



INSTITUTO DE FÍSICA

Universidade Federal Fluminense

Thiago Corrêa Lacerda

A RADIAÇÃO UNDERGROUND

Niterói

2011

Thiago Corrêa Lacerda

A RADIAÇÃO UNDERGROUND

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Física.

Orientador:

Prof. Dr. Roberto Meigikos dos Anjos

Niterói

2011

”Porque *no Senhor Deus* foram criadas todas as coisas nos céus e na terra, as visíveis e as invisíveis, sejam tronos, sejam dominações, sejam principados, sejam potestades; tudo foi criado por ele e para ele. ”

Colossenses 1.16

*Dedico este trabalho à minha mãe,
Sandra Corrêa Lacerda,
e à minha avó, Anízia Maria Xavier.*

Agradecimentos

Cada vez que uma etapa em nossas vidas se encerra a vontade de agradecer àqueles que, de maneiras diversas, contribuíram para a nossa vitória é intensamente desejada e, por isso, não poderia faltar nesse momento. Os sonhos são pensados e realizados com o outro nos apoiando e incentivando. Sem eles, nossas realizações se tornam egocêntricas e frustrantes. Próximas etapas, próximos sonhos virão. É sabendo o quão importantes essas pessoas são em nossas vidas, que nos motivamos a seguir em frente com a certeza de que sempre estarão dispostas a nos ajudar a vencer os novos desafios.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer, em especial, a um ser invisível, incomparável, amigo eternamente fiel e principal responsável por todas as conquistas da minha vida e com quem sempre me regozijo na alegria e refugio na angústia: Ao meu Senhor Deus.

Agradeço também, de forma muito especial, à minha querida mãe Sandra por toda a ajuda incondicional, por tornar os obstáculos físicos, inerentes à minha condição de portador de necessidades especiais, transponíveis, através de uma garra admirável. Por me incentivar incessantemente com suas doces palavras, atitudes e demonstrações constantes de amor e orgulho. Agradeço à minha avó Anízia por me acompanhar e cuidar de mim com muito carinho desde bebê. Ao meu pai Marco por sempre me incentivar a continuar e se preocupar constantemente comigo. Ao meu irmão Rafael por todo o carinho e atenção, mesmo sem às vezes estar perto. Agradeço ainda a todos aqueles da minha família que, mesmo na distância, estavam sempre preocupados comigo e com meus estudos, torcendo sempre pela minha vitória.

Agradeço à minha igreja, Primeira Igreja Batista de Neves, que me viu crescer desde muito cedo e sempre me traz palavras de incentivo e realização pessoal. Agradeço a todos

os amigos que tenho naquela comunidade e ao pastor Valtair Afonso Miranda, reconhecedor das dificuldades presentes neste curso e grande entusiasta.

Agradeço aos meus grandes amigos: Alberto Cid, pela companhia e ajuda incondicional, meu digitador do dia-a-dia e minha mão que muito escreveu para mim desde a época de graduação; Thiago Almeida, sempre presente quando preciso, meu ajudante nas viagens; Cesar Augustus, pela ajuda de sempre, pela paciência abundante e por ter nesse último mês deixado sua casa em dias de folga para digitar textos da dissertação para mim; Jéssica Tavares, pela paciência, conversas, encorajamento e correção dessas muitas folhas como professora de língua portuguesa; Alexandre Rivas, por ter sido meu professor de Física no Ensino Médio, a primeira pessoa que fez com que me identificasse e gostasse de Física, meu primeiro espelho nessa profissão. Obrigado pelo carinho, paciência e amizade de sempre. Agradeço a esses e aos demais amigos pelos momentos de companheirismo e descontração necessários para continuar a caminhada e para se sentir muito vivo fora da Física.

Aos amigos do LARA (Laboratório de Radioecologia), no Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (IF-UFF): Kita Macário, Rodrigo Veiga, Renan Cardoso e Jimena Ayub.

De forma muito especial, agradeço ao amigo Alberto Cid e Cesar Augustus e ao meu irmão Rafael por me ajudarem na digitação e correção do texto, arrumação das figuras e confecção das tabelas, agilizando, assim, meu trabalho nesse momento final do curso.

Agradeço também a todos os professores do Instituto de Física pela formação e ajuda nos momentos de dificuldades. Em especial: Ao meu orientador Roberto Meigikos, que me recebeu de braços abertos no final da minha graduação, quando estava meio perdido. Durante todo o mestrado se mostrou um grande amigo, disposto a ensinar e aprender. Quem confiou sempre no meu trabalho e conseguiu, como poucos no IF-UFF, lidar com a minha deficiência,

sabendo perfeitamente a hora de me ajudar e de chamar minha atenção. Ao professor Jesús Lubían, com quem trabalhei durante quatro anos na iniciação científica e aprendi a pesquisar e, por quem tenho muito carinho e respeito. Ao professor Jorge Martins, um grande amigo, sempre disposto a me ouvir e que muito me ajudou quando cheguei à UFF há seis anos atrás e que, continua presente, apesar da distância. Aos professores Jürgen Stilck e Marco Moriconi, pela boa didática nos cursos ministrados, paciência considerável e competência em ensinar.

Aos colegas que colaboraram na realização dessa experiência. Indo deste o trabalho de campo até a análise e participação na interpretação dos dados. Em especial ao Almy da Silva, Nancy Umisedo e Beth Yoshimura do Laboratório de Dosimeria da Universidade de São Paulo (USP), que permitiram o uso e análise de detectores CR-39 e TLDs. Ao Hugo Velasco, Marcos Rizzotto e Diego Valadares da Universidad Nacional de San Luis, que deram toda a infra-estrutura de campo para que o trabalho fosse realizado. Em especial ainda ao Diego Valladares, que esteve sempre disposto a esclarecer dúvidas teóricas e experimentais, essenciais para o término deste trabalho. Aos guias turísticos das minas La Carolina e Los Cóndores, que sempre estiveram dispostos a ajudar tanto na instalação quanto na preservação dos detectores no interior das minas.

Ao Instituto de Física, à sua Pós-Graduação e ao LARA que me deram toda infraestrutura solicitada para tornar acessível minhas atividades acadêmicas no local.

Aos funcionários da Biblioteca do IF-UFF, onde sempre fui recebido e ajudado com muito carinho e criei fortes vínculos de amizade.

Ao pessoal da limpeza que faz do nosso ambiente de trabalho um lugar mais agradável e organizado.

Finalmente, agradeço a CAPES, a PROPPI-UFF e a Pós-Graduação do IF-UFF pela

ajuda financeira indispensável para a realização deste trabalho.

Sumário

1	Introdução	1
2	Fundamentos Teóricos	10
2.1	A Radiação ao nosso redor	10
2.1.1	Tipos de radiação	11
2.1.2	Fontes de radiação	17
2.2	Séries de decaimento	20
2.3	O Radônio	21
2.3.1	Movimento do radônio nas rochas	23
2.4	A radiação em ambientes fechados	25
2.4.1	Modelo para o comportamento da concentração de radônio	28
2.5	Radônio como traçador geológico	38
2.6	Estimativa da dose	42
2.6.1	Cálculo da dose para radônio	43
2.6.2	Recomendações de segurança	44
2.7	As rochas e suas concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U	46
3	Descrição Geológica e Experimental	49

3.1	As minas e suas características geológicas	50
3.2	Procedimentos Experimentais	54
3.2.1	Medidas <i>in situ</i> e amostragens de rochas	56
3.2.2	Preparação das amostras de rocha	60
3.2.3	Medidas das concentrações de ^{232}Th , ^{238}U e ^{40}K	61
3.2.4	Medidas das concentrações de ^{222}Rn	65
3.2.5	Determinação da taxa de dose gama externa	69
4	Resultados e Discussões	71
4.1	Radioisótopos naturais aplicados à caracterização ambiental	71
4.1.1	As concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U	73
4.1.2	Taxas de dose devido à exposição externa de raios gama	74
4.1.3	As concentrações de ^{222}Rn nas minas	77
4.2	Dose recebida nas minas	93
4.2.1	Dose recebida do radônio	94
4.2.2	Dose gama recebida	96
5	Conclusões	99
	Referências Bibliográficas	103

Lista de Figuras

2.1	<i>A carta dos nuclídeos de forma ilustrativa (Table of Nuclides, 2000).</i>	13
2.2	<i>Demonstração do quanto os três tipos de radiação podem penetrar em certo material.</i>	18
2.3	<i>Série de decaimento do ^{238}U, a partir do ^{226}Ra (UNSCEAR, 1988).</i>	21
2.4	<i>Série de decaimento do ^{232}Th (UNSCEAR, 1988)</i>	22
2.5	<i>Ilustração dos mecanismos utilizado pelo radônio para entrar nas casas a partir do subsolo.</i>	26
2.6	<i>Ilustração do volume de controle diferencial (Socolofsky e Jirka, 2005).</i>	31
2.7	<i>Perfis teóricos da concentração do radônio ao longo de uma mina tubular. A curva (1) representa um fluxo constante, a curva (2) sofre efeito de uma turbulência em X_1, onde há uma diminuição de radônio, e a curva (3) sofre efeito de várias turbulências (Da Silva et al., 2010).</i>	39
2.8	<i>Ilustração esquemática do efeito chaminé em uma mina (Atkinson et al., 1983).</i>	40
2.9	<i>Carta Litológica com as associações de argilomineral a partir da razão Th/K, adaptada de Schlumberger (1986).</i>	48
3.1	<i>Mapa geológico da região de estudo na Argentina (modificado de López de Luchi et al., 2003).</i>	50

