinação de diversas estratégias.

A maior parte do radônio inalado é liberado pelo corpo humano durante a expiração. Entretanto, seus filhos (que são metais e semimetais) alcançarão os pulmões e lá podem depositar-se. Portanto, a energia depositada nos tecidos dos pulmões por esses radionuclídeos emissores alfa é mais relevante do que a energia emitida pelo próprio radônio ^(18, 23 e 24). Embora os filhos emissores alfa ^{218}Po e ^{214}Po sejam responsáveis pela maior parte da radiação proveniente do radônio, a medida de concentração de radônio no ar funciona como bom indicador para a concentração dos filhos.

2.5.1 Grandezas e unidades

Uma das propriedades importantes na quantificação da radiação ionizante denomina-se atividade. Ela é a taxa de desintegração do elemento radioativo, ou melhor, é o número de emissões ou transformações ocorridas em um intervalo de tempo. No Sistema Internacional, essa grandeza é o Becquerel (Bq), em que 1 Bq corresponde a uma desintegração por segundo (dps). Assim, a unidade utilizada para medir a concentração de radônio no ar é dada pela taxa de desintegração por unidade de volume, expressa em Bq.m^{-3} (Becquerel por metro cúbico) ⁽⁶⁾. Outra forma ainda de avaliar a concentração de radônio no ar denomina-se exposição, determinada pela concentração integrada ao tempo, normalmente expressa em $\text{kBq.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$ ⁽¹⁶⁾.

Existe também o ^{219}Rn e o ^{220}Rn , que são produtos da série de decaimento do ^{235}U e ^{232}Th , respectivamente. Eles têm o tempo de meia-vida muito pequeno quando comparado ao ^{222}Rn , sendo o do ^{219}Rn de 3,96 segundos e o do ^{220}Rn de 55,6 segundos, assim o ^{222}Rn é o principal capaz de migrar para dentro das casas e gerar preocupações na área da saúde. ^(6 e 9).

Algumas definições são importantes para o bom entendimento deste trabalho:

- **Equilíbrio radioativo de ^{222}Rn com produtos de decaimento de meia vida curta (filhos):** situação em que uma atividade de radônio de cada um dos produtos de decaimento de radônio de curta duração diminui ao longo do tempo como atividade de radônio;
Em equilíbrio radioativo, a atividade de cada produto de decaimento (filhos) é próxima à do radônio (pai);
- **Emanação:** Mecanismo pelo qual um átomo de radônio deixa o grão individual de material sólido no qual ele foi formado e alcança o espaço livre de poros;
- **Exalação:** Mecanismo pelo qual um átomo de radônio produzido por emanção atinge a superfície do material devido a fenômenos de transporte (difusão, convecção) no material a ser considerado;
- **Atmosfera de referência:** Atmosfera radioativa na qual os parâmetros de influência (aerossóis, radioatividade, condições climáticas, entre outros) são suficientemente bem conhecidos ou controlados para permitir seu uso em um procedimento de teste para produtos de decaimento de radônio ou de elementos de meia-vida curta. Os valores do parâmetro em questão devem ser rastreáveis a padrões reconhecidos.

A Figuras 11 e 12 a seguir, ilustram as séries do decaimento do ^{238}U até chegar o ^{206}Pb estável e a série do decaimento do ^{232}Th até chegar ao ^{208}Pb estável.

No caso das rochas ornamentais, a superfície de acabamento é importante, pois além de ser polida com ou sem resina (processo de abrasão com a utilização de pós abrasivos de granulometria sucessivamente fina, com o objetivo de fechar os poros da rocha e gerar uma superfície contínua com brilho, em muitos estudos concluíram que será a estrutura interna assim como a estrutura superficial do material é que determinará a taxa de exalação do gás radônio nas superfícies das rochas, onde a superfície polida e tratada tende a diminuir os poros e fissuras que facilitam a saída do ^{222}Rn .

Quando o ^{226}Ra decai por emissão alfa, alguns isótopos de radônio são liberados da matriz sólida por recuo, possuindo como principais fatores determinantes para a saída do meio em que se encontra a localização do átomo de ^{226}Ra no grão mineral, a densidade

do meio e a direção que o átomo de radônio assume no momento de sua emissão. Se o átomo de rádio estiver localizado em uma região muito interna na estrutura do mineral, dificilmente o radônio é liberado para a atmosfera, mas se estiver localizado próximo a sua superfície e sua direção for nesse sentido, ele poderá se libertar e se difundir para o espaço de poro entre os grãos ou planos de fraturas da rocha.

Por difusão molecular ou por diferença de pressão, o ^{222}Rn pode ser exalado dos materiais e se difundir na atmosfera continuamente, a uma taxa determinada pelas diferentes estruturas geológicas, geoquímicas (teor de ^{226}Ra).

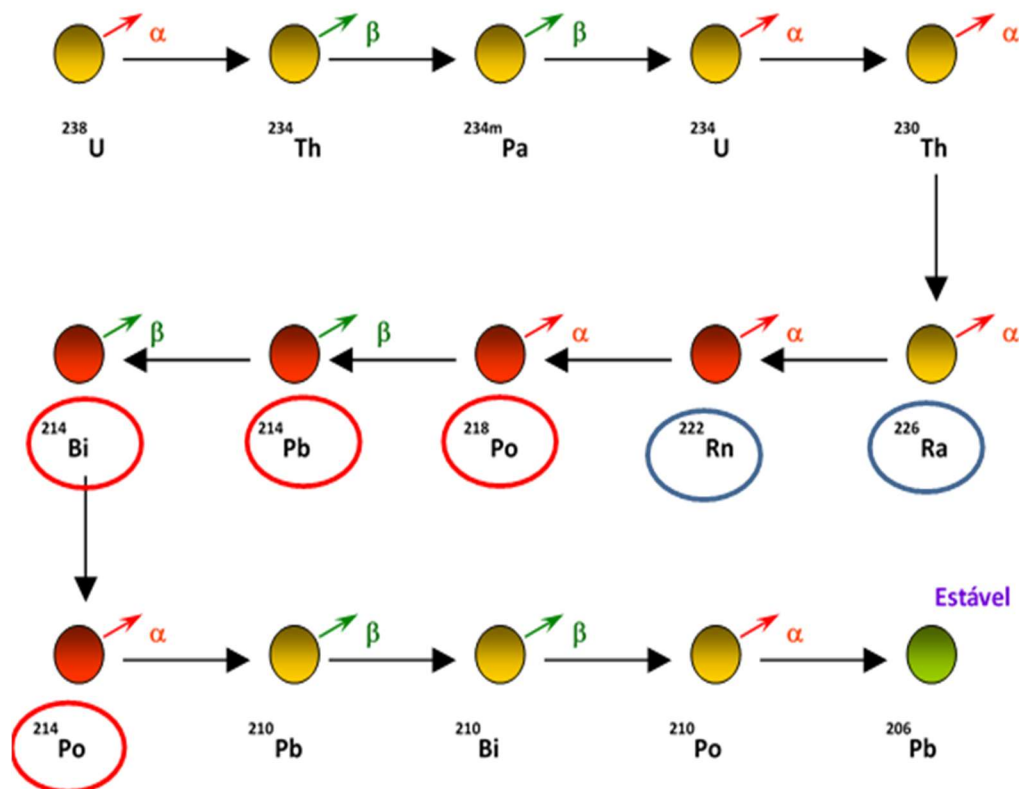


Figura 11: Série natural do ^{238}U

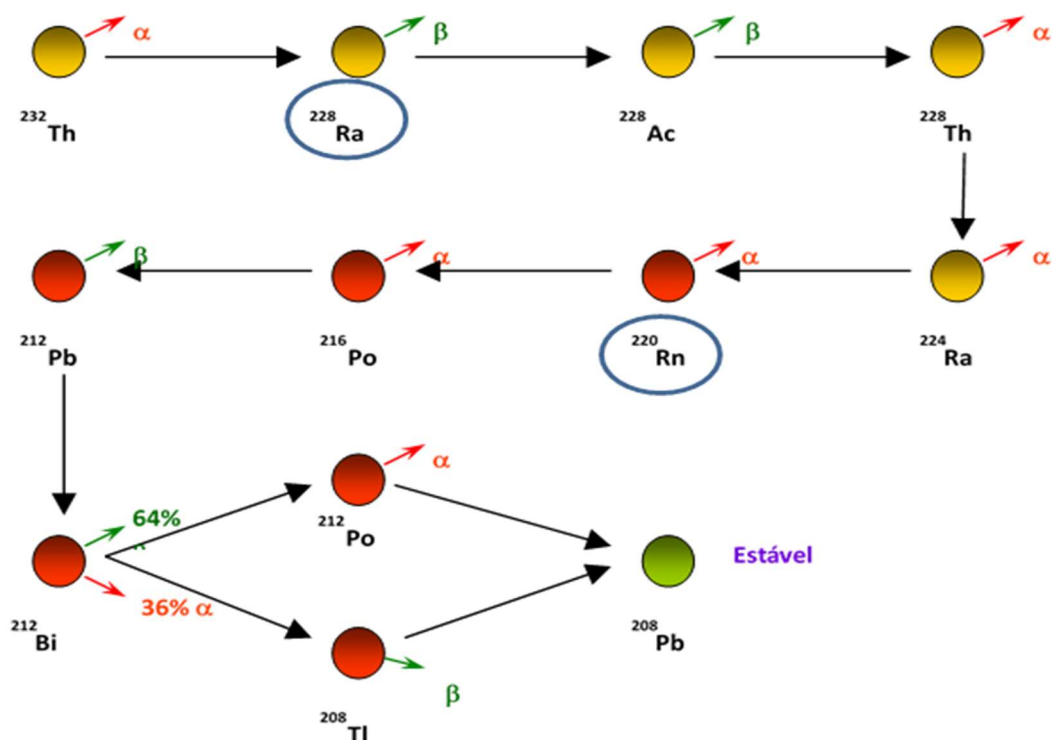


Figura 12: Série natural do ^{232}Th

Na bibliografia estudada, o fluxo de radônio de um material é definido como o fluxo do gás por unidade de área e unidade de tempo ($\text{Bq.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e ambientais como (umidade, gradiente térmico, pressão do ar), podendo em ambientes fechados atingir níveis de concentração muito elevados, sendo funções de dois fenômenos que seriam o transporte de ^{222}Rn da matriz sólida para o interstício do poro e, do poro até a superfície da matriz.

O primeiro fenômeno é causado pela energia cinética da emissão da partícula alfa do ^{226}Ra no momento do seu decaimento e o consequente recuo do átomo de ^{222}Rn recém-formado sendo chamado de “emanação”. A difusão do ^{222}Rn provocada por forças decorrentes de gradientes de concentração e de pressão entre o material e o meio externo é a causa do segundo fenômeno.

A exalação é o processo decorrente destes dois fenômenos e representada na Figura 13.



Figura 13: Fenômenos de emanação e exalação

O radônio ^{222}Rn tem tempo de meia-vida de 3,8 dias, o que lhe permite mobilidade significativa para escapar da rocha, na qual foi gerado. O tempo de meia vida menor do torônio ^{220}Rn ($T_{1/2} = 55 \text{ s}$) limita a distância percorrida por este antes do decaimento. Em consequência, a quantidade de ^{220}Rn que entra na atmosfera é menor que a de ^{222}Rn , o que faz com que o ^{220}Rn e seus produtos de decaimentos sejam usualmente desprezados. Portanto, o isótopo ^{222}Rn produzido nos solos é frequentemente a principal fonte de radônio de ambientes internos, enquanto o ^{220}Rn apresenta preocupação do ponto de vista de proteção radiológica somente se altas concentrações de ^{232}Th estiverem presente no interior da superfície de materiais de construção. ⁽⁹⁾

Conforme já esclarecido, a exposição à radioatividade natural é influenciada por fatores geológicos. A emissão de radiação ionizante por parte de rochas e solos depende do conteúdo de U, Th e K; os teores de radônio dependerão preponderantemente da concentração de urânio. ^(1; 3; 6; 10; 12; 17; 18 e 19)

Sendo assim, solos enriquecidos com urânio é condição para a criação de substratos geológicos favoráveis à liberação do radônio. Entretanto, existem outras propriedades dos solos e das rochas que também interferem na emanação e exalação do radônio, tais como: tipo e espessura dos solos e sua distribuição espacial, regime hídrico, porosidade, permeabilidade e granulometria. ^(1; 3; 6; 10; 12; 17; 18 e 19)

O radônio ocorre naturalmente em solos na faixa típica de 4,0 a 40 k.Bq.m^{-3} e na atmosfera na faixa típica de 4,0 a 19 Bq.m^{-3} . Estima-se que no Brasil a concentração média anual do ^{222}Rn no ar varia de 0,6 a 28 Bq.m^{-3} .

2.6 – Medições de Radônio

A necessidade das medições das concentrações de ^{222}Rn , adquire importância pelo fato de seu decaimento gerar os elementos ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po sejam responsáveis pela maior parte da dose de radiação devido ao radônio ^{222}Rn , geralmente a concentração do gás radônio é considerada um bom substituto para a concentração dos produtos de decaimento do radônio. Além disso, as medições de gás radônio são normalmente preferidas, devido a sua simplicidade e custo-efetividade. As medições de radônio são frequentemente diferenciadas entre medições em curto ou longo prazo, podem fornecer uma indicação preliminar da concentração média de radônio em longo prazo de uma residência. No entanto, ao efetuar medições de radônio em curto prazo devem ser levadas em consideração as variações diárias e sazonais do gás. ^(2;6; 9; 10; 12e 13).

Durante períodos em que as residências estão menos ventiladas (janelas fechadas e pouca circulação de pessoas), as concentrações de radônio no ambiente podem ser mais elevadas, e as medições realizadas em curto prazo nesses períodos e extrapoladas para um período maior podem superestimar a concentração média anual de radônio. No caso contrário, uma medição de radônio em curto prazo realizada durante um período em que a casa está mais ventilada (com janelas abertas e com muita circulação de pessoas) pode resultar na concentração média anual de radônio substancialmente subestimada. Portanto, a fim de avaliar a concentração média anual de radônio no interior de uma residência são preferidos os detectores que fornecem uma medição de radônio integrada em longo prazo. No entanto, deve ser observado que mesmo as concentrações de radônio anuais na mesma casa também podem variar de um ano para o outro.

Os detectores de medição de radônio mais populares são os detectores passivos. Os *Detectores de Traço de Partículas Alfa (DTPA)* e *Detectores de Carvão Ativado (DCA)* além dos detectores ativos *Monitor Contínuo de Radônio (MCR)*. Os detectores passivos não necessitam de energia elétrica nem utilizar uma bomba para realizar uma amostragem, enquanto os detectores ativos necessitam de eletricidade e permitem a obtenção de um registro contínuo da concentração e das flutuações do gás radônio durante o período de medição e podem ser utilizados por longos períodos pois são constituídos de baterias para longos períodos de medição. Para residências, os DTPA são uma escolha popular para medições de radônio em longo prazo e, muitas vezes, são instalados por um período de um ano. O uso de MCR aumentou bastante apesar destes equipamentos ainda serem de preço elevado. Os MCR fornecem automaticamente os dados com resolução temporal.

A Tabela 6 apresenta uma intercomparação entre os diversos dispositivos de medição de radônio.

A Tabela 7 mostra uma orientação geral para a seleção de métodos de medição e detectores, segundo os diferentes cenários de medição. A utilização de amostras individuais não foi incluída na lista de detectores recomendados, nem nos métodos populares para quantificar as concentrações de radônio ⁽⁸⁾. As amostras individuais são coletadas por amostragem do ar ambiente, utilizando-se diferentes dispositivos como células de cintilação, em intervalos de tempo que podem ser de somente um minuto e, em seguida, levados para análise em um laboratório. Estes tipos de medidas não captam nem as flutuações temporais da concentração de radônio, nem de seus produtos de decaimento. A medição de amostras individuais não está incluída nem nas diretrizes recomendadas

para avaliação da exposição ao radônio, nem para a tomada decisões sobre a necessidade de mitigação. Detalhes adicionais sobre os detectores de medição podem ser encontrados nos relatórios da OCDE ⁽¹⁹⁸⁵⁾, NCRP ⁽¹⁹⁸⁸⁾, SSK ⁽²⁰⁰²⁾ e USEPA ^(1992, 1993).

Tabela 6. Características dos diferentes dispositivos de medição do gás radônio				
Tipo de detector	Deteção	Incerteza típica ^a [%]	Período de amostragem	Custo
Detector de Traços de Partículas Alfas (DTPA). LEXAN/CR39/LR115	Passivo	10 - 25	1 a 12 meses (o ideal 3 meses)	Baixo
Detector de Carvão Ativado (DCA)	Passivo	10 - 30	2 a 7 dias (pode ser realizada uma medição de 24 h)	Baixo
Câmara de ionização de eletreto (CIE)	Passivo	8 - 15	5 dias - 1 ano	Médio
Detector de integração eletrônica (DIE)	Ativo	~ 25	2 dias - ano(s)	Médio
Monitor contínuo de radônio (MCR). AlphaGUARD e Rad7	Ativo Passivo	~ 10	Ciclos de: 10 min. e 1h (Indet.)	Alto
^a Incerteza expressa para durações ótimas de exposição e para exposições ~ 200 Bq/m ³ .				

Tabela 7: Principais métodos e detectores para a medição de radônio em residenciais		
Método	Tempo de amostragem	Dispositivo
Medição preliminar de radônio	Curta duração	Monitor Contínuo de Radônio - MCR
		Câmara de Ionização de Eletreto - CIE
		Detector de Carvão Ativado - DCA
Avaliação da exposição e concentração	Integração temporal	Detector de Traços de Partículas Alfa - DTPA
		Câmara de Ionização de Eletreto - CIE
		Monitor Contínuo de Radônio - MCR
		Detector de Integração Eletrônica - DIE
Medições para determinar a necessidade de remediação e ou a efetividade da remediação	Contínuo	Monitor Contínuo de Radônio - MCR
		Detector de Traços de Partículas Alfa - DTPA

2.7 – Dispositivos de Medição

Nesta seção iremos apresentar os principais dispositivos de medição de radônio e seus produtos de decaimento que refletem as práticas atuais em programas de radônio.

2.7.1 Detectores de Radônio

a) Detector de Traços de Partícula Alfa (DTPA)

Um DTPA é um pequeno pedaço de substrato plástico fabricado especialmente para esse fim, geralmente o plástico é um CR-39 (carbonato de polietilenoglicol), LR115 (nitrato de celulose) ou ainda Makrofol e LEXAN (policarbonato), todos são envolvidos por uma câmara de difusão que apresentam diversas formas. A seguir apresentamos um exemplo de uma câmara de difusão muito utilizada em diversas instituições e laboratórios, essa câmara deve ser coberta por um filtro que impede a entrada dos produtos de decaimento do radônio, como mostrado nas Figuras de 14 a 15.



Figura 14: Montagem da câmara de difusão



Figura 15: Câmara de difusão

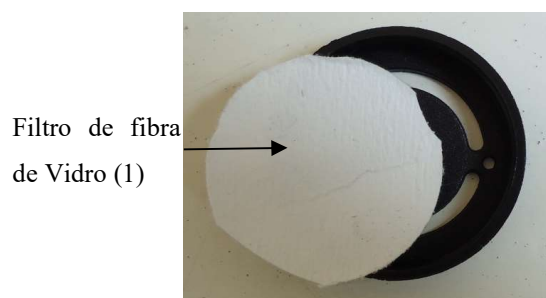


Figura 16: Filtro (1) impede a entrada dos produtos de decaimento do radônio

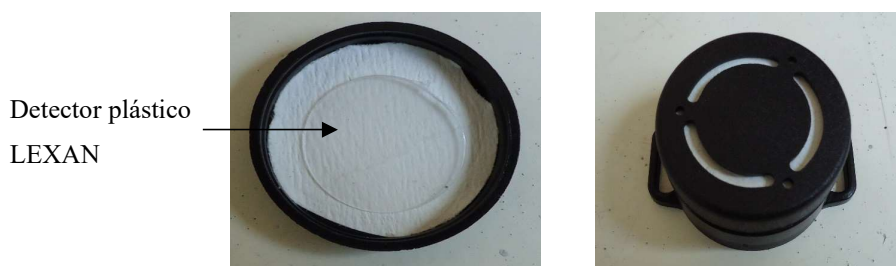


Figura 17 Câmara montada

Outro DTPA muito utilizado é o CR39 “RSKS” do fabricante RADOSYS Atlantic, esse DTPA é muito utilizado em diversos laboratórios de diversos países e também é o utilizado pelo LabRn da DIRAD/IRD, Figura 18.

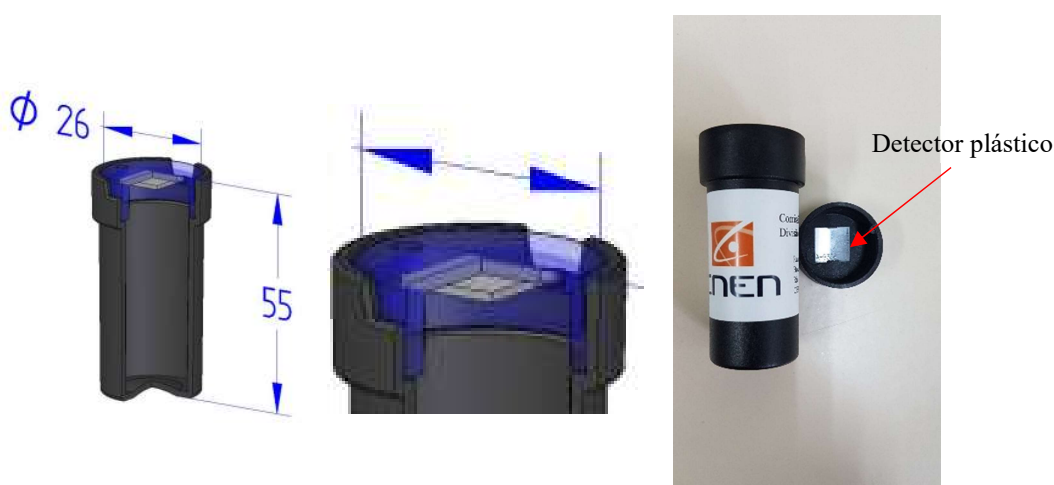


Figura 18: Detalhes do detector passivo CR39 RSKS RADOSYS

Quando o radônio ou seus produtos de decaimento emitem partículas alfa próximos ao material de detecção, as partículas alfa atingem o detector produzindo danos microscópicos chamados *Traços Latentes*. No processo de revelação temos o primeiro procedimento onde utilizamos o hidróxido de sódio - NaOH a uma temperatura de 90° por 4h30, em um segundo procedimento utilizamos o ácido acético CH₃COOH por 20min o terceiro procedimento utilizamos água destilada para uma limpeza também por 20min, todo esse processo será o responsável pela corrosão química ou eletroquímica do material plástico de detecção aumentando assim o tamanho dos *Traços Latentes* feitos pelas partículas alfas tornando-os observáveis por microscopia ótica, o que permite a sua contagem manual ou automatizada, Figura 19. Depois de subtrair a contagem de traços correspondentes ao fundo do detector, o número de traços por unidade de superfície é diretamente proporcional à concentração de radônio em Bq.m⁻³. Um fator de conversão

obtido mediante exposições controladas em uma câmara de controlada certificada permite converter a densidade de traços em concentração de radônio.

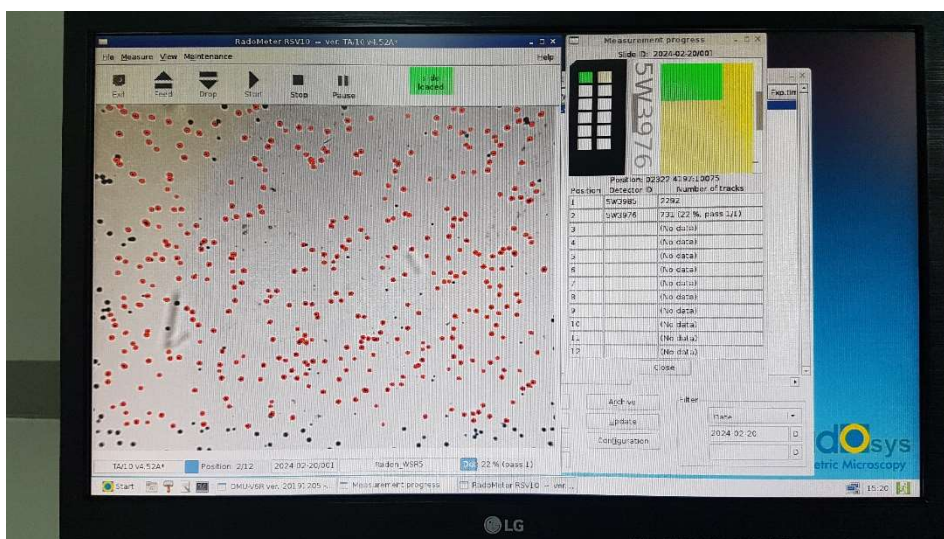


Figura 19: Traços da partícula alfa revelados no CR39 da RADOSYS

Os detectores de partícula alfa são insensíveis à umidade, temperatura e radiações beta e gama de fundo, mas medições realizadas em altitudes muito elevadas (acima de 2000 m) podem exigir pequenos ajustes devido a diferença de densidade do ar, que podem afetar a distância percorrida pelas partículas alfa ⁽⁸⁾. A sensibilidade ao torônio pode ser evitada pelo uso de uma câmara de difusão com uma elevada resistência à difusão do gás que entra na câmara. Geralmente, os detectores de partícula alfa apresentam uma concentração mínima detectável (CMD) de 30 Bq.m⁻³, calculada por métodos apresentados na literatura.

O sistema da RADOSYS (revelação e contagem) utilizado no LabRn 19 é todo automatizado o sistema utiliza um programa instalado e atualizado automaticamente na base de dados do fabricante.

b) Detectores de Carvão Ativado (DCA)

O DCA é dispositivo passivo que podem ser instalados para uma medição de 24 horas ou mais para medir radônio, podem ser utilizados para medições em ambientes externos (incluindo diretamente) no solo (Figuras 20 e 21). O princípio de detecção é a adsorção do radônio sobre o local do carvão ativado. Após a amostragem, o detector é selado e os produtos do decaimento do radônio se equilibram com o radônio coletado. Os

DCA's são analisados diretamente em um sistema composto de um iodeto. Se diferentes tipos de carvão forem misturados, a calibração pode não permanecer constante por isso devem ser confeccionados mantendo o mesmo tipo de carvão e uma granulometria homogênea. Como o carvão permite a adsorção e dessorção contínua do radônio, o método só proporciona uma boa estimativa da concentração média de radônio relacionada ao tempo de exposição, se as mudanças nas concentrações de radônio forem pequenas. Uma vez que o radônio decai com uma meia-vida de 3,8 dias, os dispositivos devem ser encaminhados para análise o mais rápido possível, após o período de exposição ou se fazer uso de um detector de iodeto portátil. Em geral, um DCA proporciona uma concentração mínima detectável de 20 Bq.m^{-3} ⁽⁶⁾.

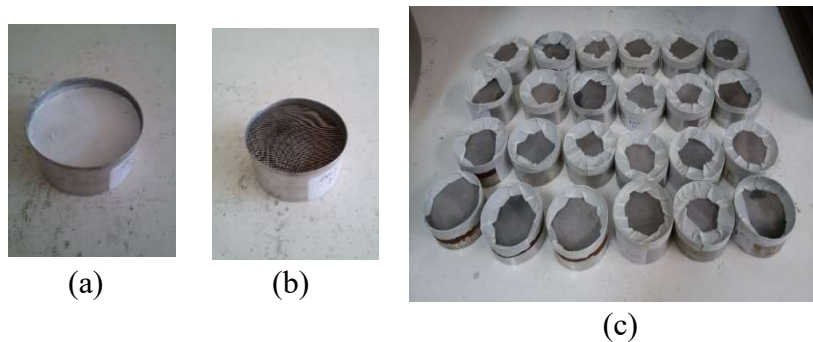


Figura 20: (a) Carvão ativado acondicionado em recipiente de alumínio coberto com filtro de fibra de vidro; (b) carvão ativado acondicionado em recipiente de alumínio coberto com filtro de fibra de vidro e tela metálica; (c) dosímetros de carvão ativado prontos para serem inseridos na câmara.



Figura 21: Detectores passivos de carvão na estufa, selados e transferidos para o dissecador

c) Monitores Contínuos de Radônio (MCR)

Existem vários tipos de monitores MCR disponíveis no mercado que utilizam diferentes tipos de sensores, como células de cintilação, câmaras de ionização (corrente ou pulsada) e detectores de silício de estado sólido. O ar passa pelo MCR por ação forçada através de uma pequena bomba de ar (ativo) ou pelo modo difusão para o interior da câmara do sensor (passivo). O MCR possui circuito eletrônico e uma programação interna instalada que permite o cálculo da concentração integrada de radônio por ciclos determinados. Os diferentes tipos de monitores possuem vantagens específicas. Por exemplo, os detectores de silício de estado sólido permitem a detecção por espectrometria alfa permitindo a discriminação entre os isótopos de ^{222}Rn e ^{220}Rn . Em outros dispositivos a sensibilidade em relação a umidade do ar é eliminada por secagem do ar na entrada do equipamento e em geral a concentração mínima detectável CMD calculada usando métodos padrões é de cerca de 5 Bq.m^{-3} . O MCR exige calibração periódica para garantir seu funcionamento adequado e resultados confiáveis ou que sejam realizadas medições intermediárias em contêineres controladas certificadas e utilização de padrões rastreáveis. As Figuras 22 e 23 apresentam dois exemplos de MCR: AlphaGUARD e RAD7.