3.2	<i>Topografia ilustrativa da mina La Carolina e o diagrama da disposição dos detectores durante as medidas de verão.</i>	53
3.3	<i>Fotos ilustrativas da mina La Carolina e da disposição dos detectores.</i>	54
3.4	<i>Topografia ilustrativa da mina Los Cóndores e o diagrama da disposição dos detectores durante as medidas de verão.</i>	55
3.5	<i>Fotos ilustrativas da mina Los Cóndores. À direita temos a foto do elevador desativado, que proporciona a saída vertical no fundo do seu túnel principal. . . .</i>	56
3.6	<i>Diagrama da disposição dos detectores na mina La Carolina durante as medidas de inverno. O monitor 15 fica na passagem secundária próximo ao 16 e os monitores 12 e 13 ficam na continuação do 11.</i>	58
3.7	<i>Diagrama da disposição dos detectores na mina Los Cóndores durante as medidas de inverno.</i>	59
3.8	<i>Imagens da blindagem de chumbo e do detector de HPGe utilizado no LARA. . . .</i>	62
3.9	<i>Espectro de energia com 24 h de contagem de uma das amostras de rocha analisadas neste trabalho, medida no HPGe.</i>	64
3.10	<i>Monitor NRPB/SSI, câmara de difusão de polipropileno condutor com aproximadamente 5,5 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura, onde é introduzida a película de CR-39.</i>	66
3.11	<i>Ataque químico e a formação de traço: (a) SSNTD; (b) incidência de partículas; (c) traço latente; (d) ataque químico; (e) traço.</i>	68
3.12	<i>Ilustração do dispositivo Geiger-Müller utilizado neste trabalho.</i>	69
4.1	<i>Ilustração dos processos de emanção, migração e exalação do radônio em rochas e sedimentos.</i>	73

4.2	<i>Correlações entre tório e potássio contidas nas amostras de rocha da mina La Carolina e Los Cóndores.</i>	76
4.3	<i>Histogramas experimentais da frequência relativa com a taxa equivalente de dose gama externa nas principais galerias de a mina de ouro La Carolina e b mina de volfrâmio Los Cóndores. As curvas sólidas representam os ajustes Gaussianos. . .</i>	78
4.4	<i>Concentração de radônio versus distância da entrada da mina La Carolina. Os pontos azuis e a linha rosa representam os dados e a aproximação vinda da equação (2.25) para o verão, respectivamente. Analogamente, os pontos verdes e a linha marrom têm a mesma representação para o inverno.</i>	83
4.5	<i>Velocidade de ventilação versus distância da entrada da mina La Carolina. Os pontos azuis são os dados do verão obtidos da equação (4.4) e os pontos verdes são do inverno.</i>	86
4.6	<i>Concentração de radônio versus distância da chaminé da mina Los Cóndores. Os pontos azuis e a linha marrom representam os dados e a aproximação vinda da equação (2.25) em distâncias menores de 225 m e da equação (2.30) em distâncias maiores de 225 m para o verão, respectivamente. Analogamente, os pontos verdes e a linha rosa têm a mesma representação para o inverno. O eixo y do gráfico foi graduado em escala logarítmica para dar proporção das descidas da concentração de radônio e que elas são praticamente iguais no verão e no inverno.</i>	89
4.7	<i>Velocidade de ventilação versus distância do eixo da chaminé da mina Los Cóndores. Os pontos azuis são os dados do verão obtidos da equação (4.4) e os pontos verdes são do inverno. O eixo y do gráfico foi graduado em escala logarítmica para dar proporção das subidas da velocidade de ventilação.</i>	93

Lista de Tabelas

4.1	<i>Valores médios das concentrações de ^{40}K, ^{232}Th e ^{238}U das amostras de rochas da mina La Carolina coletadas próximas aos monitores de radônio. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.2.</i>	74
4.2	<i>Valores médios das concentrações de ^{40}K, ^{232}Th e ^{238}U das amostras de rochas da mina Los Cóndores coletadas próximas aos monitores de radônio. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.4.</i>	75
4.3	<i>Medidas de concentração de radônio da mina La Carolina feitas durante o verão. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.2. . .</i>	82
4.4	<i>Medidas de concentração de radônio da mina La Carolina feitas durante o inverno. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.6. . .</i>	84
4.5	<i>Medidas de concentração de radônio da mina Los Cóndores feitas durante o verão. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.4. . .</i>	90
4.6	<i>Medidas de concentração de radônio da mina Los Cóndores feitas durante o inverno. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.7. Sob alguns monitores não obtivemos resultados de detecção necessários para análise. .</i>	91
4.7	<i>A contribuição do radônio para a dose recebida por exploradores de mina (duas classificações) e por trabalhadores com duas possibilidades de regime de ocupação diária em La Carolina e Los Cóndores.</i>	96

4.8	<i>Medidas de dose gama na mina La Carolina feitas durante o verão com o detector TLD's colocados próximos aos monitores de radônio. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.2.</i>	97
4.9	<i>A contribuição dos raios gama para a dose recebida por exploradores de mina (duas classificações) e por trabalhadores com duas possibilidades de regime de ocupação diária em La Carolina e Los Cóncores.</i>	98

Resumo

Neste trabalho são apresentadas medidas dos níveis de ^{222}Rn em duas antigas minas desativadas, uma de ouro e outra de tungstênio, La Carolina e Los Cóndores, respectivamente. Atualmente essas minas são pontos turísticos e estão localizadas na província de San Luis, Argentina. O objetivo principal deste trabalho foi averiguar a potencialidade do uso desse gás nobre radioativo como traçador ou marcador de processos geológicos relacionados com ambientes subterrâneos. Também foram avaliadas as concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U nas paredes dos túneis das minas e as taxas de dose, devido à exposições naturais das radiações alfa e gama, com os objetivos secundários de se estimarem as principais associações minerais das rochas que compõem as paredes das minas e os possíveis riscos ocupacionais nesse ambiente de trabalho, respectivamente. Para tanto, foram utilizados detectores plásticos de traços nucleares do tipo CR-39, aplicação da técnica de espectrometria gama em amostras rochosas, monitores Geiger-Müller (GM) e dosímetros termoluminescentes (TLD) de CaF_2 e LiF . Este trabalho fez parte de uma colaboração científica internacional entre o Laboratório de Radioecologia da UFF, o Laboratório de Dosimetria da USP e o Grupo de Estudo Ambientais da Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Argentina. Os padrões dos processos de transporte de gás radônio revelaram que La Carolina pode ser interpretada pelo modelo de um gás radioativo confinado em um tubo com apenas uma entrada, seção transversal e velocidade do ar constantes. Los Cóndores, por possuir uma segunda entrada principal, pode ser interpretada pelo modelo de um gás

radioativo confinado em um tubo com duas entradas principais, provocando a existência de um efeito chaminé para a circulação do ar. Contudo, esse modelo também permitiu identificar a presença de uma terceira ligação com o meio externo, identificado como uma fissura geológica presente na mina. Estes resultados nos levaram a constatar o alto grau de potencialidade do uso do ^{222}Rn como traçador geológico. Em relação aos riscos ocupacionais, La Carolina apresentou na estação do verão (época de maior atividade turística das minas) uma concentração média do gás nobre radioativo que excede cerca de três vezes o nível de ação de $1,5 \text{ kBq m}^{-3}$ recomendado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP). Essa alta concentração indica que maiores atenções mitigadoras de riscos ocupacionais devem ser dirigidas a esse local de trabalho.

Abstract

This work presents measurements of ^{222}Rn levels performed in two former mines in the province of San Luis, Argentina: La Carolina gold mine and Los C3ndores tungsten mine, today used for touristic visitation. The main objective of this study was to evaluate the potential use of such radioactive noble gas as tracer or marker for geological processes in underground environments. Concentrations of ^{40}K , ^{232}Th and ^{238}U were also measured in the walls of tunnels inside the mines and dose rates due to natural gamma and alpha radiation exposition were calculated with the secondary objectives of determining the rocks mineral composition and the possible occupational risks in this work environment, respectively. In this sense, we used nuclear trace plastic detectors CR-39, gamma spectrometry of rock samples, Geiger-Muller (GM) monitors and thermoluminescent dosimeters (TLD) of CaF_2 and LiF . This study is part of an international scientific collaboration between the Radioecology Laboratory at UFF, the Dosimetry Laboratory at USP and the Environmental studies group from Universidad Nacional of San Luis (UNSL), Argentina. The patterns of radon gas transportation processes revealed that La Carolina could be interpreted through a model based on a radioactive gas confined into a single entrance tube, with constant cross section and air velocity. Los C3ndores, which has a second main entrance, could be interpreted through a model based on a radioactive gas confined into a two entrance tube, allowing a chimney effect for air circulation. However, the model allowed identifying a third outside connection, which was recognized as a geological fissure present in the mine. The results showed the high potential of using ^{222}Rn as a geological tracer. In what concerns

the occupational hazard, in summer (time of more intense touristic activity in the mine) La Carolina presented a mean concentration of the radioactive noble gas that exceeds in three times the action level of $1,5 \text{ kBq m}^{-3}$ recommended by the International Commission of Radiological Protection (ICRP). This result point to the necessity of more mitigating attention for occupational hazards to be driven to such working place.