Figura 22: Dispositivo AlphaGUARD



Figura 23: Dispositivo RAD 7

d) Dispositivos de Medição de Radônio em Água

O radônio nas águas subterrâneas ocorre predominantemente devido ao decaimento do rádio (^{226}Ra) encontrado nas rochas e solos, e não devido ao rádio dissolvido na água. O radônio também pode ser gerado dentro dos sistemas de distribuição de água que chegam às residências, Figura 10. A exposição ao radônio a partir de fontes aquáticas ocorre a partir da ingestão ou inalação do radônio liberado pela água. O risco de câncer derivado da liberação de radônio contido na água (tomar banho,

atividades de limpeza nas residências etc.) deve ser considerado também nas avaliações concomitantemente com o risco derivado da ingestão de água que contém radônio ⁽⁶⁾. O coeficiente de transferência do radônio entre a água e o ar no interior de residências na América do Norte é estimado como $1,0 \cdot 10^{-4}$ (Nazaroff et al. ¹⁹⁸⁷). Existem vários métodos bem estabelecidos para a coleta (Field e Kross ¹⁹⁹⁶) e medição (Vitz ¹⁹⁹¹) de radônio na água. Técnicas de medição de radônio em água incluem os equipamentos ativos as câmaras de ionização de eletretos entre outros. Técnicas de contagem por cintilação líquida e técnicas de medidas da emissão do radônio são os métodos mais comuns para a medição das concentrações de radônio em água.

Como exemplo temos os equipamentos para medição direta (MCRs) como AlphaGUARD e Rad7, Figura 24.



Figura 24: RAD 7 e AlphaGUARD sendo utilizados para coleta e medição de radônio em água

O sistema de medição da concentração de radônio montado para determinação do radônio por emissão, Figuras 25 e 26, envolve a medição do radônio presente na água com o auxílio de uma bomba, o gás com o radônio carregado é transferido para um dispositivo ativo de medição. Para realizar esta análise uma amostra da água é transferida para um borbulhador, em temperaturas normais a emissão do radônio da água pode ser realizada por borbulhamento da amostra de água com um gás (ex. nitrogênio). Na sequência apresentamos um exemplo deste ensaio utilizando o Kit água da AlphaGUARD.



Figura 25: Dispositivo para borbulhar e emanar o radônio

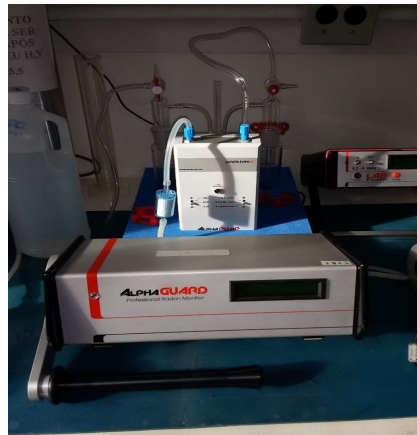


Figura 26: Sistema AlphaGUARD, bomba de ar e borbulhador para emanção

Além da técnica de emanção, outra técnica de medição de radônio em água é a análise por cintilação líquida.

2.8 – Medições de Avaliação da Concentração de Radônio Relacionadas aos Materiais de Construção

A exalação do radônio proveniente como por exemplo as rochas ornamentais podem ser medidas em laboratório ou em campo. Previamente podem ser obtidos diversos tipos de materiais de construção para a determinação da taxa de exalação de radônio, essa determinação pode ser realizada em um container de estanqueidade garantida e certificada, sendo em seguida fechada hermeticamente e realizada uma amostragem do ar interior do container. Avaliações de campo utilizam várias técnicas para medição da exalação do radônio.

2.9 - Risco de Câncer de Pulmão para a Público e Meio Ambiente: Radônio em Ambientes Internos

Na bibliografia avaliada ⁽⁶⁾ bem como estudos realizados por Veiga LHS⁽²²⁾ indicam o risco de câncer de pulmão em trabalhadores de mineração, indicando também

que o radônio pode ser uma causa de câncer de pulmão na população em geral, relacionado à exposição em residências e/ou prédios. Essas exposições (público e ocupacional) diferem, devido aos hábitos individuais como exemplo o tabagismo nos trabalhadores bem como o tabagismo no público em geral. Outros fatores também podem influenciar o risco para câncer de pulmão ^(5; 6; 9 e 15).

Trabalhadores da área de mineração também podem estar sujeitos a outras substâncias cancerígenas. Essas diferenças levam a existência de grandes incertezas relacionadas à avaliação e determinação do risco de câncer ao radônio nessa população.

Os estudos desenvolvidos devem considerar todas essas variações (incertezas) para trabalhadores e para o público em geral, tais como a identificação dos riscos associados ao tipo de trabalho, mineração subterrânea e a céu aberto, hábitos alimentares, água, tabagismo. Nesses estudos, a exposição ao gás radônio é geralmente expressa no qual o indivíduo foi exposto nas residências por determinado período. As concentrações de radônio dentro de uma casa são geralmente sujeitas a variações sistemáticas como por exemplo se a medição foi realizada em uma sala, um quarto, e/ou demais dependências, tipo de residência (pisos), respeitando o período do ano em que foi realizada a medição, padrões climáticos e residências bem ventiladas ^(5; 6; 9 e 15).

Já foram realizados diversos estudos caso-controle sobre a relação entre radônio em ambientes internos e câncer de pulmão. Individualmente, a maioria desses estudos não é suficientemente grande para descartar ou fornecer evidências claras de que exista um aumento no risco. Logo, a fim de combinar a informação de mais de um estudo, alguns autores consideraram os resultados publicados de vários estudos para obter uma estimativa combinada (Lubin e Boice ¹⁹⁹⁷, Lubin ¹⁹⁹⁹, Pavia et al. ²⁰⁰³). Todas estas revisões sistemáticas de artigos publicados concluíram que o risco de câncer de pulmão associado ao radônio, conforme publicado nos estudos individuais, varia consideravelmente de um estudo para outro. No entanto, a metodologia utilizada para analisar os vários estudos difere consideravelmente, principalmente as metodologias consideradas para avaliar as diferenças individuais para o risco de câncer de pulmão relacionadas ao fumo e a quantificação da exposição ao radônio para cada indivíduo. Tais variações podem ter conduzido a diferenças entre as estimativas de risco entre os estudos e não podem ser eliminadas sem o acesso dos dados básicos de cada indivíduo envolvido nos estudos (Field et al. ²⁰⁰²).

A fim de comparar de forma adequada os resultados dos diferentes estudos de caso-controle sobre o radônio e câncer de pulmão, e assegurar que os diferentes riscos

relacionados com o tabagismo estão sendo considerados, é necessário reunir todos os dados de concentração de radônio, tabagismo e outros fatores relevantes para cada indivíduo dos estudos originais e combiná-los de forma uniforme. Quando isso tiver sido feito, análises paralelas dos diferentes estudos podem ser realizadas e os resultados dos estudos individuais podem ser comparados. Então, se os dados dos diferentes estudos forem consistentes, eles podem ser combinados e uma estimativa do risco de câncer de pulmão relacionada ao radônio pode ser obtida com base em todos os estudos incluídos.

2.10 – Base Teórica para o Desenvolvimento deste Trabalho

Desde os anos 80 muitos trabalhos relacionados a exposição de público, residências e ao meio ambiente devido a taxa de exalação e emanção ao gás radônio tem sido desenvolvido e atualmente muitos projetos para estas determinações estão sendo desenvolvidos ou em desenvolvimento.

No Brasil temos diversos grupos de pesquisas atuando em diversas instituições de grande importância tais como Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD, a Universidade Federal do Rio de Janeiro através do IRD, o Centro de Desenvolvimento e Tecnologia Nuclear - CDTN, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, Laboratório de Poços de Caldas – LAPOC, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRGN e Universidade Federal Fluminense - UFF entre outras instituições trabalhando em diversas linhas de projeto sobre radônio, estas instituições atuam quase sempre em conjunto com outras instituições governamentais.

Um dos maiores problemas que encontramos atualmente é a falta de unidade e/ou uniformidade nas ações destes grupos de pesquisa, os projetos deveriam ser desenvolvidos de forma estruturada para não haver redundância nas pesquisas, deveriam seguir protocolos e procedimentos únicos de medição e principalmente no tratamento dos resultados, outro problema é ausência de um laboratório de calibração de radônio na América Latina e Caribe o que leva as estas instituições a não enviarem seu equipamentos para calibração nos laboratórios europeus ou nos EUA e a não participação de exercícios de intercomparação pois o custo é extremamente alto.

Em 1999, Vicente ⁽¹³⁾, já demonstrava que o homem está constantemente exposto à radioatividade natural, proveniente principalmente de materiais da crosta terrestre que possuem na sua constituição elementos químicos pertencentes às famílias radioativas do urânio e do tório. A utilização destes materiais para construção de casas constitui-se numa

importante forma de exposição a radiações ionizantes, sobretudo ao gás radioativo ^{222}Rn , que deles é exalado. Os habitantes da cidade de Monte Alegre no Pará, utilizavam, na construção de suas casas, pedras retiradas de uma região distando 20 km, denominada Inglês de Souza, onde se encontra uma vila residencial, denominada de Colônia Agrícola Nacional do Pará (CANP).

O objetivo do trabalho executado por Vicente foi o de fazer o levantamento da concentração ^{222}Rn no ambiente interno das residências de Monte Alegre e da vila. Nele também foi realizada ainda, determinações dos teores de ^{238}U , e ^{226}Ra , medidas do fluxo de radônio em amostras da rocha e dos solos das duas regiões, bem como medidas de dose gama, tanto próximo do solo como no interior das residências.

Serena Righi, 2006 ⁽²⁾ também mostrava que o conhecimento dos níveis de radiação ionizante em edifícios era claramente de fundamental importância na avaliação da exposição da população, uma vez que a maioria dos indivíduos passa a maior parte do tempo dentro de casa. Normalmente, as duas principais vias de exposição em ambientes fechados estão relacionadas a exposição à radiação gama terrestre e a inalação de isótopos de radônio.

Neste trabalho, Serena Righi utilizou amostras de materiais de construção pesando de 1,0 a 2,0 kg essas amostras foram coletadas em pedreiras.

Foram utilizadas amostras de: 13 materiais estruturais (tijolos, concreto e argamassa) e 29 materiais de revestimento (telhas, gesso e pedras naturais para revestimento).

Todas as amostras foram britadas e secas a 105 °C para eliminar qualquer teor de água. Para as medições pela técnica de espectrometria gama, as amostras homogeneizadas foram então transferidas para um Marinelli de 450 ml e pesadas. As amostras foram seladas e armazenadas por pelo menos 30 dias para garantir o equilíbrio secular entre ^{226}Ra e os filhos medidos ^{214}Pb e ^{214}Bi . A fim de determinar a taxa de exalação do radônio, uma quantidade de cerca de 150 g de amostra foi usada para cada medição.

A taxa de exalação foi medida através do crescimento da concentração de atividade ^{222}Rn CRn (Bq.m^{-3}) em função do tempo dentro de um container fechado.

Em outro trabalho ⁽¹⁾ foi descrito um método para quantificar o gás radônio exalado em rochas ornamentais, a técnica empregada neste trabalho não é muito complexa para ser realizada e se obter os resultados adquiridos na forma de ciclos de medidas. O principal desafio consistiu no acondicionamento das amostras em um recipiente que mantivesse a pressão de vácuo interna por período de 25 dias necessários para que o ^{222}Rn

atinga seu equilíbrio radioativo, todo o sistema estava conectado ao aparelho medidor sem interferência do ar do meio externo, Figura 27.

Neste trabalho foi utilizado um garrafão para acondicionamento das amostras, o AlphaGUARD foi posicionado exterior ao garrafão para o confinamento das amostras onde não possa ocorrer o risco de contaminação com o ambiente externo, o sistema utilizado também não possui uma ventoinha para fazer o ar circular, outro ponto importante é que no interior do garrafão existem várias amostras e não temos também um computador ligado ao AlphaGUARD para uma avaliação constante durante as medições.



Figura 27: Sistema composto de AlphaGUARD, bomba de ar e garrafão (câmara) contendo as rochas

Diferentemente do trabalho realizado em ⁽¹⁾, para o desenvolvimento de nosso trabalho de pesquisa utilizamos o Container para Emissão e Calibração de 50 L da SHAPHYMO certificadas para tal, Figura 28.

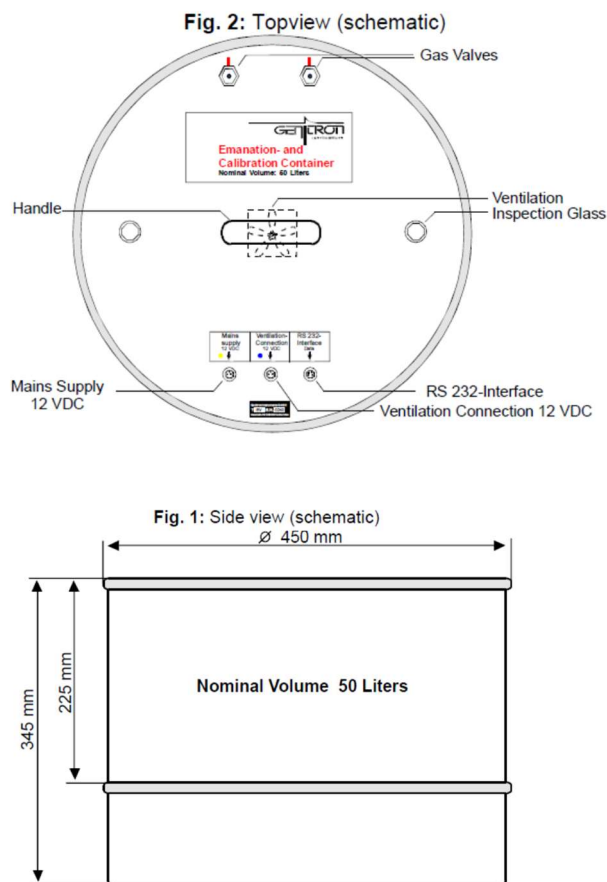


Figura 28: Visão e detalhes do container para emissão e calibração da SAPHYMO

CAPÍTULO III

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Divisão de Radioproteção Ambiental, Ocupacional e de Análises Ambientais/DIRAD

A área de radioproteção ambiental, ocupacional e de análises ambientais tem sido cada vez mais requisitada no sentido de dar suporte às instituições de pesquisa, instituições regulatórias, universidades para o uso seguro das radiações ionizantes no país.

A DIRAD dentre as suas atividades realiza análises para determinação das concentrações de radionuclídeos e elementos estáveis em amostras ambientais, amostras oriundas das indústrias nucleares, indústrias que utilizam ou processam Materiais Radioativos de Ocorrência Natural - NORM, de alimentos para exportação e de materiais para construção e rochas ornamentais utilizadas na construção civil no Brasil ou para exportação.

Atuando juntamente com o Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes LNMRI/IRD, na coordenação do Programa Nacional de Intercomparação Interlaboratorial – PNI de resultados nas análises de radionuclídeos em amostras ambientais.

Os laboratórios de Radiometria e de Radioquímica da DIRAD participam do PNI bem como participam de programas de cooperação técnico-científica nacional e internacional na área de radioproteção ambiental e ocupacional e estão integrados à rede Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity – ALMERA da Agência Internacional de Energia Atômica/IAEA.

A DIRAD também possui o Laboratório de Radônio – LabRn equipado para análises de radônio e filhos com equipamentos que utilizam alta tecnologia bem como protocolos e procedimentos técnicos que permitem suportar pesquisas e trabalhos de rotina nas instalações em que a DIRAD pode atuar.

A DIRAD também participa do programa de Gestão da Qualidade do IRD tendo o ensaio de espectrometria gama em filtros de ar oriundos das estações de radionuclídeo que fazem parte da rede de monitoramento “Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization - CTBTO no processo de acreditação pela norma ISO/IEC 17025 - Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração (General

Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories) junto ao INMETRO.

A DIRAD também opera a estação a RN11 do CTBTO de monitoração de particulado no ar (Radionuclide Aerosol Sampler Analyser - RASA) e de gases Nobres Swedish Automatic Unit for Noble Gas Acquisition - SAUNA, que constituem parte do Tratado Internacional de Banimento Completo dos Testes Nucleares CTBT.

Mantém em operação o Laboratório de Radiometria RL04, como parte integrante dos dezesseis laboratórios internacionais do Tratado Internacional de Banimento Completo dos Testes Nucleares (CTBT).

São os seguintes laboratórios que suportaram o desenvolvimento deste trabalho.

3.2 - Laboratório de Radiometria

O laboratório de radiometria utiliza equipamento de última geração para a medida de radiação com a alta sensibilidade necessária para a determinação da concentração de radionuclídeos em amostras de matrizes ambientais, em alimentos, rochas ornamentais, minérios e amostras da indústria do petróleo e indústrias potencialmente identificadas com NORM para as áreas ambiental e ocupacional. Estas medidas podem ser realizadas diretamente nas amostras coletadas com um mínimo de preparação como, por exemplo, secagem e calcinação, como também em amostras preparadas após a execução de um procedimento radioquímico, o laboratório realiza avaliação desta concentração no meio ambiente e do ambiente ocupacional com a finalidade de se verificar a incorporação destes radionuclídeos nos trabalhadores e consequente estimativa da dose ocupacional.

O Laboratório está equipado com sistemas de espectrometria gama Figura 29, espectrometria alfa Figura 30, alfa total Figura 31 e beta total Figura 32.



Figura 29: Sistema Espectrometria Gama CAMBERRA



Figura 30: Sistema Espectrometria Alfa EG&G ORTEC



Figura 31: Sistema para determinação alfa total: MS-2 e RD14 e SAC4



Figura 32: Sistemas para determinação Beta Total: BC 4

3.3 - Laboratório de Radônio - LabRn

O conjunto de laboratórios que constituem o LabRn (laboratório de revelação de detectores passivos CR39, laboratório de equipamentos ativos (AlphaGUARD, RAD7, Containers de exalação e calibração e padrões e laboratório de contagem e análise de detectores passivos CR39) foi montado para atender a demanda crescente no âmbito das atividades da CNEN bem como as atividades de pesquisa que envolvem diversas instituições e universidades brasileiras que necessitem/atuam nesta área. O LabRn participou no projeto de Apoio à Normalização e Avaliação da Conformidade de Rochas Ornamentais no sentido de orientar e medir as concentrações de radônio em amostras de rochas ornamentais, o LabRad tem participado ativamente de diversos projetos nacionais e internacionais atuando em conjunto com os institutos da CNEN, Universidade Federais do Rio Grande do Sul, do Rio Grande do Norte Rio de Janeiro e o Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

Atualmente o LabRn está participando de projeto de pesquisa com a CPRM na “Correlação entre radiação ambiental e o gás radônio com a incidência de câncer de pulmão em regiões de alta exposição à radiação natural – Projeto Risco Radônio Brasil em diversas regiões do Brasil”, o Projeto SGBR Estudos em Ambientes de Coleções: Caso LIBE (Rio Grande do Norte), Concentração de radônio em ambientes de coleções fósseis da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Concentração de radônio no Museu de Paleontologia Irajá Damiani Pinto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e avaliação da concentração de radônio no Museu Nacional por solicitação da UFRJ.

O LabRn possui implantadas técnicas e metodologia para a determinação de ^{222}Rn e ^{220}Rn e seus descendentes (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po tais como: método de Rolle, método de Kusnetz, método dos dois filtros, método Tsivoglou modificado, método dos dois filtros para ^{220}Rn .

O LabRn participou em 2024 do “INTERNATIONAL INTERCOMPARISON EXERCISE ON NATURAL RADIATION MEASUREMENTS UNDER FIELD CONDITIONS 2024 - Radon Measurements. As medições de intercomparação de radônio foram realizadas de 20 a 23 de maio de 2024 no Laboratório de Radiação Natural (LNR) localizado nas instalações da antiga mina de urânio administrada pela Empresa Nacional de Urânio Espanhola ENUSA tendo também a participação/coordenação do Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade da Cantábria – LaRUC, Santander/Espanha e do Conselho Espanhol de Segurança Nuclear (CSN).

Participaram deste exercício 39 laboratórios da Europa sendo o resultado do exercício para o LabRn considerado excelente ficando bem posicionado em relação a exposição planejada pelos organizadores.

O LabRn está equipado com o sistema RadoMeter 2000 da RADOSYS Atlantic, Figura 33, esse equipamento consiste em módulo para revelação de detectores passivos CR39 (Etching Unit) e um módulo de digitalização e processamento de imagem para detecção de radônio (Microscope Unit with Embedded Computer), o que automatiza o processo, aumentando em muitas vezes a capacidade de processamento de dosímetros passivos CR39 para revelação e leitura e o TASLImag do fabricante TrackAnalysis Systems Ltda (TASL) utilizado também para detectores CR39.

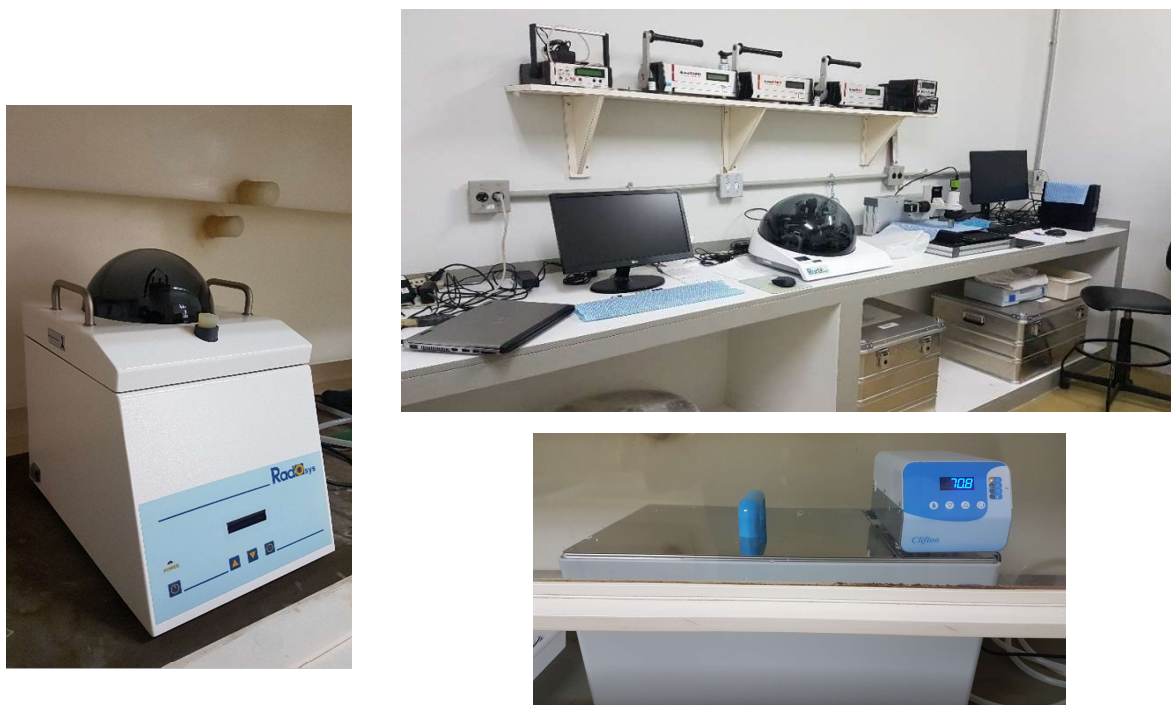


Figura 33: Sistema de revelação e contagens de traços da RADOSYS e TASLImag

O LabRn está equipado com sistemas de medição tipo ativo da empresa GENITRON AlphaGUARD - PQ2000 PRO e Rad7, Figura 34.



Figura 34: Sistema de medição de radônio AlphaGUARD e Rad 7

Os dois sistemas também estão equipados com AquaKit para análises de radônio em águas, Figura 35.



Figura 35: Sistema AquaKit do AlphaGUARD

O LabRn também está equipado com padrões rastreáveis ao National Institute of Standards and Technology (NIST) para serem utilizados em calibrações e ou avaliações intermediárias, Figuras 36, 37, 38 e 39.



Figura 36: Material de referência ^{222}Rn
(padrão de emissão)



Figura 37: PYLON 190
Padrão para filhos (^{226}Ra e ^{228}Th)



Figura 38: PYLON 1025
Padrão de calibração de fluxo contínuo
 ^{226}Ra (^{222}Rn)



Figura 39: PYLON 1150
Padrão para calibração (^{226}Ra)

O LabRn possui 5 containers para emanção e calibração de 50 L da SHAPHYMO certificados para medições (ensaios) e calibrações, Figura 40.



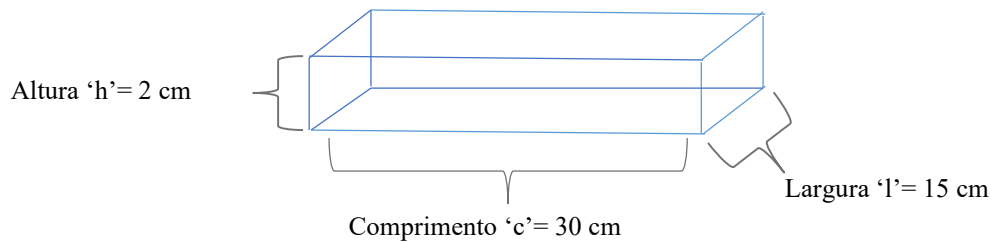
Figura 40: Câmara para emanção e calibração da SHAPHYMO

3.4 - Metodologia para a Quantificação da Exalação do Gás Radônio em Rochas Ornamentais

O gás radônio é considerada a segunda maior causa de câncer no mundo, avaliações e recomendações reforçam internacionais indicam a necessidade da realização de estudos aprofundados e direcionados a medição e determinação das concentrações de radônio para público, meio ambiente e locais de trabalho. Alguns métodos para quantificar o radônio exalado de rochas não são simples de realizar, podendo precisar de várias etapas (incluindo etapas em laboratório) para que sejam obtidos os dados. A técnica empregada para o desenvolvimento deste trabalho é de fácil uso e manipulação desde que o laboratório tenha os equipamentos adequados para tal, nesse sentido o equipamento escolhido foi o AlphaGUARD - PQ2000 PRO que nos possibilita a obtenção de dados no formato de ciclos de medições entre 10 e 60 minutos.

O tamanho e a massa das amostras de rochas ornamentais foram padronizados segundo as informações abaixo:

a) dimensões:



b) Peso total da amostra 2,480 kg.

As amostras de rochas ornamentais possuíam uma face polida sem resina e a outra ao natural.

Em um container SHAPHYMO para emissão e calibração foi acondicionado o equipamento AlphaGUARD e a amostra de rocha ornamental, Figura 41, o container foi fechado/lacrado, Figura 42 para manter o ar em seu interior por um igual ou superior a 25 dias não houvesse nenhuma interferência do ar do meio externo, o equipamento AlphaGUARD foi conectado no interior do container através de conectores para fornecimento de energia para a bateria e que permitisse também, sua conexão com o notebook de modo a visualizar/acompanhar os resultados durante a realização da medição.



Figura 41: Posicionamento da amostra e do AlphaGUARD no interior da câmara

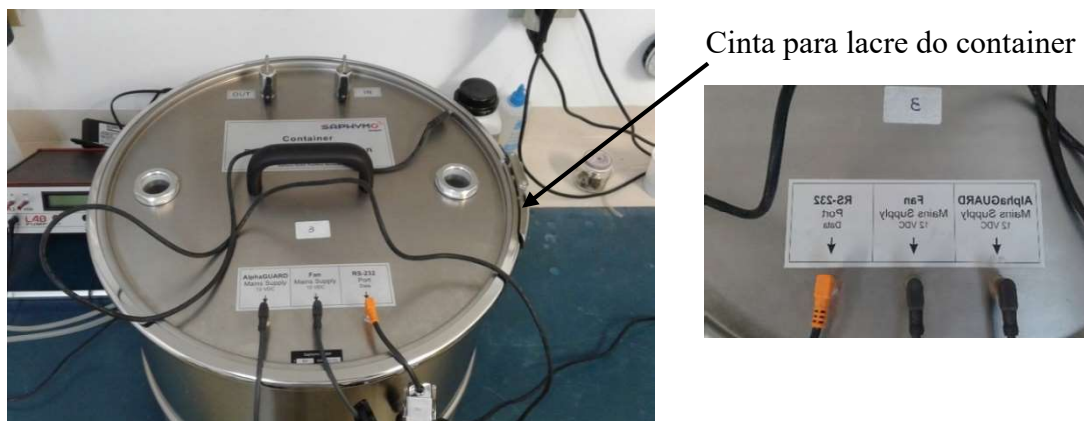


Figura 42: Conexões externas da câmara

O procedimento permitiu a realização do monitoramento e a quantificação da concentração de radônio e seus filhos para 18 amostras de rochas ornamentais, contribuindo para o avanço das pesquisas sobre o comportamento e difusão desse gás.

As amostras de rochas ornamentais Café Bahia foram enviadas pela mesma empresa e identificadas como retiradas de três frentes diferentes de lavras assim identificadas: HR, CR e CC.

As amostras foram inicialmente analisadas por um período de 24 horas com o objetivo de se avaliar os resultados com as maiores concentrações e as concentrações médias nesse período, a partir desta avaliação, foram escolhidas seis amostras das três diferentes frentes de lavras para a realização de análise por um período de 25 dias de forma a obtermos o equilíbrio radioativo.

A seguir, iremos detalhar as condições de análise e medição para a determinação da exalação do gás radônio proveniente das amostras.