Capítulo 1

Introdução

Radiação é um fato da vida e do nosso meio ambiente. Nós vivemos em um mundo onde a radiação está naturalmente presente. A luz e o calor acontecem através de reações nucleares no Sol e são essenciais para nossa existência. Nessas reações, a radiação também está presente. Materiais radioativos estão presentes naturalmente em todo ambiente e o nosso corpo contém radionuclídeos como o ^{14}C , ^{40}K e ^{210}Po . Tudo na Terra está imerso sobre a presença da radiação. Assim, tendo este fenômeno natural como alicerce fundamental deste trabalho, começaremos contando um pouco a história da sua descoberta.

Em janeiro de 1896 era enorme a comoção em todo o mundo com a notícia da descoberta dos raios X. É fácil imaginar o deslumbramento com a novidade, pois esses raios podiam ver os próprios ossos. Era possível, por exemplo, ver os dedos sem os músculos, mas com anéis, ou uma bala que estivesse alojada no corpo. Com isso, a medicina debruçou-se, de imediato, sobre as possibilidades da descoberta (Chassot, 1995).

Em 23 de janeiro, Wilhelm Conrad Röntgen fez seu único pronunciamento público sobre a descoberta e foi aplaudidíssimo. Físicos e estudiosos ligados à medicina começaram a investigar os novos raios. No decorrer do ano de 1896, já havia mais de mil trabalhos

publicados sobre o assunto, mas, por pelo menos 16 anos, não houve dados convincentes para se explicar a natureza dos raios X. Por fim, os trabalhos de Max von Laue e de Friedrich e Knipping esclareceram que os raios misteriosos eram resultado da colisão de raios catódicos (elétrons) contra os elétrons do cátodo (Chassot, 1995).

A história da radioatividade começa com a construção do tubo de raios catódicos e a descoberta dos raios X. Nos anos seguintes à divulgação da descoberta dos raios catódicos, muitos cientistas reproduziram as experiências de raios X realizadas por Joseph John Thomson (1856-1950), como acontecia normalmente quando se descobria algo de novo na época. Porém, o estudo da radiação só se torna algo concreto quando, em 20 de janeiro de 1896, Henri Poincaré fez um relatório sobre os raios X para a Academia Francesa de Ciências. Além de sua explicação sobre o novo fenômeno, estavam algumas observações referentes à fosforescências, as quais interessaram a Henri Becquerel, filho de Alexandre Becquerel, que havia estudado extensivamente os materiais fosforescentes (Chassot, 1995).

Becquerel, ao investigar a possibilidade de todos os corpos fosforescentes emitirem raios similares, acabou apresentando a conclusão equivocada à academia de que substâncias fosforescentes produziam raios penetrantes, como os raios X. Com essa ideia, iniciou suas investigações utilizando um composto à base de Urânio. Becquerel, então, colocava o composto sobre uma chapa fotográfica, o expunha ao Sol por um período e, então, revelava a chapa. Assim, constatou que esse material afetava a chapa de forma similar aos raios X. Logo em seguida, o cientista revelou uma chapa fotográfica que não fora exposta ao Sol, com a expectativa de obter uma imagem fraca e, para sua surpresa, a imagem foi clara e forte. Isso significava que o Urânio emitia radiação sem a necessidade de uma fonte de energia do tipo do Sol. Becquerel, então, havia descoberto a Radioatividade, a espontânea emissão de radiação vinda de um material (Chassot, 1995).

Depois, Becquerel demonstrou que a radiação emitida pelo Urânio compartilhava certas características comuns aos raios X. Porém, não era como os raios X, pois podia ser desviada por um campo magnético e, por essa razão, deveria ser composta por partículas carregadas. Por sua descoberta, ele foi laureado, em 1903, com um Prêmio Nobel em Física (Chung, 2001).

Após a divulgação das estranhas emissões de radiação vindas de alguns materiais, houve um pequeno período de grande interesse por esse fenômeno e um intervalo de cinco anos sem maiores estudos. Até que, ao iniciar sua pesquisa no doutorado, Marie Sklodowska-Curie interessou-se pelo fenômeno observado por Becquerel. Marie e seu marido, Pierre, souberam dessa estranha emanção e que ela ionizava o ar à volta do material. Assim, através de seus trabalhos, Marie e Pierre descobriram e divulgaram a radioatividade de determinados materiais. Com essa descoberta, muitas pessoas se interessaram pelas pesquisas nesse campo. Dentre essas pessoas, estava Ernest Rutherford, pupilo de Thomson (Chassot, 1995).

O casal Marie e Pierre mais Becquerel foram os grandes colaboradores iniciais do que chamamos hoje de Física das Radiações, quem fez descobertas heroicas, pois não se conhecia a ideia de núcleo, visto que até então vigorava no meio científico o modelo atômico do "pudim de passas" de Thomson, o qual continha apenas elétrons e uma esfera perfeita e maciça de massa. A Física Nuclear só nascerá realmente em 1911 com a experiência de Rutherford, a qual envolvia lâminas de ouro e partículas alfa e impulsionou o deslanche do estudo sobre a radiação (Chung, 2001).

Chegamos ao século XXI dizendo que a radiação é a energia em trânsito, sendo da mesma forma que o calor é a energia térmica em trânsito e o vento, o ar em movimento, ocasionada pela desintegração nuclear ou decaimento nuclear de um núcleo não estável. Coloquialmente, dizemos que radiação é uma forma de energia emitida por uma fonte e transmitida através

do vácuo, do ar e dos meios materiais (Okuno e Yoshimura, 2010).

Os principais processos radioativos de decaimentos são: decaimento alfa (emissão de partícula alfa), decaimento beta (emissão de partícula beta) e decaimento gama (emissão de radiação eletromagnética ou raio gama). Na nossa pesquisa focaremos os decaimentos alfa e gama.

Por último, podemos nos questionar se a radiação é onda ou partículas. Durante vários séculos, houve muitas discussões sobre a natureza da luz entre os adeptos da teoria corpuscular e da ondulatória. Até que Max Karl Ernst Ludwig Planck (em 1901) e Albert Einstein (em 1905) trouxeram uma teoria mais moderna pela formulação dos quantas. Segundo essa teoria, a radiação eletromagnética (a luz) se propaga em formas de pequenos pulsos de energia, os fótons, podendo interagir, dependendo da situação, como onda ou partícula, dando origem, assim, a ideia da dualidade onda-partícula para a luz. Logo depois, em 1924, Louis de Broglie expande a dualidade para todas as partículas, permitindo, dessa forma, que usemos o termo radiação tanto para o caso de partículas beta e alfa quanto para o caso de ondas eletromagnéticas (raios gama). O que deixa, na atualidade, a importância do fenômeno no fato de ele interagir com os corpos, inclusive o homem, depositando neles sua energia (Okuno e Yoshimura, 2010).

A desconfiança de que a interação das partículas emitidas nos decaimentos causa doenças graves como o câncer, por exemplo, impulsiona a produção acelerada de mais pesquisas sobre o assunto. Assim, descobrimos que os tipos de radiação que mais influenciam essas doenças são a radiação gama e a radiação alfa, que ocorre naturalmente através da série de decaimento de ^{235}U , ^{238}U e ^{232}Th e do decaimento gama de ^{40}K , com destaque no caso da radiação alfa para o elemento ^{222}Rn presente na série de decaimento do ^{238}U . Além disso, as minas que iremos estudar são ambientes fechados, os quais propiciam o aumento do acúmulo

dos dois tipos de radiação citados. A soma desses dois motivos destaca a importância das radiações alfa e gama no nosso texto, logo, reservaremos os próximos parágrafos para discutir brevemente alguns efeitos contemplados na literatura trazidos pela radiação gama e pela radiação alfa vinda do radônio.

Em primeiro lugar, é importante ressaltar que há dois conceitos importantes relacionados com o tema, que nem sempre são bem esclarecidos: interação e radiação ionizante. O primeiro, interação, é o termo que representa na Física, a ação de uma força e o efeito causado por essa ação. Por exemplo, duas partículas carregadas em repouso interagem pela ação da força Coulombiana. Radiação ionizante, por sua vez, é qualquer radiação, com ou sem massa de repouso, que pode remover elétrons de átomos e moléculas da matéria (Okuno e Yoshimura, 2010).

Isótopos de radônio, oriundos do decaimento do ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U (esse último com menos contribuição), são um gás radioativo que emana das rochas e solos e tende a se concentrar em espaços fechados, como minas subterrâneas ou casas. A infiltração do gás pelo solo representa a mais importante fonte de radônio nas residências. Outras fontes, como os materiais de construção e a água extraída de poços, são de menor relevância na maioria das circunstâncias. Assim, o radônio é o maior contribuidor para a radiação ionizante que a população geralmente recebe (WHO, 2009).

Estudos recentes envolvendo radônio em ambiente fechado e câncer de pulmão na Europa, América do Norte e Ásia mostram forte evidência de que o gás causa um substancial número de casos desse tipo de câncer. Estimativas atuais da proporção de câncer pulmonar atribuído ao radônio estão na faixa de 3 a 14%. As análises indicam que o risco de câncer pulmonar aumenta proporcionalmente ao crescimento da exposição ao radônio. Assim, esse gás é considerado o segundo maior causador de câncer pulmonar depois do cigarro, apesar das

pesquisas dizerem ser necessária uma alta concentração para que cause a doença. Por outro lado, quando se associa o cigarro e o gás, o problema se torna ainda mais grave (WHO, 2009).

Medidas de radônio são relativamente simples de adquirir e essenciais para observar a sua concentração em minas e casas. Essas concentrações não variam substancialmente somente com as estações do ano, mas também de dia a dia e até de hora em hora. Devido à essas flutuações, é necessário, para estimar a média anual de radônio no ar do ambiente fechado, fazer medidas durante, no mínimo, três meses. Por outro lado, o grande problema do radônio, como podemos perceber, não é apenas medir sua concentração, mas, também, estimar a quantidade que foi inalada, pois, ao ser emanado, o gás continua instável e, conseqüentemente, vai decair em outros produtos (^{218}Po e ^{214}Po), que também emitem partículas alfa e podem interagir com tecidos biológicos do pulmão deixando o DNA doente. Desse modo, o câncer é geralmente oriundo da ocorrência de, pelo menos, uma mutação no DNA, seguido da multiplicação das células. Logo, até uma simples partícula alfa pode causar um grande dano genético à célula. Isso permite a possibilidade de que um problema no DNA possa ser causado por qualquer nível de radônio, apesar de não existir comprovação científica para esta hipótese (WHO, 2009).

Outro aspecto que tem preocupado os cientistas é o efeito do radônio em minas. O primeiro indício registrado do seu efeito maléfico em ambientes subterrâneos foi proposto por Epicuro, filósofo grego (nascido em 341 aC, em Samos, e morreu em 270 aC, em Atenas), cujas obras sobreviveram apenas parcialmente para os dias atuais. A parte principal de suas obras é conhecida por uma série de papiros carbonizados, encontrados em uma biblioteca de Herculano, porém deteriorados pela erupção de 79 dC. Seus relatos já tratavam da alta mortalidade dos trabalhadores em ambientes fechados, como as minas. Contudo, ele

ainda não podia imaginar que a causa real era devido à radioatividade originária do radônio (Cigna, 2005). Outras notícias estão na História das civilizações, mas, uma mais recente e com fortes evidências do aumento de mortalidade por doenças respiratórias que afetaram certo grupo de mineradores, aconteceu na Europa Central pouco antes do século XVI, onde um grande número de jovens trabalhadores de minas morreu. Porém, apenas no século XIX, elas passaram a ser compreendidas como câncer. O radônio foi o primeiro suspeito a causar câncer pulmonar nos mineradores no século XX, fato confirmado com dados científicos em 1950 (WHO, 2009).

Sobre a radiação gama, podemos dizer que ela ganha espaço nas pesquisas de saúde ambiental, através da descoberta de que exposição à fontes naturais de radiação é frequentemente influenciada pelas atividades humanas. Materiais de construção, por exemplo, podem causar altos índices de radiação gama, dependendo da geometria da construção e dos constituintes do material, provocando um incremento de dose em grupos populacionais que, em virtude de seus hábitos, estejam expostos à tais fontes de radiação. Situações desse tipo têm merecido, por parte da comunidade científica internacional, estudos mais detalhados, que antes eram, prioritariamente, dirigidos aos radionuclídeos artificiais produzidos pela indústria nuclear.

Os efeitos nocivos do radônio não serão o único enfoque deste texto, pois pesquisas recentes têm mostrado que a concentração do gás radioativo pode ser um excelente traçador de fissuras e crateras em ambiente subterrâneo e altamente variante com a estação do ano e, em alguns casos, com o dia e até a hora do dia. Fatos facilmente explicados pelo estado gasoso do radônio na temperatura ambiente, tendo assim, muita dependência da variação da velocidade e da quantidade de ar presente na mina, os quais, como veremos, têm relação direta com a temperatura externa e o aparecimento de fissuras e crateras que se estendem

ao espaço externo.

Utilizando os dois conceitos de radiação, radiação alfa (através do radônio) e radiação gama (através do decaimento do ^{40}K e das séries do ^{238}U e do ^{235}Th), propomos investigar o processo de transporte de radônio, as taxas de dose alfa e gama recebidas e os seus perigos para a saúde em duas minas abandonadas na Província de San Luís, Argentina. Essas minas foram escolhidas por apresentarem diferentes configurações físicas em suas estruturas, características que podem afetar os padrões de fluxo de ar e as concentrações de radônio. A mina de ouro La Carolina é, atualmente, um sistema de sem saída de ar que corresponde a uma escavação horizontal para o lado de uma montanha, com apenas um ducto principal. A mina de tungstênio Los Condores é também uma escavação horizontal para o lado de uma montanha, mas possui uma saída vertical (resultado de um antigo elevador que transportava o minério para cima, abertura que permite a produção do efeito chaminé) no final do ducto principal.

Resumidamente, o radônio, o foco da nossa pesquisa, é um gás inodoro e transparente, em que sua radioatividade se apresenta perigosa á saúde e útil para estudos geológicos. Ambos fatores tornam-se marcantes pela considerável concentração do radônio nas minas ou cavernas. É exatamente nesse intuito de duplo sentido, intitulamos a principal radiação destes locais de underground, uma palavra com significado de subterrâneo na língua inglesa, caracterizando a ideia do local e dos fenômenos geodinâmicos que o radônio nos assinala, mas ela é trazida para o português por estrangeirismo com o sentido de um agente invasor de um certo espaço, o que nos permite a associação com um elemento perigoso que entra sem pedir licença. Com isso, o duplo significado semântico da palavra underground faz uma boa alusão dos dois encaminhamentos que queremos fornecer ao texto.

Com esses objetivos em pauta, o presente trabalho foi dividido e elaborado sobre os

seguintes capítulos: No capítulo 2 iremos discutir a teoria envolvida no nosso estudo, tentando começar desde a ideia mais básica e aprofundar os conceitos de forma gradativa; No capítulo 3 vamos expor a descrição experimental envolvida na aquisição dos dados, apresentando as características geológicas, a localização das minas e a exposição da instrumentalização utilizada na aquisição dos dados. No capítulo 4 iremos discutir os resultados obtidos e o significado de cada um dentro das perspectivas ambientais e de saúde. Por fim, no capítulo 5 teceremos nossas conclusões à respeito do tema.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Este capítulo é destinado à descrição dos principais conceitos e modelos utilizados para a interpretação de nossos resultados experimentais. Com isso, discutiremos os fundamentos da interação da radiação natural com a matéria, a forma pela qual alguns radioisótopos podem ser usados como traçadores de certos fenômenos ambientais e alguns modelos utilizados na descrição dos processos de transporte de radônio em ambientes subterrâneos e na estimativas do dano à saúde de pessoas que frequêntam estes locais.

2.1 A Radiação ao nosso redor

No início do século XX, com o avanço da Física Nuclear, ganha força a idéia de radiação. A princípio (e talvez ainda perdurando aos nossos dias!) havia uma concepção de repulsa e medo diante deste tema, mas, com o passar de novos estudos, chegamos à conclusão de que vivemos imersos em diversas fontes de radiação desde os primórdios e estaremos com a radiação sempre. Nós estamos expostos eternamente a fontes de radiação natural, na qual podemos citar a radiação cósmica vinda do espaço, a radiação terrestre vinda de elementos

radioativos existentes na crosta da Terra, a radiação interna resultante da inalação e ingestão de radionuclídeos existentes no ar e na dieta alimentar, respectivamente. Também estamos expostos às fontes de radiação artificial, sendo os raios X a mais comum, provenientes dos diagnósticos médicos.

Com a solidez da atual Física das Radiações, houve necessidade classificar a radiação de acordo com a sua principal característica e o seu fator preocupante de destaque, os efeitos que a mesma produz na matéria, assim, dividimos a radiação em ionizante e não-ionizante. A ionizante inclui raios cósmicos, raios X e a radiação vinda dos radionuclídeos dos materiais naturais. Esse tipo é capaz de modificar a estrutura atômica, por exemplo, arrancar elétrons da eletrosfera. A não-ionizante inclui a luz ultravioleta, calor radiante, ondas de rádio e micro-ondas. Em nosso trabalho serão analisadas algumas fontes naturais de radiação ionizante e a relação entre suas taxas de exposição em um meio ambiente e os efeitos que podem causar à saúde dos seres humanos. Em paralelo, analisaremos como estas fontes podem ser usadas como traçadores de processos ambientais.