3.5 - AlphaGUARD PQ2000 PRO

Para a medição da taxa de exalação do gás radônio utilizou-se o AlphaGUARD - AG, Figura 22, este equipamento fornece entre outras medições simultâneas (umidade, temperatura e pressão) a exalação de radônio em Bq.m^{-3} e exposição em $\text{Bq.m}^{-3}\text{h}^{-1}$, as medições podem ser programadas para serem realizadas em ciclos de 10 e de 60 minutos.

O AG foi projetado para o emprego no monitoramento de radônio em diversos locais: minas subterrâneas, solos (container de exalação em solo), água (kitÁgua) e podendo também ser utilizado em residências (não sendo o ideal), em residências o ideal

é utilizarmos os detetores passivos. Conforme especificado pela GENITRON o AG permite se obter concentrações de Rn no intervalo de 2 Bq.m^{-3} a 2 MBq.m^{-3} .

O AG, utiliza um espectrômetro alfa constituído por uma câmara de ionização de pulso otimizado, onde o gás é difundido em uma câmara cilíndrica com filtro de fibra de vidro que retém todos os produtos de decaimento do radônio.

Os sinais ou pulsos são quantificados e digitalizados na saída da câmara. O centro do eletrodo lê taxas de ionização como pulsos, que são processados por uma unidade pré-amplificadora muito sensível, sendo que três canais independentes em uma rede de processamento digital permitem realizar uma diferenciação eficaz entre eventos alfa real e diferentes efeitos de interferência, medir as concentrações de radônio e avaliar suas elevadas concentrações, a Figura 43 apresenta o esquema eletrônico do AG.

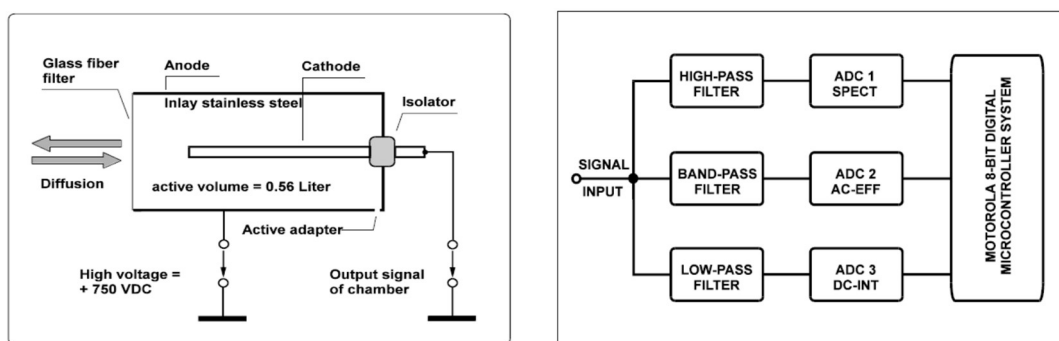


Figura 43: Esquema do

O ensaio foi montado como apresentado na Figura 44, um outro AlphaGUARD foi deixado ligado realizando medições no LabRn.



Figura 44: Sistema montado para o ensaio

Foi elaborada uma planilha, para a realização dos ensaios de quantificação do gás radônio exalado das amostras. A planilha contém os dados sobre as amostras de rochas

ornamentais como: especificação da frente de lavra (HR, CR e CC), número da amostra, resultado da taxa de exalação de radônio (valor máximo e médio), exposição, as medições médias de taxas de dose (contagem líquida da face polida e contagem líquida da face não polida).

Inicialmente foram realizadas medições de 24 horas para se verificar quais eram os maiores valores e as médias dos resultados e sendo que a partir dos resultados foram selecionadas as amostras que deveriam ser avaliadas pelo período de 25 dias.

Os dados gerados pelo sistema de medição foram acompanhados através do computador que está ligado online ao AG que está no interior do container de emanção e calibração.

Ao final da medição de cada ciclo de 25 dias, o sistema era desmontado, o AG ficava ligado com uma bomba forçando o ar a passar pelo seu interior, quando os resultados apresentavam medidas baixas ao nível do Background do LabRn, iniciava-se uma nova medição.

Como adotamos no AG ciclos de medida, seria esperado um aumento da atividade da concentração de radônio com o passar do tempo. O objetivo principal dos ciclos de medidas consistiu em saber se após o ^{222}Rn atingir o equilíbrio radioativo secular, que ocorre em aproximadamente 25 dias, o gás radônio também atingiria equilíbrio em termos de fuga do meio rochoso.

3.6 – Preparação de amostras para o Sistema de Espectrometria Gama

Ao final da obtenção das medições das amostras no período de 25 dias fatiamos uma parte de cada uma das seis amostras em seis pedaços menores, essas seis fatias foram então moídas esse processo foi realizado no Centro de Tecnologia Mineral – CETEM na no Rio de Janeiro obtendo assim amostras padronizadas Figuras 45



Figura 45: Amostras preparadas para análises por espectrometria gama

As análises foram realizadas no sistema de Espectrometria Gama de Alta Resolução no Laboratório de Radiometria da DIRAD Figura 29, esse é composto de um detector de germânio hiperpuro, multicanal digital, blindagem de baixa radiação de fundo, caracterizado por Método de Monte Carlo, calibração em eficiência por Método de Monte Carlo instalado. Curvas de eficiência semi-empírica são calculadas para material biológico (folhas, cinzas, peixes) e material geológico (solo, rochas, sedimentos, alumina) e mantendo sempre a mesma geometria de medição.



Figura 46: Exemplos de geometria de medição para o sistema de espectrometria gama

3.7 – Medições de Taxa de Dose

As medições para taxa de dose foram realizadas com o medidor portátil Eberline E-600 “Smart”. Esses monitores possuem conectores “inteligentes” que, quando usados com sondas “inteligentes”, permitem que o monitor aplique automaticamente a calibração apropriada. Isso permite que você troque as sondas no campo ou laboratório para uso imediato, nesse ensaio utilizamos o detector SHP-270.



Figura 47: Sistema de medição de taxa de dose – E600 e SHP 270

CAPÍTULO IV

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados das Medições Realizadas e Análises

Os ensaios para medição da concentração de radônio foram realizados nas 18 amostras enviadas de Café Bahia a DIRAD/IRD para análise.

As amostras foram inicialmente analisadas por um período de 24 horas com o objetivo de se avaliar os resultados com as maiores concentrações e as concentrações médias nesse período, a partir desta avaliação, foram escolhidas seis amostras das três diferentes frentes de lavras para a realização de análise por um período de 25 dias de forma a obtermos o equilíbrio radioativo.

A Tabela 9 apresenta dados das amostras de rocha, como: especificação (HR, CR e CC), número de amostras, concentrações de gás radônio (valor máximo e médio), o resultado para exposição (radônio), medição da taxa de dose realizada com superfície polida e não polida e a ordem de prioridade para as análises subsequentes.

A radiação de fundo medida foi de $0,267 \mu\text{Sv.h}^{-1}$.

O resultado da medição da exalação de radônio é um valor integrado, a incerteza relacionada está declarada na Tabela 6.

4.1.1 Análises para as Amostras de Rochas Ornamentais em 24 horas

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos durante as analisadas por 24 horas na tabela podemos identificar que as concentrações de atividade de radônio variaram de 0,8 a $6,2 \text{ kBq.m}^{-3}$ com uma média de $1,8 \text{ kBq.m}^{-3}$. A exposição variou de 2,5 a $331 \text{ kBq.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$ com uma média de $40,3 \text{ kBq.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$.

As amostras de rochas “Café Bahia” de 01 a 06 da frente de mineração HR apresentaram concentração média de atividade de radônio na ordem de $(3,2747 \pm 1,5484 \text{ kBq.m}^{-3})$. A amostra 06 apresentou um resultado extremamente alto na ordem de duas vezes o valor encontrado para a média das outras 4 amostras ($6,240 \text{ kBq.m}^{-3}$). As amostras escolhidas para análise de 25 dias foram 04 e 06 (maiores e menores resultados).

Tabela 8: Resultado das medições realizadas para 24 horas							
Amostra		Atividade da Concentração de Radônio (kBq.m ⁻³)		Exposição (kBq.m ⁻³ .h ⁻¹)	Média da taxa de dose (μSv.h ⁻¹)		Prioridade para análise de 25 dias
					Face polida (líquida)	Face não polida (líquida)	
		Máximo	Média				
HR	01	3,696	1,994	130,777	0,064	0,064	2
	02	2,496	1,178	2,480	0,014	0,064	5
	03	2,576	1,445	35,991	0,244	0,064	3
	04	2,096	1,112	25,400	0,064	0,014	6
	05	2,544	1,407	31,800	0,124	0,074	4
	06	6,240	3,494	330,995	0,124	0,244	1
CR	07	1,008	0,546	14,073	0,124	0,124	4
	08	0,944	0,430	11,428	0,124	0,064	6
	09	1,208	0,676	16,336	0,124	0,064	2
	10	1,128	0,618	14,117	0,354	0,304	3
	11	0,952	0,566	13,859	0,124	0,124	5
	12	1,272	0,641	15,806	0,124	0,124	1
CC	13	0,992	0,607	14,977	0,124	0,074	4
	14	1,040	0,630	14,905	0,124	0,244	3
	15	1,056	0,600	15,004	0,124	0,064	2
	16	0,868	0,467	11,212	0,014	0,064	5
	17	1,128	0,671	16,442	0,124	0,124	1
	18	0,824	0,433	10,534	0,134	0,014	6
Incerteza na calibração do instrumento de 3% (mais incerteza do padrão primário).							

As amostras de 07 a 12 das rochas “Café Bahia” da frente de mineração CR apresentaram resultados médios na ordem de $(1,0853 \pm 0,1382 \text{ kBq.m}^{-3})$. As amostras escolhidas para análise de 25 dias foram as amostras 08 e 12 (maiores e menores resultados).

As amostras de 13 a 18 das rochas “Café Bahia” da frente de mineração CC apresentaram resultados médios na ordem de $(0,9847 \pm 0,1168 \text{ kBq.m}^{-3})$. As amostras escolhidas para análise de 25 dias foram as amostras 17 e 18 (maiores e menores resultados).

Todas as 18 amostras apresentaram concentração de atividade de radônio acima dos limites para membros do público (em residências) quando comparadas com a regulamentação brasileira ⁽⁴⁾ que é de 300 Bq.m^{-3} e comparadas com a recomendação internacional de 100 Bq.m^{-3} da OMS ⁽⁶⁾ e da AIEA ⁽¹⁰⁾. Os resultados de "Exposição

(kBq.m⁻³.h⁻¹) apresentam valores elevados e são importantes para o cálculo do fator de permanência da população em ambientes residenciais (totalmente fechados).

A taxa de dose apresentada na Tabela 8 variou do mínimo detectável (0,014 µSv.h⁻¹) a 0,354 µSv.h⁻¹ na face polida da amostra voltada para o detector, e do mínimo detectável (0,014 µSv.h⁻¹) a 0,304 µSv.h⁻¹ com a face não polida da amostra voltada para o detector, não houve variação significativa para cima ou para baixo em relação ao polimento. A taxa de dose medida para as amostras está abaixo dos limites recomendados para o público, que é de 0,5 µSv.h⁻¹ (4).

4.1.2 - Análises para as Amostras de Rochas Ornamentais em 25 dias

Após serem definidas as seis amostras com as concentrações máximas e médias iniciamos as medições de 25 dias sendo os resultados apresentados na Tabela 9.

Os resultados das análises apresentam claramente o comportamento da concentração de radônio comparativamente nos três tipos de rochas (HR, CR e CC) distribuídas pelos dias em que foram analisadas/registradas, podemos verificar o crescimento das concentrações (máximas) de ²²²Rn ao longo do tempo com seus descendentes (²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi e ²¹⁴Po) conhecido como equilíbrio secular, na última coluna da Tabela 9 podemos comparar os resultados de 25 dias com o resultados obtidos na análise de 24 horas estes resultados comprovam a necessidade/exigência da análise ser realizada em um período de 25 dias ou mais e comprova que a maior contribuição de dose do radônio está relacionada aos seus produtos de decaimento, este comportamento é amplamente conhecido através dos diversos estudos e pesquisas realizados com o radônio e que só pode ser comprovado quando se realiza um ensaio que utilize um container de emanção e calibração certificado e o principal, que sua estanqueidade seja testada e garantida.

A concentração média de atividade de ²²²Rn determinada após 25 dias de medição variou de 1,508 a 7,850 kBq.m⁻³ com uma média de 4,679 kBq.m⁻³, está acima dos níveis de referência para a situação de exposição existente para edifícios residenciais e de uso misto.

Tabela 9: Resultados das medições realizadas no período de 25 dias (kBq.m ⁻³)								
Amostra			5 dias	10 dias	15 dias	21 dias	25 dias	24h
HR	04	Valor Máximo	5,280	8,256	9,152	9,856	9,856	2,096
		Valor Médio	3,027	5,255	6,342	6,839	7,120	
	06	Valor Máximo	6,592	8,256	10,944	10,944	10,944	6,240
		Valor Médio	3,429	4,810	6,984	6,998	7,850	
CR	08	Valor Máximo	1,576	2,400	2,592	2,592	2,752	0,944
		Valor Médio	0,682	1,133	1,332	1,455	1,508	
	12	Valor Máximo	2,608	3,856	4,080	4,448	4,448	1,272
		Valor Médio	1,437	2,297	2,672	2,920	3,006	
CC	17	Valor Máximo	2,480	2,640	3,248	3,312	3,312	1,128
		Valor Médio	1,151	1,381	1,629	1,831	1,850	
	18	Valor Máximo	2,528	3,008	3,264	3,307	3,504	0,824
		Valor Médio	1,357	1,710	2,069	2,217	2,360	

Os resultados apresentados na Tabela 9 podem ser visualizados comparativamente nos gráficos das Figuras 48 a 49. Nestes gráficos podemos observar os valores máximos (Figura 48) e valores médios (Figura 49), podemos visualizar o comportamento da concentração de radônio comparativamente nos três tipos de rochas (HR, CR e CC) distribuídas pelos dias em que foram analisadas/registradas, podemos verificar o crescimento das concentrações de ²²²Rn ao longo do tempo com seus descendentes.

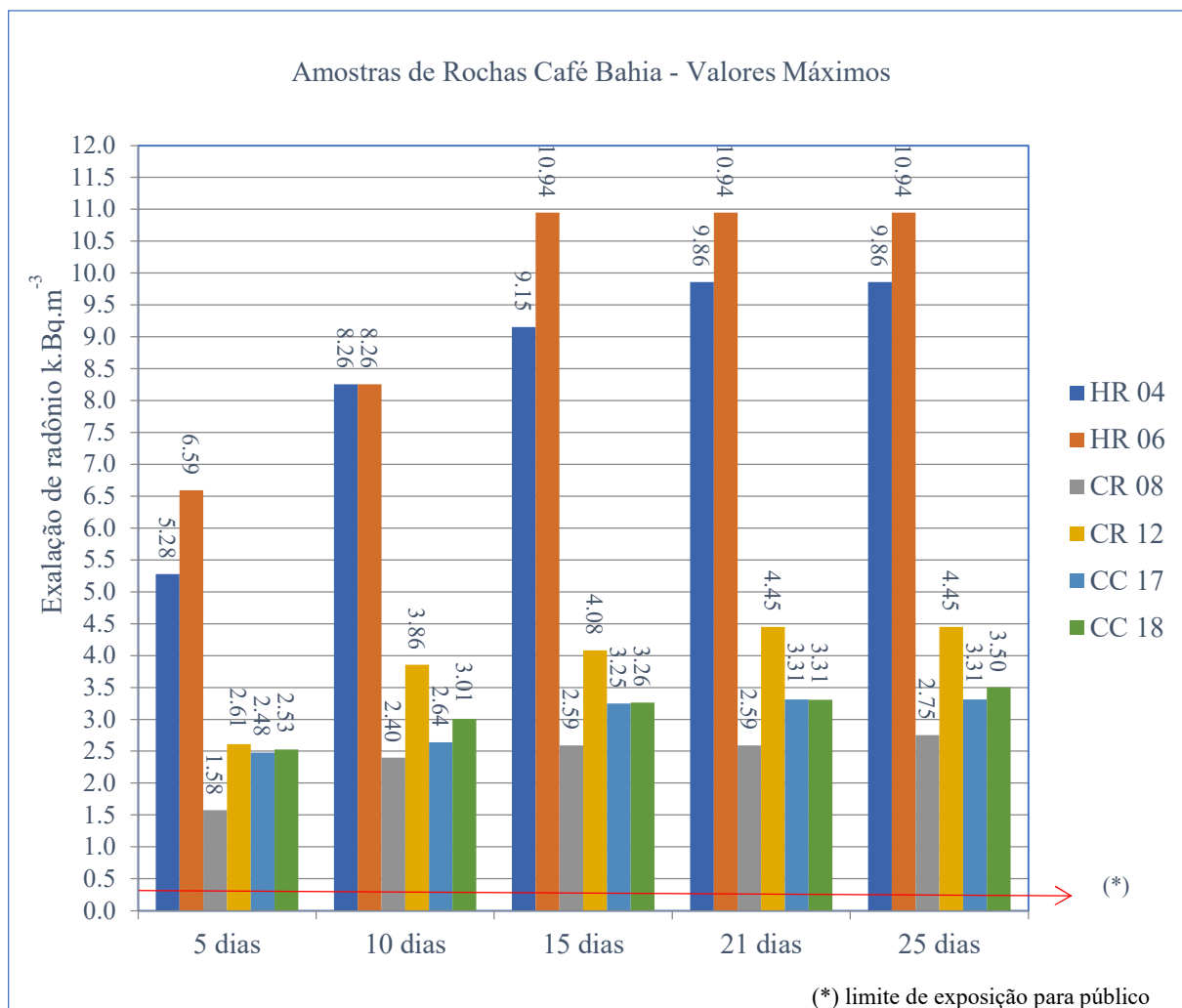


Figura 48: Comparação da exalação máxima de radônio das seis amostras seleccionadas durante 25 dias de exposição.

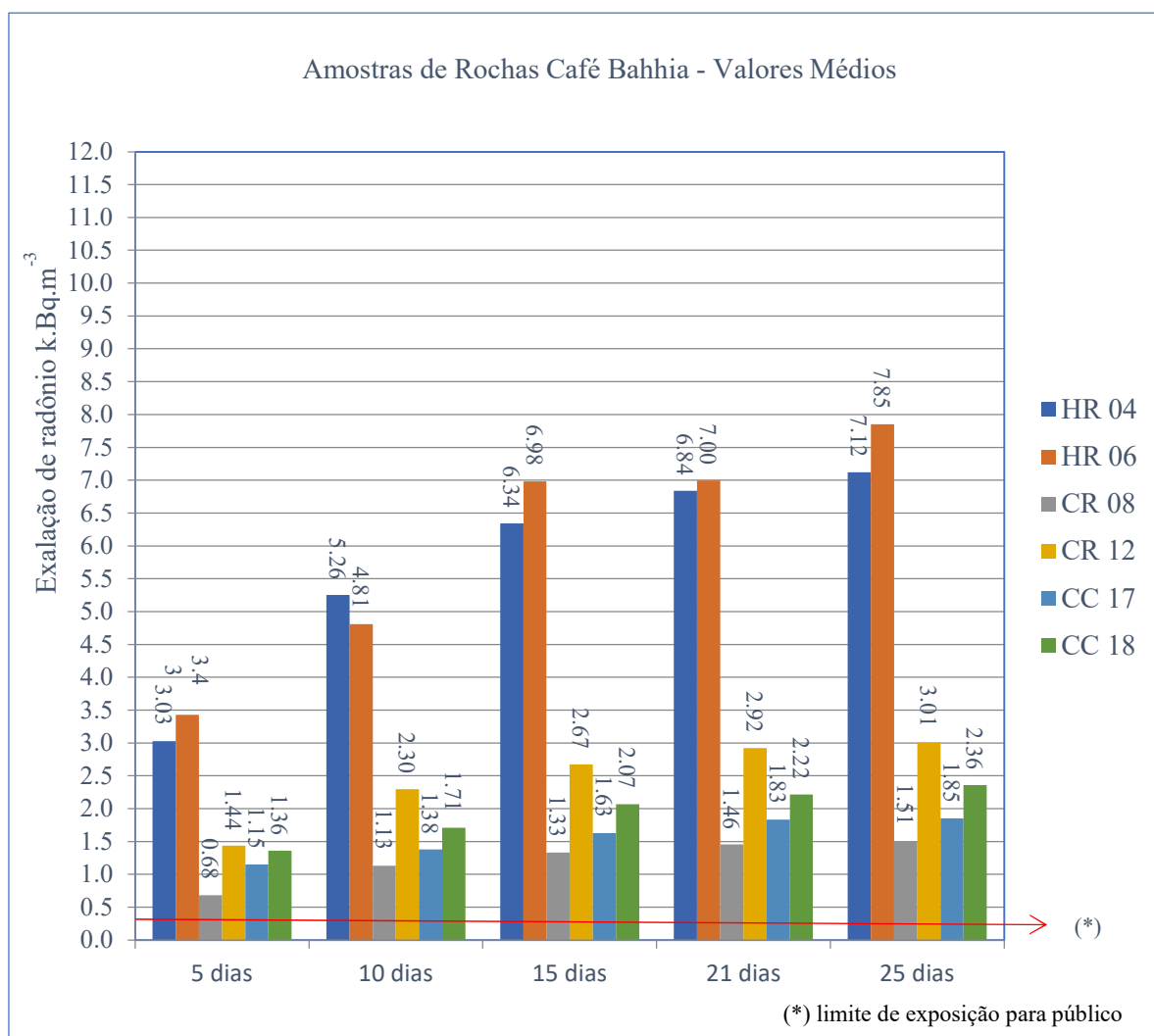


Figura 49: Comparação da exalação média de radônio das seis amostras seleccionadas durante 25 dias de exposição.

4.1.3 - Análises para as Amostras de Rochas Ornamentais por Espectrometria Gama

A Tabela 10 apresenta os resultados encontrados pela análise por espectrometria gama nas amostras de rochas ornamentais, as amostras foram confeccionadas a partir do corte de um pedaço da rocha original sendo em seguida moída (granulometria de pó), todo este procedimento foi realizado no CETEM. Os resultados identificaram e quantificaram os radionuclídeos de interesse ^{214}Pb , ^{214}Bi (^{226}Ra) e ^{228}Ac (^{228}Ra). Na tabela podemos verificar que os radionuclídeos de interesse individualmente estão abaixo dos valores recomendados pela CNEN ⁽⁴⁾ e IAEA ⁽⁵⁾ em relação ao ^{226}Ra e ^{228}Ra . Importante considerar que a massa analisada por espectrometria gama das amostras é da ordem de 10% da amostra total da rocha ornamental analisada por 25 dias. Se consideramos a massa da rocha ornamental padronizada (2.480 kg) teremos um resultado menor para ^{214}Pb e acima dos limites adotados pela CNEN para ^{214}Bi (^{226}Ra) e ^{228}Ac (^{228}Ra).

As amostras foram contadas no seguinte protocolo:

- Tempo: 60000s (LT) 60162s (RT);
- Geometria: POTE_CHEIO_CORR 03/04/2023;
- Calib. Energia: 14/11/2023
- Massa/Volume (média): $2,910 \cdot 10^{-1}$ Kg

Tabela 10: Resultados da análise por espectrometria gama			
Amostra	Radionuclídeo	Atividade Bq.kg ⁻¹	Incerteza Bq.kg ⁻¹
HR 04	²¹⁴ Pb	3,464E+02	+/- 1,103E+001
	²¹⁴ Bi (²²⁶ Ra)	3,297E+02	+/- 1,094E+001
	²²⁸ Ac (²²⁸ Ra)	5,297E+02	+/- 1,690E+001
Somatório		1,206E+03	
HR 06	²¹⁴ Pb	4,029E+02	+/- 1,282E+001
	²¹⁴ Bi (²²⁶ Ra)	3,862E+02	+/- 1,269E+001
	²²⁸ Ac (²²⁸ Ra)	5,268E+02	+/- 1,667E+001
Somatório		1,316E+03	
CR 08	²¹⁴ Pb	2,190E+02	+/- 7,044E+000
	²¹⁴ Bi (²²⁶ Ra)	2,102E+02	+/- 7,090E+000
	²²⁸ Ac (²²⁸ Ra)	3,163E+02	+/- 1,030E+001
Somatório		7,455E+02	
CR 12	²¹⁴ Pb	3,854E+02	+/- 1,227E+001
	²¹⁴ Bi (²²⁶ Ra)	3,742E+02	+/- 1,219E+001
	²²⁸ Ac (²²⁸ Ra)	4,436E+02	+/- 1,395E+001
Somatório		1,203E+03	
CC 17	²¹⁴ Pb	1,846E+02	+/- 6,305E+000
	²¹⁴ Bi (²²⁶ Ra)	1,798E+02	+/- 6,189E+000
	²²⁸ Ac (²²⁸ Ra)	4,242E+02	+/- 1,363E+001
Somatório		7,886E+02	
CC 18	²¹⁴ Pb	2,371E+02	+/-7,669E+000
	²¹⁴ Bi (²²⁶ Ra)	2,278E+02	+/- 7,662E+000
	²²⁸ Ac (Ra-228)	3,508E+02	+/- 1,113E+001
Somatório		8,157E+02	

A Figura 50 apresenta a localização e a distância entre a Província Riacho Santana e a Unidade de Concentrado de Urânio URA que pertence à Indústrias Nucleares do Brasil - INB. Como apresentado no texto e na Tabela 4 essa localidade possui o principal jazimento da rocha ornamental “Café Bahia”, essa proximidade com a mineração da URA/INB em Caetité/BA e suas anomalias naquela região podem explicar os resultados encontrados e discutidos nos capítulos 4 e 5.

A Figura 51 apresenta o Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil projeto Vale do Paramirim que apresenta a anomalia aerogamaespectrometrica de contagem total de forte intensidade nas regiões da Província Riacho de Santana (cor roxa claro), Maniaçu e região circunvizinha a instalação da URA/INB.

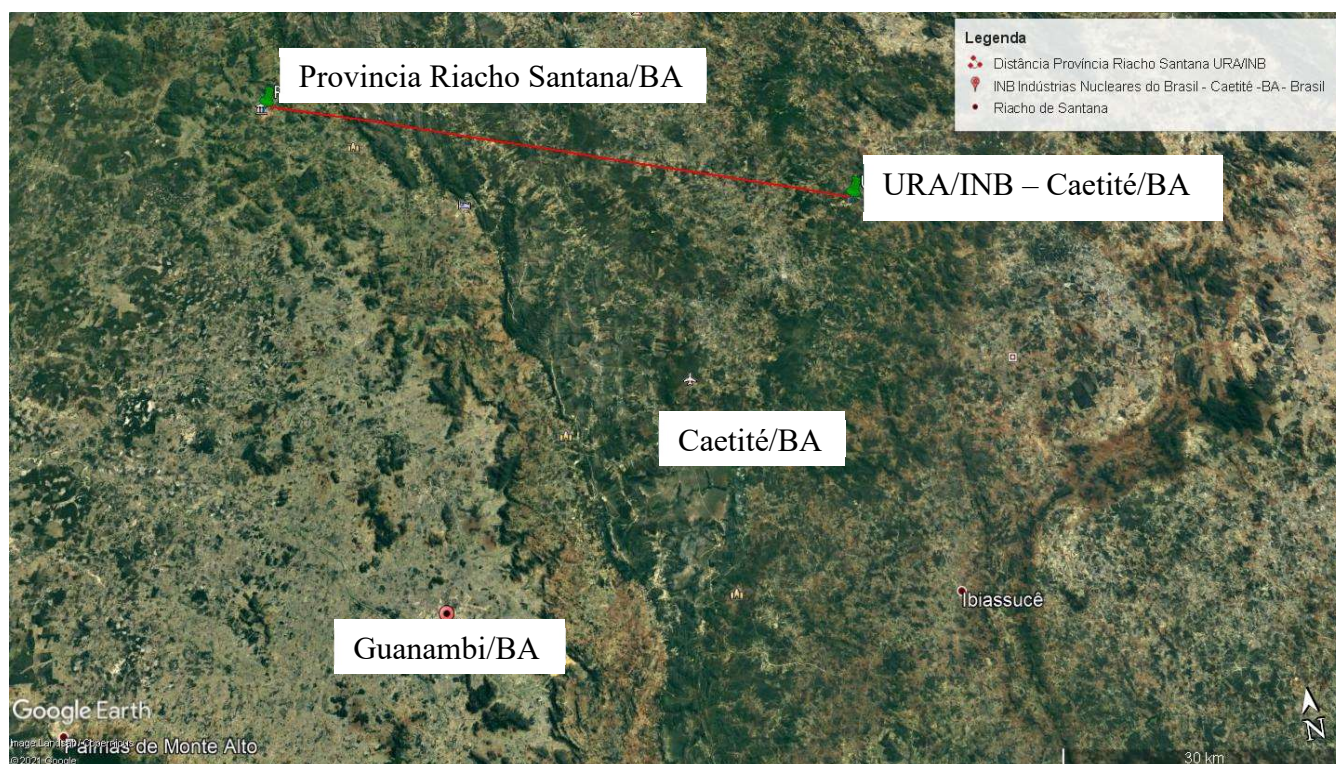


Figura 50: Localização e distância entre a Província de Riacho Santana e a Unidade de Concentrado de Urânio- URA – 75 Km

As Figuras de 52 a 55 estão relacionadas com um estudo realizado durante a visita no Laboratório de Radioatividade Natural da Cantábria/Espanha - LaRUC, localizado na Universidade da Cantábria/Espanha. Os mapas apresentam a Geologia do Brasil e foram elaborados no LaRUC aproveitando a experiência do laboratório na construção dos mapas de radônio da Espanha relacionados com a identificação de regiões propensas à concentrações de radônio.