2.1.1 Tipos de radiação

Em processos radioativos naturais, partículas e radiação eletromagnética são emitidas dos núcleos denominados instáveis. As formas mais comuns dessas emissões radioativas espontâneas são tradicionalmente classificadas como radiação alfa (α), beta (β) e gama (γ). Há também a radiação proveniente de reações nucleares, tais como a emissão de prótons, nêutrons e aglomerados, processos de fusão e fissão de núcleos, e outros. Contudo, não trataremos destes processos, uma vez que não produzem valores de doses significativas para o homem.

Para começar partiremos de uma análise básica e superficial. Um elemento químico é

caracterizado pelo número de prótons no núcleo e pode existir na natureza em forma de vários nuclídeos (ou isótopos) com diferentes números de nêutrons. Um bom exemplo de isótopos de um átomo é o hidrogênio, aparecendo no meio ambiente como: ^1H (hidrogênio comum com um próton), ^2H (deutério, com um próton e um nêutron) e ^3H (trítio, com um próton e dois nêutrons).

Embora muitos nuclídeos sejam estáveis, há na natureza milhares de átomos instáveis. A estabilidade é determinada principalmente pelo balanço entre o número de nêutrons e prótons contidos em um núcleo, sendo a maioria com um pouco mais de nêutrons do que prótons. Como resultado pela busca intrínseca pela estabilidade, o núcleo com mais nêutrons tende a ser transformado por si próprio através da conversão de nêutrons em prótons. A este processo chamamos de decaimento beta, o qual nesse contexto possui como produto a emissão de um elétron carregado negativamente originário do núcleo, denominado partícula beta menos. Invertendo a situação, um núcleo com mais prótons do que nêutrons converte prótons em nêutrons por uma forma diferente de decaimento beta, o qual consiste na emissão de um elétron carregado positivamente, chamado de partícula beta mais ou pósitron¹.

Outra fonte de instabilidade nuclear são aqueles fenômenos que frequentemente levam o núcleo a um excesso de energia, essa precisa ser liberada, o que é feito através dos raios gama (fótons de alta energia sem carga e sem massa capazes de carregar parcelas discretas de energia) ou/e emissão de vários tipos de partículas.

Pode-se entender também um decaimento radioativo através da energia de ligação², a partir dessa quantidade dizemos que um núcleo vai mudar para outro se for vantajoso

¹O pósitron também é conhecido como a antipartícula do elétron.

²Energia de ligação é o que mantém os componentes de um núcleo juntos e é calculada pela diferença entre a soma das energias de repouso dos componentes do núcleo e a energia de repouso da estrutura nuclear como um todo.

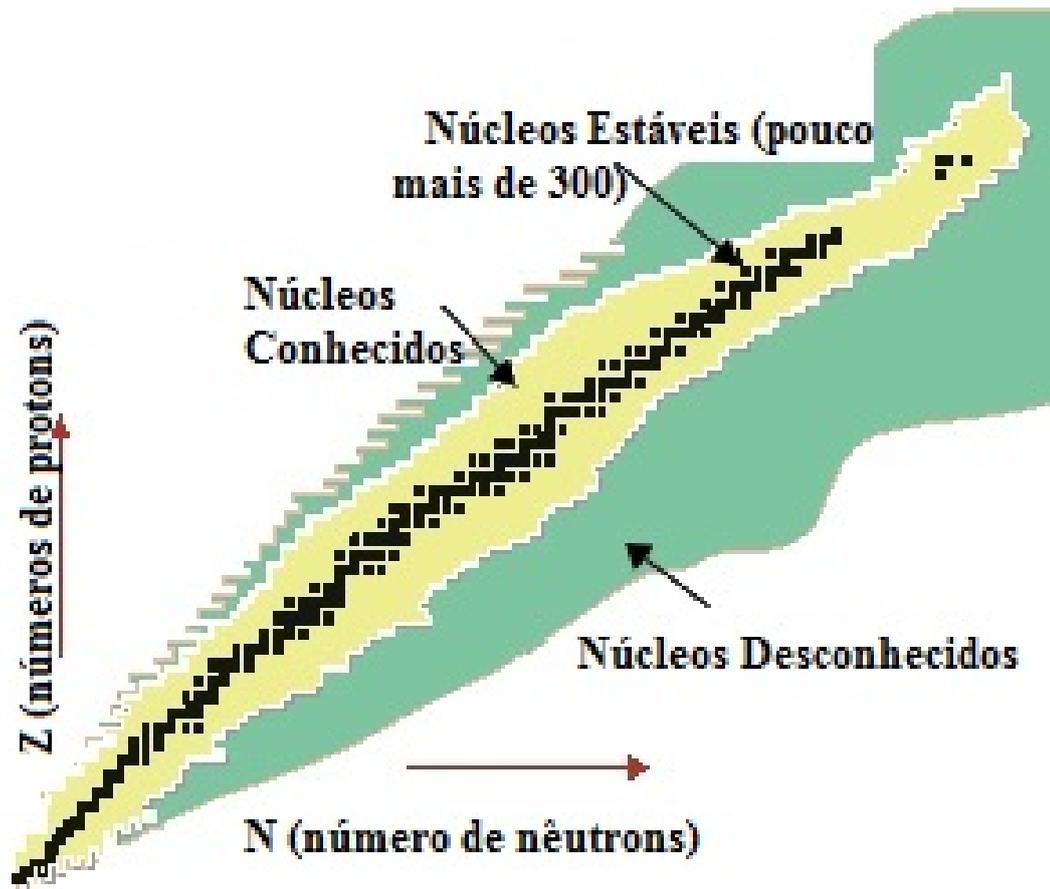


Figura 2.1: A carta dos nuclídeos de forma ilustrativa (*Table of Nuclides, 2000*).

energéticamente o decaimento. A diferença na energia de ligação (comparando o estado antes e o depois) determina quais decaimentos são energeticamente possíveis e quais não são. Uma maneira fácil de ver essa idéia é pela carta de nuclídeos, ilustrada na Figura 2.1. Ela ilustra uma trama de núcleos como função do número de prótons (Z) e do número de nêutrons (N). Todos os núcleos estáveis e radioativos conhecidos, tanto naturais quanto artificiais, são indicados nesta figura. De forma geral, como já dissemos, conforme o número de nêutrons se afasta do número de prótons mais instável o núcleo se torna.

Em alguns casos, principalmente quando o núcleo é pesado, ao invés de ocorrer a emissão de partículas beta, temos a liberação de partículas alfa, constituídas por dois prótons e dois elétrons aglutinados. A estrutura da partícula alfa é uma configuração muito estável e

idêntica ao núcleo do gás nobre de hélio, por isso também nós referimos ao fenômeno como uma emissão de um núcleo de ${}^4\text{He}$. Os decaimentos alfa ocorrem mais frequentemente em núcleos possuidores de um número muito grande de nêutrons em relação ao de prótons, isto é, são núcleos com tendência a se afastar da reta de estabilidade visível na Figura 2.1. Núcleos, que são mais massivos, levam numerosos decaimentos por este método para se tornar estáveis.

Em resumo, a transformação espontânea dos núcleos é chamada de radioatividade. O excesso de energia e as partículas liberadas caracterizam a radiação ionizante. Já os núcleos instáveis, denominamos radionuclídeos.

Os processos de decaimento nuclear devem satisfazer várias leis de conservação, significando que o valor inicial de uma dada quantidade deve permanecer inalterado após o decaimento do núcleo. Como exemplo de quantidades conservadas podem ser citados: a energia total (incluindo a massa), a carga elétrica, o momento linear e o momento angular. Contudo, a conservação das quantidades não é a única questão matemática importante, pois, esses processos são fenômenos estatísticos, cuja probabilidade de um dado núcleo decair em um determinado período de tempo independe da idade do núcleo ou como ele foi criado, sim da quantidade de energia de ligação no núcleo. Isto é, quanto menor a quantidade de energia, maior a probabilidade e menor a estabilidade nuclear.

Embora o tempo de vida exato de um dado núcleo não possa ser previsto, a vida média de uma amostra contendo muitos núcleos radioativos pode ser prevista e medida. Uma maneira conveniente de determinar o tempo de vida de um núcleo é medir quanto tempo leva para que metade dos núcleos em uma amostra decaia. Este intervalo de tempo é chamado de meia-vida, $T_{\frac{1}{2}}$. Conseqüentemente, dos núcleos originais que não decaíram, metade irá decair se esperarmos mais uma meia-vida e teremos um quarto da amostra original.

Outra quantidade essencial é a taxa de transformações espontâneas (decaimentos) ocorridas, a qual é determinada pela atividade da fonte. A unidade mais usada para esta quantidade é o becquerel, representado pelo símbolo Bq, em que 1 Bq é igual uma transformação por segundo.