As rochas plutônicas e metamórficas contém uma maior probabilidade de possuir elevadas concentrações de radônio, as rochas plutônicas ácidas (contem alto teor de sílica): granito, granodiorita, diorita, gabro, andesita, riolita, sienita...

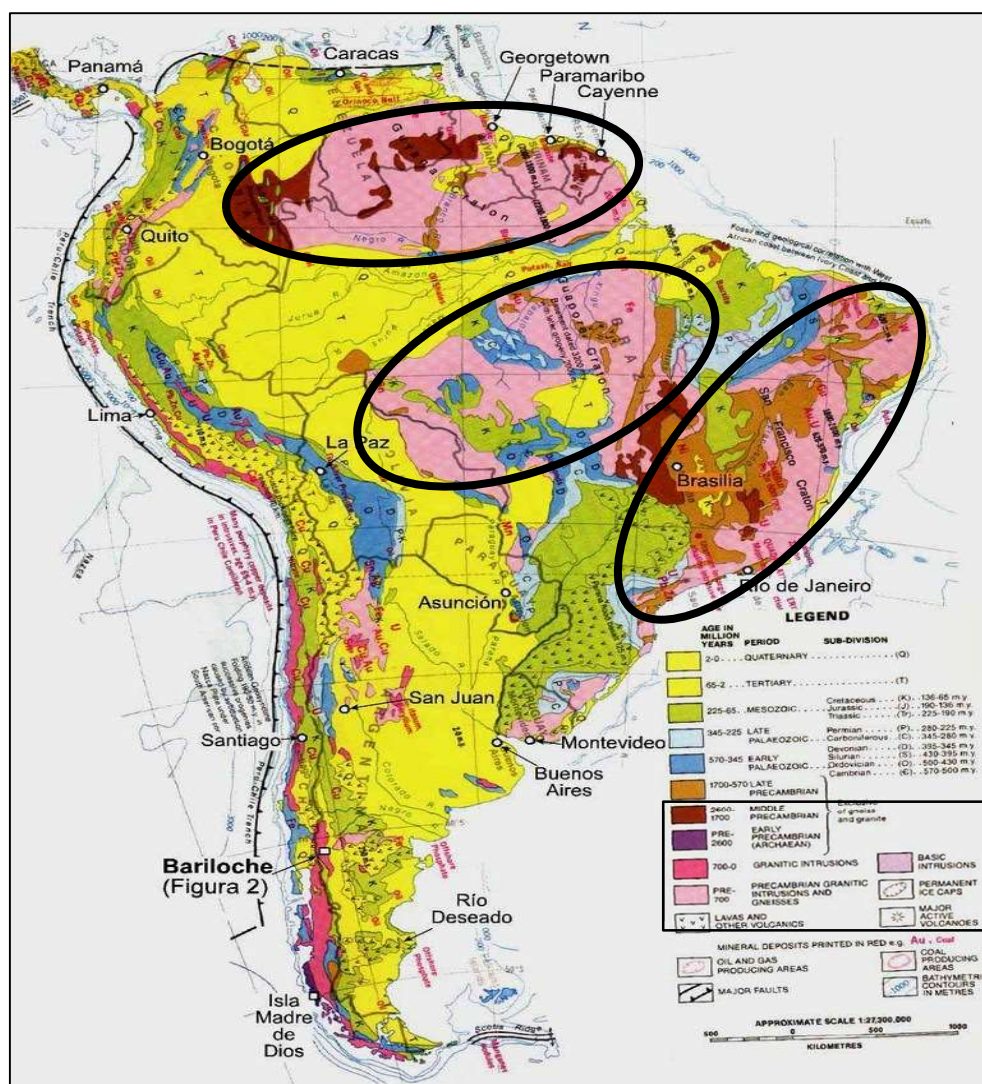
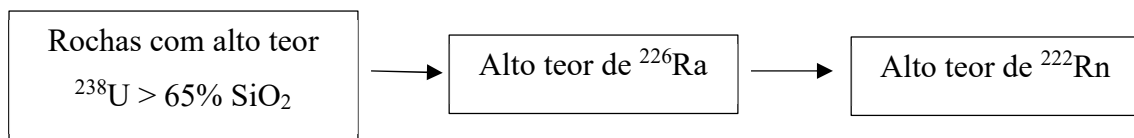


Figura 52: Unidades Litoestratigráficas do Brasil – Serviço Geológico do Brasil

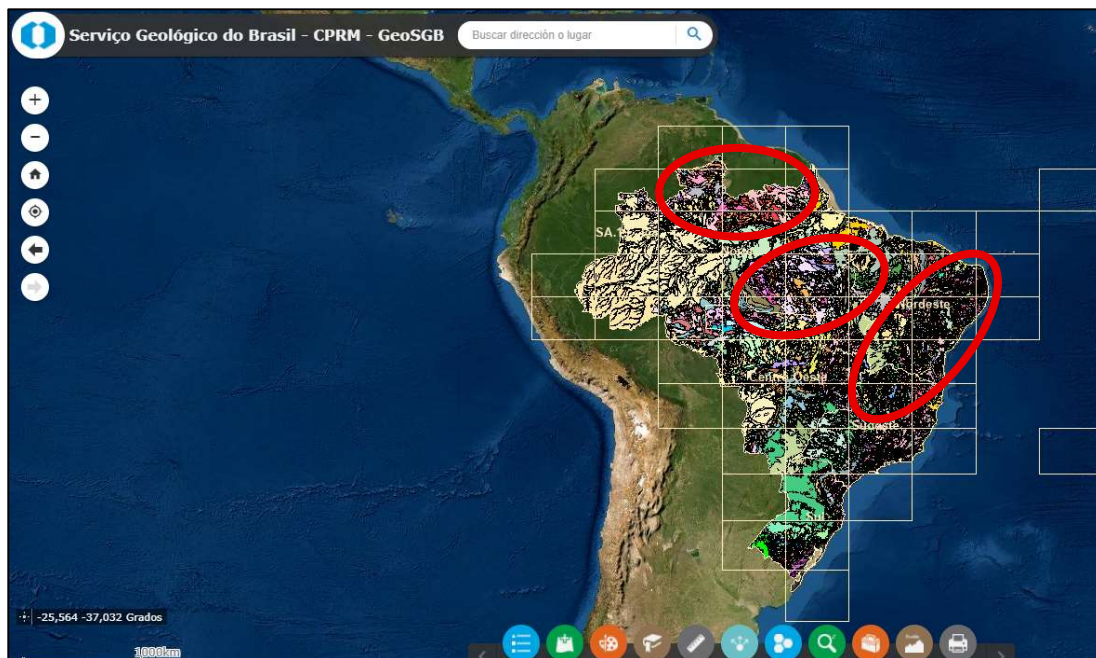


Figura 53: Litoestratigrafia 1000000 – Serviço Geológico do Brasil

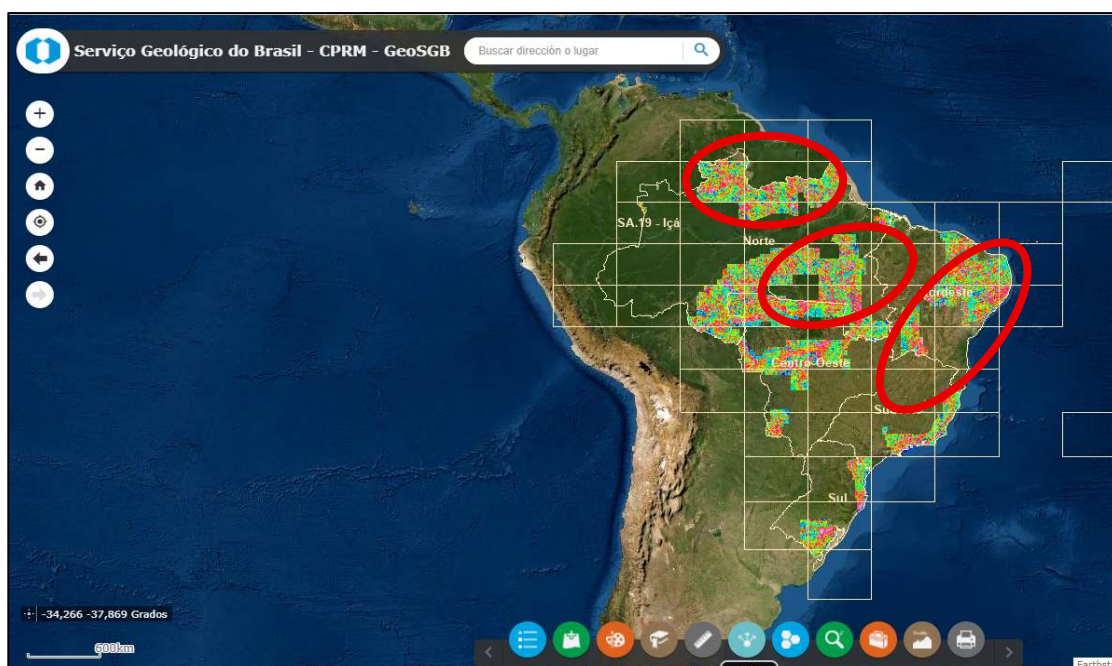


Figura 54: Equivalente em Urânio – Serviço Geológico do Brasil

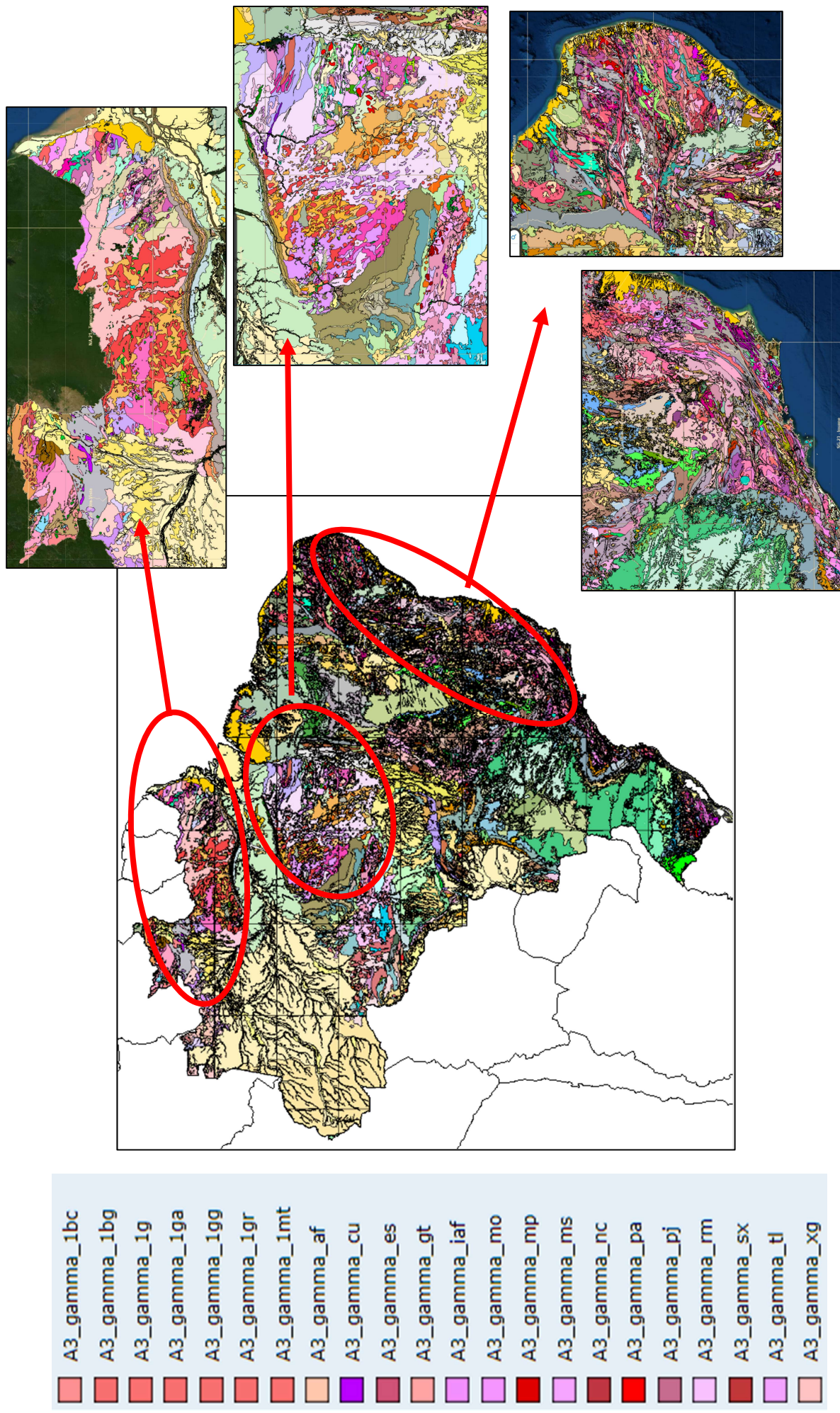


Figura 55: Geologia de interesse – Serviço Geológico do Brasil

CAPÍTULO V

5- CONCLUSÕES

Radônio (^{222}Rn) é um gás radioativo produzido a partir da decomposição de ^{226}Ra , ele é o responsável pela maior parte da dose recebida pelo ser humano devido à radioatividade natural e exalada de material mineral, como solo, rochas e materiais de construção como telhas e rochas ornamentais para revestimentos.

Neste estudo, amostras de rochas ornamentais graníticas tipo “Café Bahia” de três diferentes frentes de lavra HR, CR e CC sendo todas pertencentes a mesma empresa de mineração foram analisadas quanto à exalação de radônio, a dose externa para membros do público e o resultado da análise por espectrometria gama. Essas avaliações são importantes e necessárias devido ao amplo uso em residências dessas rochas nos mercados nacional e internacional.

Podemos observar nos resultados (tabelas e gráficos) o comportamento padrão das concentrações do radônio ^{222}Rn e seus filhos ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po de conhecimento para os pesquisadores que trabalham e estudam o comportamento do radônio bem aqueles descritos nas bibliografias existentes. Os gráficos das amostras confinadas ao longo de um tempo pré-determinado (25 dias), apresentam os valores máximos e médios para as amostras analisadas, as concentrações iniciam em um patamar baixo e ao longo do tempo decorrido as concentrações dos filhos de radônio ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po estabilizam quando estes, entram em equilíbrio com o ^{226}Ra (pai), esse comportamento valida as medidas realizadas pois todas apresentaram este padrão.

Observamos no desenvolvimento deste trabalho que rochas mais porosas (com maior microdescontinuidades), determinante da maior ou menor permeabilidade, controlam a exalação e permitem o melhor entendimento do processo de percolação de fluidos na rocha e, conseqüentemente da dinâmica do escape do gás radônio e sendo assim, quanto maior for a porosidade, menos obstáculos o átomo de Rn irá encontrar para sair da estrutura cristalina dos minerais e da trama da rocha, a rocha não libera todo radônio produzido devido ter barreiras que impedem este fato, a exalação depende da rede cristalina dos minerais e da trama deles na rocha.

A concentração de atividade de ^{222}Rn determinada após 24 horas de medição variou de 0,8 a 6,2 kBq.m^{-3} com uma média de 1,8 kBq.m^{-3} e estão acima das da norma da CNEN ⁽⁴⁾ recomendações internacionais para o público (residências) e meio ambiente

que é de 300 Bq.m^{-3} . A exposição variou de 2,5 a $331 \text{ kBq.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$ com uma média de $40,3 \text{ kBq.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$.

A concentração média de atividade de ^{222}Rn determinada após 25 dias de medição variou de 1,508 a $7,850 \text{ kBq.m}^{-3}$ com uma média de $4,679 \text{ kBq.m}^{-3}$, está acima dos níveis de referência para a situação de exposição existente para edifícios residenciais e de uso misto (fator de equilíbrio de 0,4 ocupação de 7.000 horas) ⁽⁵⁾, acima da norma da CNEN ⁽⁴⁾ para o público (residências) e meio ambiente, que é 300 Bq.m^{-3} , “Art. 139. Em residências ou outras áreas com alto fator de ocupação como creches, hospitais e locais de trabalho deve ser adotado o nível de referência para concentração de radônio de 300 Bq.m^{-3} , conforme anexo K e também acima para indivíduos ocupacionalmente expostos em seu artigo § 3º Nos locais de trabalho em que não for possível reduzir as concentrações de radônio a valores inferiores a 1000 Bq.m^{-3} , devem ser aplicados os requisitos relevantes para exposição ocupacional em situação de exposição planejada e IAEA, GSR Part 3 ⁽⁵⁾ e da OMS ⁽⁶⁾ para público e meio ambiente que é de 100 Bq.m^{-3} e trabalhadores ocupacionalmente expostos – IOE que é de 1000 Bq.m^{-3} .

Ressalta-se que as medições foram realizadas em um recipiente selado por 25 dias. Os valores de concentração de radônio dentro dos containers encontrados aqui não correspondem às concentrações em ambientes residenciais, pois estas têm dimensões muito maiores e a relação volume do ambiente e a quantidade de material do qual o radônio está sendo exalado é muito maior do que a relação container & placa de granito do experimento. Os ambientes residenciais também são constantemente ventilados, permitindo assim uma grande renovação de ar.

A taxa de dose variou do mínimo detectável ($0,014 \mu\text{Sv.h}^{-1}$) a $0,35 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ na face polida da amostra voltada para o detector, e do mínimo detectável ($0,014 \mu\text{Sv.h}^{-1}$) a $0,30 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ com a face não polida da amostra voltada para o detector, não houve variação significativa para cima ou para baixo em relação ao polimento. As taxas de dose medidas estão abaixo dos limites recomendados para o público, que é de $0,5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ ⁽⁴⁾.

No caso das rochas ornamentais, a superfície de acabamento é importante, pois além de ser polida com ou sem resina (processo de abrasão com a utilização de pós abrasivos de granulometria sucessivamente fina, com o objetivo de fechar os poros da rocha e gerar uma superfície contínua com brilho, em muitos estudos concluíram que será a estrutura interna assim como a estrutura superficial do material é que determinará a taxa de exalação do gás radônio nas superfícies das rochas, onde a superfície polida e tratada tende a diminuir os poros e fissuras que facilitam a saída do ^{222}Rn .

Os resultados das concentrações elevadas de radônio encontradas foram bem identificados e consolidados nas avaliações relacionadas com os mapas construídos a partir da base de dados do SGB, Figuras 52 a 55 e daqueles elaborados na LaRUC, essas regiões identificadas são propensas a possuírem concentrações de radônio elevadas e corroboram os resultados encontrados e indicam a necessidade de se avaliar essas regiões como um todo, meio ambiente de forma a identificarmos o impacto ambiental naquela região, suas residências (população) e os trabalhadores que atuam nas minerações no processamento industrial (na retirada de blocos de rochas, corte e transporte), estes trabalhos deverão ser realizados utilizando detectores passivos CR39 para medições de longo prazo.

Com essa base de conhecimento teremos um diagnóstico bem próximo da realidade em relação as concentrações de radônio nesta área podendo assim, orientar novos trabalhos a serem desenvolvidos.

Devemos considerar que a rocha “Café Bahia” é amplamente utilizada em vários países, sendo necessário avaliar esses resultados frente à legislação (exportação e comercialização) do produto em cada país, bem como ao clima (temperaturas mais baixas).

Propostas de projetos futuros:

- 1) Dar continuidade no projeto de pesquisa de “Correlação entre Radiação Ambiental e o Gás Radônio com a Incidência de Câncer de Pulmão em Regiões de Alta Exposição à Radiação Natural – Projeto Risco Radônio Brasil em parceria com o SGB e instituição ligadas aos serviços de saúde das cidades (prefeituras). Os estudos ora em andamento estão em sua fase inicial de mapear as regiões brasileiras onde possam haver exposições a concentração de radônio elevada esse estudo pode ser considerado “estudo caso-controle” que é a forma mais adequada para examinar a associação entre o câncer de pulmão e a exposição ao radônio residencial, onde um número pré-determinado de indivíduos que desenvolveram câncer de pulmão são identificados através de dados apresentados pela secretaria de saúde, juntamente com um número pré-determinado de indivíduos controles que não desenvolveram a doença, mas que são representativos da população a partir da qual foram extraídos os casos de câncer de pulmão. Históricos nas residências das cidades estudadas devem ser obtidos para cada indivíduo do projeto ora em andamento, assim como informações detalhadas sobre tabagismo e outros fatores de risco para câncer de pulmão. Para estimar a concentração média de radônio, a qual cada indivíduo do estudo tenha sido exposto ao longo da vida, é necessário que sejam

realizadas medições da concentração de radônio na sua casa atual e, se o indivíduo tiver mudado nas últimas décadas, em outras casas onde tenha vivido. Assim que isso for realizado, as concentrações de radônio podem ser comparadas entre os indivíduos que desenvolveram câncer de pulmão e os indivíduos controles;

- 2) Projeto de avaliação de Impacto Ambiental em especial na Região de Riacho de Santana;
- 3) Dar continuidade ao projeto de estudos em Ambientes de Coleções presentes nas Litotecas (parceria com o SGB);
- 4) Projeto de avaliação da concentração de radônio em ambientes de coleções fósseis da UFRGS e no Museu de Paleontologia Irajá Damiani Pinto da UFRGS;
- 5) Projeto de pesquisas de “Prospecção do Gás Geogênico Radioativo Radônio nos solos das Ilhas Trindade e Martins Vaz”;
- 6) Projetos de pesquisa em diversas regiões do Brasil de forma a se estabelecer a necessidade ou não em se elaborar o mapa de radônio no Brasil;
- 7) Desenvolvimento de metodologia para análise da concentração de radônio em: solos e água;
- 8) Desenvolvimento de projeto de montagem de uma câmara de calibração de radônio na DIRAD/IRD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Metodologia para a Quantificação da Exalação do Gás Radônio em Rochas Ornamentais, Antonio Carlos ARTUR, Daniel Marcos BONOTTO, Paulo Giovany Quadros do AMARAL, Tamar Milca Bortolozzo GALEMBECK, Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista, 2013.
- 2) Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Building Materials used in Italian Dwellings, Serena Righi*, Luigi Bruzzi, Centro Interdipartimentale di Ricerca per le Scienze Ambientali and Dipartimento di Fisica, University of Bologna, via dell'Agricoltura 5, 48100, Ravenna, Italy, 2006.
- 3) Caracterização Radiométrica e de Exalação de Radônio em Rochas Ornamentais Silicáticas, Beneficiadas no Estado do Espírito Santo, Paulo Giovany Quadros do Amaral, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, Rio Claro (SP), 2011.
- 4) Requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação, norma CNEN 3.01 Resolução CNEN 323/24, abril / 2024.
- 5) Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3, GSR Part 3, IAEA, 2016.
- 6) Manual da OMS sobre Radônio em Ambientes Internos, uma Perspectiva de Saúde Pública, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2016.
- 7) Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2023, ABIROCHAS, 2024.
- 8) Mineralização Primária e Supergenicas de Urânio do Nordeste de Goiás e Sudeste do Tocantins: Contexto Geológico, Mineralogia e Implicações Metalogenéticas, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Jessica Bogossian, 2012.
- 9) United Nations Environment Programme - UNEP booklet entitled "Radiation: Effects and Sources", UNSCEAR, 2016.
- 10) Protección del Público contra la Exposición en Espacios Interiores Debida al Radón y otras Fuentes Naturales de Radiación, No SSG-32, IAEA, 2018.
- 11) Radiation Protection of the Public and the Environment, General Safety Guide 8, IAEA, 2018.

- 12) Distribuição da Concentração de Radônio em Residências e outras Construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH, Talita de Oliveira Santos, Belo Horizonte/MG, 2010.
- 13) Avaliação da Concentração do ^{222}Rn nos Ambientes Internos e Externos de Residências do Município de Monte Alegre, PA, Vicente de Paula Melo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Biofísica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.
- 14) Limits of radionuclides in building materials, National Standard of the People's Republic of China, GB6566-2010, date implementation: 01 July 2011.
- 15) Occupational Radiation Protection, General Safety Guide No. GSG-7, IAEA 2018.
- 16) Estudos de Validação da Técnica de Detectores de Estado Sólido de Traços Nucleares para Determinação de Radônio-222 no Ar e Monitoramento em Centros de Educação Infantil de Poços de Caldas-MG, Danila Carrijo da Silva Dias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas/MG, 2017.
- 17) Avaliação da Radioatividade Natural em Mármore e Granitos Comerciais do Estado do Espírito Santo, Reginaldo Pinheiro de Aquino, IPEN, 2015.
- 18) Assessement of Indoor Radon, Thoron and their Progeny in Dwellings of Bareilly City of Northern India Using Track Etch Detectors, Deepak Verna, M.Shakir Khan Department of Applied Physics, Z. H. College of Engineering & Technology, Aligarh Muslim University, Uttar Pradesh, India, 2013.
- 19) A Study of Uranium, Radium, Radon Exhalation Rate and Indoor Radon in the Environs of Some Areas of the Malwa Region, Punjab, 2006.
- 20) Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection, Safety Guide No. RS-G-1.8, IAEA, 2005.
- 21) Comparative Dosimetry of Radon in Mines and Homes, Washington, DC: The National Academies National Research Council 199.
- 22) Padrão de mortalidade em coorte hitórioca de trabalhadores expostos ao radônio em mineração subterrânea de carvão, Paraná, Brasil. PhD Thesis. Escola BNacional de Saúde Pública. Fundação Oswaldo Cruz, Agosto de 2004.
- 23) Measurement of radioactivity in the environment – Air – Part 1 – Radon-222: Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods, ISO/DIS 11665-1, (2019).

- 24) O Setor de Rochas Ornamentais no Brasil, Ccl-0018-00-14 Capítulo do Livro Tecnologia De Rochas Ornamentais, Pesquisa, Lavra e Beneficiamento. Vidal, F.V.; Azevedo, H.C.A.; Castro, N. F. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. ISBN: 987-85– 8261-005-3. p 493 – 526;
- 25) III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, Curso de Rochas Ornamentais para Projetos Arquitetônicos e Urbanísticos e Trabalhos Técnico-Científicos de Interesse do Setor da Construção Civil, Recife/PE, 2002.
- 26) Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert”, Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM), Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP).
- 27) VII Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, Emissão de Radônio em Rochas Ornamentais, Yasmin Gavioli¹, Julio Correia¹, Adriano Caranassios¹, Roberto Ribeiro, Vicente Melo, Engenharia Química, UFRJ, Fortaleza/CE, 2009.
- 28) Natural Radionuclide Distribution in Brazilian Commercial Granites, Radiation, Measurements, Anjos, R. M., Veiga, R. T. Soares, A.M.A. Santos, J.G. Aguiar, M.H.B.O., Frascá, J.A.P. et al, , 2004.
- 29) Radon Testing of Various Countertop Materials Final Report, L.L.Chyi Department of Geology and Environmental Science, The University of Akron, 2008.
- 30) A Indústria Brasileira de Rochas Ornamentais e de Revestimento e a Norma Chinesa sobre Radioatividade em Materiais de Construção um Estudo de Caso, Jacinto Godoy.
- 31) Determination of Radium Concentration and Radon Exhalation Rate in Soil Samples Using CR-39, Abd-Elmoniem A. Elzain, Department of Physics, University of Kassala, Kassala, Sudan, Department of Physics, College of Science & Art, Qassim University, Oklat Al- Skoor, Saudi Arabia, 2015.
- 32) Determination of Radon Concentrations In Some Building Materials Using Passive Technique, HESHAM A. YOUSEF, A. H. EL-FARRASH, A. ABU ELA, & Q. MERZA, Department of Physics, Faculty of Science, Suez University, Suez, Egypt, Department of Physics, Faculty of Science, Mansoura University, Mansoura, Egypt, 2015.
- 33) Calibration technique for a CR-39 detector for soil and water radon exhalation rate measurements, B. A. Almayahi, A. A. Tajuddin, M. S. Jaafar, Akade'miai Kiado', Budapest, Hungary 2014.

- 34) Measurement of radioactivity in the environment – Air – Part 5 - Radon-222: Continuous measurement methods of the activity concentration, ISO/DIS 11665-5, (2020).
- 35) Measurement of radioactivity in the environment – Air – Part 6 - Radon-222: Spot measurement methods of the activity concentration, ISO/DIS 11665-6, 2020.
- 36) Measurement of radioactivity in the environment – Air – Part 7 – Radon-222: Accumulation method for estimation surface exhalation rate, ISO/DIS 11665-7, (2012).
- 37) Measurement of radioactivity in the environment – Air – Part 8 – Radon-222 in buildings: Methodologies for initial and additional investigations in buildings, ISO/DIS 11665-8, (2019).
- 38) Measurement of radioactivity in the environment – Air, Part 2 - Radon-222: Integrated measurement method for determining average potential alpha energy concentration its short-lived decay products, ISO/DIS 11665-2, (2019).
- 39) Measurement of radioactivity in the environment – Air, Part 3 - Radon-222: Spot measurement method of the potential alpha energy concentration of its shot-live decay products, ISO/DIS 11665-3, (2020).
- 40) Measurement of radioactivity in the environment – Air, Part 4 – Radon-222: Integrated measurement methods for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis, ISO/DIS 11665-4, (2021).
- 41) Talita de Oliveira Santos Distribution of Radon Concentration in Residences and other Constructions in the Metropolitan Region of Belo Horizonte – RMBH, Dissertation (master's degree), Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Nuclear Programa de Pós Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares Belo Horizonte/MG, (2010).