Para finalizar, é importante entender os aspectos fenomenológicos identificadores dos principais agentes que carregam a radiação (IAEA, 2004):

Partícula Alfa (α) : É uma partícula carregada positivamente, relativamente pesada com curto alcance no ar (1 a 2 cm), podendo ser completamente absorvida por uma folha de papel ou pela pele. O grande problema da partícula alfa é quando ela entra no corpo, através da inalação ou ingestão. Devido ao fato de ser pesada e carregada, pode interagir facilmente com as células, causando danos aos tecidos do estômago e do pulmão. No decaimento alfa do núcleo original (ou pai), o número atômico muda significativamente, logo, o produto (ou filho) é um elemento diferente, muito provavelmente possuirá diferentes propriedades químicas. Quanto à energia de ligação liberada, dizemos que aparece como energia cinética da partícula alfa e do núcleo filho, sendo esta energia compartilhada entre as duas partes e indo uma quantidade maior para alfa por possuir uma massa menor. Sobre os momentos posteriores ao decaimento, afirmamos que devam ser opostos para manter a conservação e apresentem como resultado um recuo da partícula alfa emitida e do núcleo filho.

Partícula beta (β) : É uma partícula muito menor se comparado à alfa e possui um maior poder de penetração nos tecidos ou materiais. Ela pode ser completamente absorvida por filme plástico, um copo ou um metal, não podendo, normalmente, penetrar além da camada superficial da pele. Contudo, uma elevada exposição às partículas beta

com alta energia pode causar queimaduras na pele, podendo ser também perigoso se inalada ou ingerida. Os léptons³ emitidos no decaimento beta não existiam no núcleo antes do fenômeno radioativo e são criados no momento do decaimento radioativo. Para melhor entendimento, é válido exemplificar: Um próton isolado (por exemplo, um núcleo de hidrogênio), com ou sem um elétron, não decai. No entanto, dentro de um núcleo o processo de decaimento beta pode transformar um próton em um nêutron. Um nêutron isolado é instável, decaindo com uma meia-vida de 10,5 minutos. Por sua vez, um nêutron em um núcleo irá decair se o núcleo filho for mais estável. Decaimento de próton, decaimento de nêutrons e captura eletrônica são as três maneiras pelas quais os prótons podem ser transformados em nêutrons ou vice-versa. Em cada decaimento há uma mudança no número atômico, de modo que os átomos pai e filho são elementos diferentes. Nos três processos, o número de nucleons (A) permanece o mesmo, enquanto o número de prótons (Z) e de nêutrons (N), aumenta ou diminui de uma unidade. No decaimento beta, a liberação da energia de ligação aparece como energia de repouso da criação do neutrino e energia cinética da partícula beta e do núcleo filho.

Raio gama (γ) : Causador de ionização de átomos quando ultrapassa a matéria, principalmente devido a sua interação com os elétrons. O raio gama é muito penetrante e só uma espessura significativa de material denso é capaz de freá-lo. Com isso, um elemento emissor de radiação gama pode fornecer uma dose interna significativa, mesmo

³Lépton é uma partícula elementar que só existe fora do átomo e um constituinte fundamental da matéria.

O mais conhecido de todos os léptons é o elétron. Há duas classes principais de léptons: léptons carregados e léptons neutros (mais conhecido como neutrinos). Léptons carregados podem combinar-se com outras partículas para formar várias partículas compostas, tais como átomos e positrônio, enquanto os neutrinos raramente interagem com qualquer coisa e são, conseqüentemente, raramente observados.

sem ser inalado ou ingerido. A radiação gama leva um núcleo instável a um estado de energia mais baixa pela emissão de radiação eletromagnética (fótons). Assim, o número de prótons (e nêutrons) no núcleo não se altera neste processo e os átomos pai e filho são os mesmos elementos químicos, o que não leva o núcleo para outra posição na carta de nuclídeos, sendo apenas uma forma de liberação de energia, devido algum fenômeno físico que o deixou excitado, por exemplo, aquecimento térmico, decaimento alfa e decaimento beta. No decaimento gama de um núcleo, o fóton emitido e o núcleo filho, o qual sofre um recuo, possuem uma energia bem definida depois do decaimento.

Com respeito ao ser vivo, a mais importante propriedade da radiação é sua capacidade em penetrar nos materiais. A profundidade da penetração para um tipo particular de radiação aumenta com sua energia. Assim, para um dado valor de energia, a partícula beta penetrará mais que a partícula alfa. No entanto, a partícula alfa é mais perigosa quando atinge o interior do organismo, uma vez que carrega maior massa e carga. Já a radiação gama e os raios X têm seu grau de penetração dependente da natureza das interações que eles produzirão nos tecidos. Veja a capacidade de penetração de cada tipo de radiação ilustrada na Figura 2.2.

Uma vez que o foco desta pesquisa é a radiação natural produzida em minas e cavernas e que os elementos a ser analisados são o ^{238}U , o ^{232}Th , o ^{222}Rn e o ^{40}K , os estudos serão concentrados nos modos de decaimento gama e alfa.

2.1.2 Fontes de radiação

A radiação nos atinge pelos mais variados caminhos, mas podemos resumi-los em duas categorias: os processos naturais como o decaimento do urânio, tório e potássio existente em rochas e sedimentos; e os processos artificiais como os raios-X (usado em exames médicos) e o

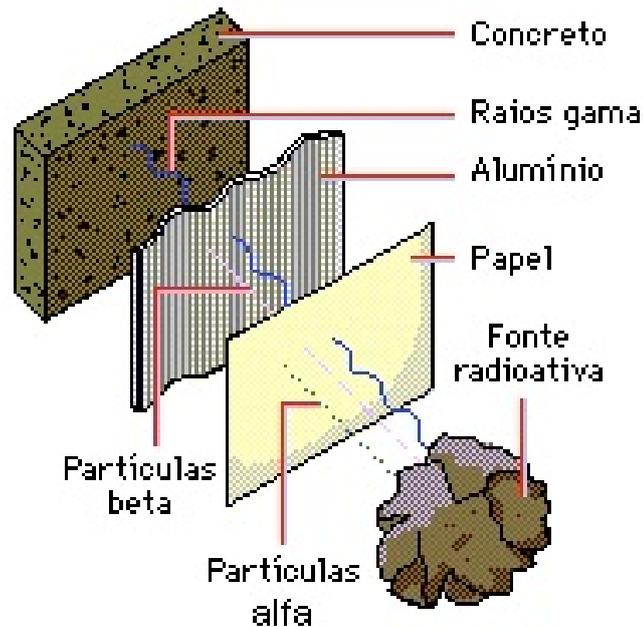


Figura 2.2: *Demonstração do quanto os três tipos de radiação podem penetrar em certo material.*

fallout proveniente de testes de armas nucleares e emergências nucleares. Porém, o resultado de recentes pesquisas feitas pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica, doravante UNSCEAR, publicado em 2000, mostrou que a população do mundo recebe uma dose média anual total de aproximadamente 2,8 mSv. Sendo mais de 85% provenientes de fontes naturais (metade desse valor é proveniente do radônio e seus filhos de decaimento), 14% do total vem dos procedimentos médicos e apenas 1% vem de outros tipos de radiação artificial (IAEA, 2004). O que nos mostra a importância de se conhecer os efeitos e as causas de possíveis aumentos quando o assunto é radiação natural.

As minas são ambientes longes de fontes artificiais, então, só precisamos nos preocupar com a radiação natural. Essa radiação está presente na comida, na bebida e no ar, e todos nós estamos expostos a ela, sendo, inclusive, a única fonte radioativa para a maioria das pessoas. Em geral, podemos considerá-la insignificante e não oferecendo alarmantes riscos

a saúde, salvo poucas exceções. Visto isso, passaremos a abordar os principais tipos de radiação natural, subdividindo-os em fontes externas (radiação cósmica e gama terrestre) e internas (via inalação e via ingestão).

Sucintamente, a radiação cósmica é resultante de reações espaciais que geram partículas altamente energéticas que bombardeiam a Terra e, ao chegar à atmosfera, produzem vários radionuclídeos como prótons, nêutrons, múons, elétrons, fótons, pósitrons, ^{14}C , ^7H e ^7Be , os quais chegam a nós quase sem energia e, por isso, não apresentam riscos consideráveis. Para termos noção da pouca contribuição desse processo, dados do UNSCEAR para a dose de radiação cósmica atestam que, em lugares com altas concentrações dessa radiação, ela chega, em média, ao valor baixíssimo de 0,4 mSv.

Já a radiação terrestre, que pode ter como consequência a inalação e a ingestão, quando em grandes quantidades, causa importantes problemas a saúde do ser humano e é sobre essa radiação que colocaremos nossa atenção. Assim, a radiação terrestre tem sido estudada por radionuclídeos liberados pelas rochas e pelo solo. Dependendo de seu tipo e origem, certas rochas podem conter concentrações significativas de radionuclídeos naturais, especialmente radionuclídeos primordiais, que, em virtude de suas meias-vidas da ordem de grandeza da idade estimada do Universo, estão presentes desde a formação da Terra. Estes incluem ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U e ^{238}U (Maduar, 2000).

O urânio, um dos principais responsáveis pela radiação natural, é espalhado entre as rochas e o solo em baixas concentrações. O ^{238}U é um radionuclídeo com uma longa série de decaimentos que só vai terminar com o núcleo estável do ^{206}Pb . Outro elemento importante é o tório que também é espalhado na terra e o mais importante para a radiação será o ^{232}Th , sendo também o precursor de outra série de decaimento. Por último, temos o potássio, muito mais abundante que o tório e o urânio e com o importante radionuclídeo ^{40}K (IAEA, 2004).

Vale lembrar também que há outros radionuclídeos presentes nas séries do urânio e do tório com importância radiológica como o ^{210}Pb e o ^{210}Po que estão livres no ar, na comida e na água, e também são fontes irradiadoras internas dos organismos. Igualmente, faz parte da nossa dieta cotidiana o ^{40}K , que é a principal fonte de radiação gama interna. Dessa forma, podemos afirmar que estamos imersos na radiação e, por isso, buscamos aprender a viver cada vez melhor com ela.

2.2 Séries de decaimento

Como vimos, a radiação, de forma ampla, acontece quando um elemento instável decai, tendo como resultado uma partícula e/ou a liberação de energia por raios gama e um novo elemento que pode ou não ser estável. Alguns como o ^{40}K só apresentam um decaimento bem definido com a energia gama de 1460 keV. Em outros, a busca da estabilidade gera a chamada série de decaimento de um radionuclídeo, que é o ocorrido com dois elementos instáveis essenciais para esse texto, o ^{238}U e o ^{232}Th . Então, descreveremos as suas séries de decaimento brevemente.

Dentro de cada série, há nuclídeos de meia-vida longa em relação à dos subsequentes, além do primeiro da série. Isto dá origem às sub-séries. Com isso, a série do ^{238}U divide-se em: sub-série do ^{238}U , constituída pelo ^{238}U , ^{234}Th , ^{234}Pa e ^{234}U ; sub-série do ^{226}Ra , constituída pelo ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po ; e sub-série do ^{210}Pb , constituída pelo ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po e ^{206}Pb , sendo esse último estável, encerrando a série.

Dentre essas sub-séries, a única que apresenta emissões gama com probabilidades de emissão superiores a 1% é a sub-série do ^{226}Ra . A Figura 2.3 apresenta a cadeia de decaimento dos nuclídeos da série do ^{238}U , a partir do ^{226}Ra , pois é a partir desse elemento que a série

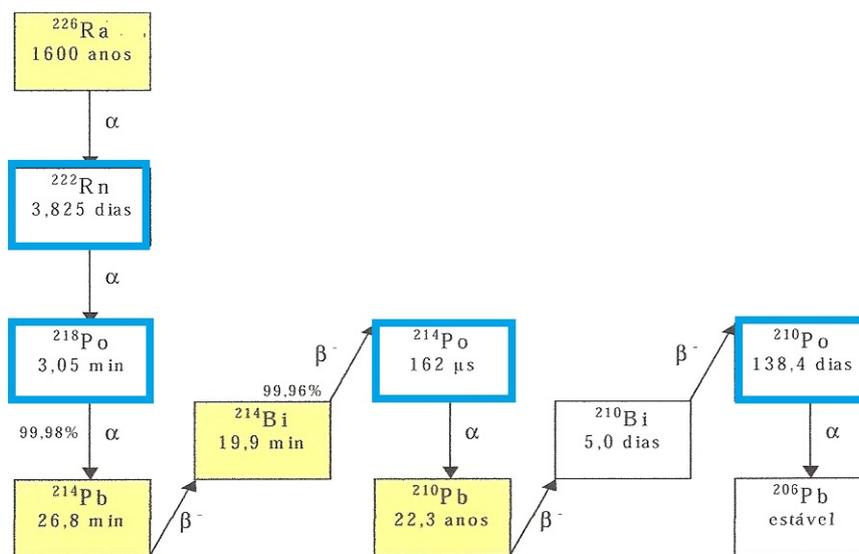


Figura 2.3: Série de decaimento do ^{238}U , a partir do ^{226}Ra (UNSCEAR, 1988).

ganha importância na maioria dos estudos de radiologia. Os radionuclídeos emissores gama estão em fundo amarelo e o radônio e seus filhos emissores α contornados de azul.

A série do ^{232}Th não possui nenhum elemento de grande meia-vida capaz de ser precursor de uma sub-série. A Figura 2.4 apresenta a cadeia de decaimento dos núclídeos da série do ^{232}Th , em que os radionuclídeos emissores gama estão em fundo escuro.

2.3 O Radônio

Apesar de nossa discussão sobre a radiação terrestre ter envolvido apenas três radionuclídeos sólidos nas condições ambientais normais, um dos decaimentos da série do ^{238}U e ^{232}Th é o radônio, gás principal responsável da radiação interna via inalação no homem.

O radônio é um gás radioativo nobre. Comparado com os outros gases nobres, é o mais

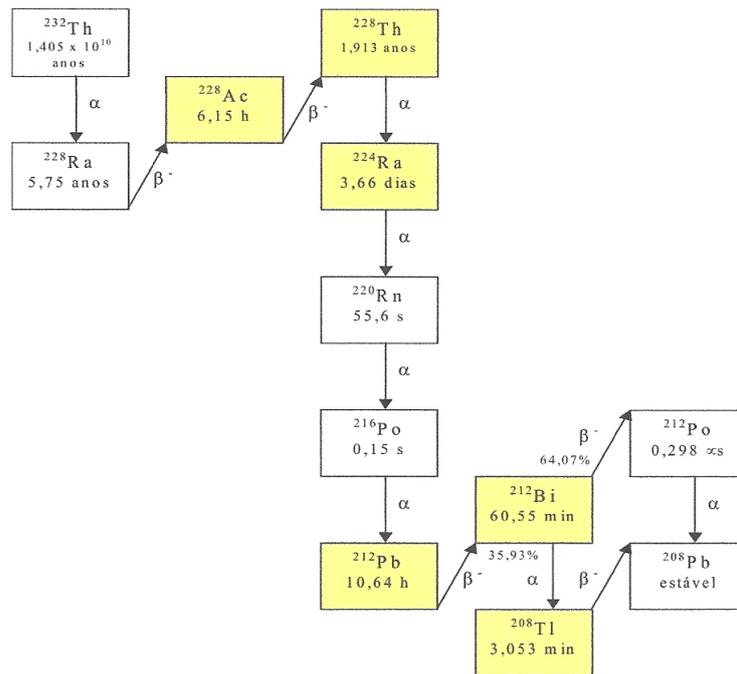


Figura 2.4: *Série de decaimento do ^{232}Th (UNSCEAR, 1988)*

pesado e possui muitos isótopos, embora apenas três deles são naturais: ^{220}Rn da série do tório; ^{222}Rn da série de urânio; e ^{219}Rn na série do Actínídeo, outro elemento encontrado no ambiente derivado do decaimento do ^{235}U . Mas, na prática, apenas ^{220}Rn e ^{222}Rn podem ser relevantes do ponto de vista da proteção radiológica, uma vez que o ^{219}Rn possui uma meia-vida de 3,9 segundos e é muito pouco produzido devido ao fato do ^{235}U representar apenas 0,72% do urânio natural. Deve-se salientar que, também na presença de alta concentração de ^{235}U , como pode ocorrer com urânio altamente enriquecido, o ^{219}Rn não pode escapar para o ambiente porque sua própria meia-vida é muito curta (Cigna, 2005).

O ^{222}Rn apresenta uma meia-vida de 3,8235 dias e pode ser facilmente liberado da rocha onde foi gerado, ao contrário do ^{220}Rn cujos alcances são limitados pela sua meia-vida curta de 55,6 segundos. Em consequência, a quantidade de ^{220}Rn capaz de entrar no ambiente

é bem menor que a quantidade de ^{222}Rn , logo, o ^{220}Rn e seus produtos de decaimento são normalmente negligenciados, embora sua contribuição não seja tão desprezível quanto a do ^{219}Rn .

De acordo com os propósitos da nossa pesquisa, vamos considerar o radônio ^{222}Rn , originário do decaimento do ^{238}U , o único contribuidor e a quantidade desse gás no ambiente estará relacionada com a concentração na rocha do radionuclídeo associado ao seu decaimento. O ^{222}Rn é filho do ^{226}Ra que é emissor de partícula alfa e, ao ser ejetada do ^{226}Ra , causa um recolhimento no átomo do filho. O átomo de ^{222}Rn pode, então, se mover pelo recolhimento uma distância que varia entre 0,02 a 0,07 μm de acordo com a densidade da rocha, permitindo a emissão do átomo gasoso. Conseqüentemente, o ^{222}Rn só pode ser expulso do mineral se estiver muito perto da superfície e o recuo for à direção do exterior (Cigna, 2005). Por sua vez, o radônio e os dois produtos de decaimento (progênie) subsequentes também são radioativos, ^{218}Po e ^{214}Po , e decaem por emissão de partículas alfa, deixando uma contribuição substancial para a dose de radiação total recebida (Gilmore et al., 2001).

Outra notável característica do radônio é ser moderadamente solúvel em água e ter uma alta solubilidade em líquidos orgânicos, com exceção de glicerina. Voltando ao efeito do recuo comentado, podemos dizer que na água, o ^{222}Rn tem o seu efeito de recuo chegando a 0,1 μm e no ar a 63 mm (Cigna, 2005), evidenciando a importância da solubilidade na água.

2.3.1 Movimento do radônio nas rochas

Dois fenômenos serão de grande importância para explicar o escape do radônio das rochas: difusão e transporte. De forma ampla, a difusão é o mecanismo dominante nos canais intergranular, capilares e poros, caracterizada pelo encontro do gás de um meio para alcançar

a atmosfera antes de chegar à superfície, isto é, ela ocorre no interior da rocha logo depois do rádio decair. Enquanto no caso de poros maiores e fraturas, o transporte será dominante, pois ocorre no exterior da rocha e está relacionado ao fluxo de ar na mina ou caverna.

A heterogeneidade do material geológico é uma fonte de grande variação da difusão do radônio em um meio poroso. A fração do radônio que escapa diretamente do solo depende da profundidade do local onde ele é formado e da sua permeabilidade. Assim, de acordo com NCRP (1984), apenas 10% do radônio formado no mineral chega à atmosfera.

Uma importante característica do ^{222}Rn é a sua elevada mobilidade em comparação a outros membros das séries naturais de decaimento radioativo. Ele é capaz de em pouco tempo escapar para o espaço poroso do mineral, alcançando rapidamente a atmosfera (Da Silva et al., 2010). Variações no fluxo de radônio são apenas causadas por fatores físicos, pois não há reações envolvidas no fenômeno do escape e, portanto, poderia dar informações valiosas sobre os processos dinâmicos de transporte (Viñas et al., 2007). Além disso, ^{238}U pode ser oxidado e mobilizado pelo fluxo das águas subterrâneas. Uma vez que essas condições são encontradas na água, o urânio é facilmente precipitado junto à solução; este processo conduz ao enriquecimento de urânio (e, portanto, de radônio) em depósitos adjacentes, dando a idéia de um transporte secundário feito pela água e seguido pelo processo de enriquecimento, fenômeno radioativo importante em ambientes subterrâneos.

Depois de ganhar a atmosfera, o radônio tende a se dispersar no ambiente externo, mas seus níveis podem se acumular em áreas com pouca ventilação de ar, especialmente em espaços fechados, tais como minas, cavernas e em ambientes construídos pelo homem como prédios e casas (Hakl et al., 1992, 1996). Esse será o assunto da próxima seção.

2.4 A radiação em ambientes fechados

Lugares como uma casa mal ventilada, minas ou cavernas podem ser considerados ambientes fechados, propícios ao aumento da concentração tanto de radiação gama quanto de radônio. Sobre as residências, a radiação gama, dentre os tipos de radiação produzida por radionuclídeos terrestres, é a mais penetrante, sendo atenuada exponencialmente com a distância, porém não é possível definir um alcance para a mesma. Nessa situação, o campo de ação da radiação não se limita ao espaço próximo às paredes ou outros elementos da residência, mas sim, devemos considerar que os efeitos da radiação gama podem ser observados em toda a extensão do espaço interno do compartimento formado pela residência. Fato que, acrescido pela produção de radônio, tem gerado um grande número de pesquisa, principalmente em regiões com longos períodos anuais de temperatura muito baixa, pois os mesmos radionuclídeos presentes nas rochas *in natura* são constituintes nos materiais com os quais fazemos nossas casas. A Figura 2.5 ilustra com clareza como o radônio entra nas casas. Levando em consideração esse aspecto e os vários estudos já existentes, o local fechado do estudo proposto nesse texto são as minas e é sobre elas que desejamos comentar um pouco mais a seguir.

Para começar, é importante entender o fator de equilíbrio F , pelo qual uma concentração de radônio pode ser convertida em uma concentração equivalente, considerando o equilíbrio entre ele e seus filhos. Assim, F é função de três variáveis independentes: a proporção de poeira com nuclídeos descendentes de partículas soltas no ar, a taxa de deposição de radionuclídeos nas superfícies internas e a taxa de mudança ou taxa de ventilação de ar. Essas variáveis são altamente dependentes das dimensões do compartimento, da concentração de poeira e de outras condições ambientais (Eappen et al., 2006). Consequentemente, o valor



Figura 2.5: *Ilustração dos mecanismos utilizado pelo radônio para entrar nas casas a partir do subsolo.*

de F diminui com o aumento da ventilação, devido à remoção da descendência do radônio (Anjos et al., 2010b). Muitas medidas foram feitas de radônio e seus descendentes a fim de se estimar o fator F e seus resultados indicam que um típico fator de equilíbrio no ar livre varia entre 0,5 e 0,7 (UNSCEAR, 2000). Entretanto, os ambientes de minas são muito diferentes e os resultados indicam que o F pode variar espacialmente e temporalmente, podendo ir de 0,04 a 0,95 dependendo do ambiente no lugar. A média do fator F de equilíbrio ponderado sobre o número de medidas para lugares de minas ou cavernas já feitas (que são mais de 880) foi calculada em 0,57 (Hakl et al., 1997; Gilmore et al., 2001; Lario et al., 2005; Cigna, 2005).

Sob outro aspecto, a atividade dos filhos do radônio é descrita por meio da concentração de energia potencial da alfa (PAEC), definida para um radionuclídeo como a soma das

energias das partículas alfa emitidas durante o decaimento de todos os filhos desse átomo até se tornar estável. A PAEC de qualquer mistura de filhos de radônio é a soma da energia potencial das partículas alfa geradas pelos átomos presentes no ar por unidade de volume. É difícil medir de forma direta a concentração dos filhos do radônio, dessa forma, eles precisam ser estimados através de considerações de equilíbrio entre o radônio e seus filhos. Realizamos essa estimativa com a concentração de equilíbrio equivalente (EEC) do radônio com unidade Bq m⁻³, definida a partir da concentração de ²²²Rn em equilíbrio secular⁴ e tendo o mesmo PAEC para a mistura de seus filhos. Ambas as concentrações, EEC e a concentração inicial de ²²²Rn no ambiente fechado (C_f), são relacionadas pelo fator de equilíbrio, que pode ser calculado:

$$F = \frac{EEC}{C_f} = 0,105f_{218Po} + 0,515f_{214Pb} + 0,380f_{214Bi} + 6.10^{-9}f_{214Po} \quad (2.1)$$

onde f_i é a concentração fracionária do filho decaído, definida como a razão entre a concentração específica de cada elemento em relação ao radônio, e as constantes representam a fração da contribuição que cada filho dispõe para a energia potencial total das alfas como resultado do decaimento de uma unidade da atividade do gás.

Finalmente, dois fatores essenciais devem ser abordados sobre as minas (Cigna, 2005): em cavernas e minas, o ar é, em geral, bastante limpo, ou seja, há menos partículas pequenas do que no ar livre ou em áreas urbanas — pesquisas mostram que os menores valores de fator de equilíbrio foram encontrados em lugares próximos à trilhas turísticas, onde as pessoas são uma fonte relevante de pequenas partículas e uma forma de poluição do ambiente da caverna. A influência dos visitantes sobre o valor de F é bastante evidente e medidas de F

⁴O fenômeno de equilíbrio secular ocorre quando o núcleo pai tem a constante de decaimento(λ) tendendo a zero em relação ao filho subsequente em uma série, permitindo que, depois de certo tempo, o número de átomos pai que decaem seja igual ao número de filhos desintegrados.

em períodos de visitação ou trabalho diferem das medidas feitas em momentos de evasão; a concentração de radônio no ar da caverna é influenciada por um grande número de fatores, como a concentração de rádio nas rochas, a porosidade, a quantidade de ar e água, a pressão atmosférica e os possíveis terremotos, mas, em geral, uma variação que tem demonstrado ser preponderante é a sazonal⁵, representativa de um máximo verão e um mínimo no inverno, pois, como veremos, a diferenç a de temperatura interna e externa   mina é um fator essencial, e essa diferenç a, na maioria dos casos na literatura, se torna máxima no inverno e mínima no verão.

A radiação gama nas minas terá as características bem parecidas com as já comentadas para as residências. Originária do decaimento do ^{40}K e das séries do ^{232}Th e do ^{238}U , essa radiação nascer  nas paredes rochosas e estará em todo lugar com os seguintes fatores de destaques: a espessura das paredes é muito grossa, tendendo ao infinito se comparado com as residências, e as rochas nesses lugares não sofreram modificações humanas em nível estrutural.

2.4.1 Modelo para o comportamento da concentração de radônio

Visando modelar a concentração de radônio, consideraremos duas situações: um ambiente fechado no formato de uma caixa retangular e uma caverna representada por um tubo.

Primeiramente, vamos descrever de forma matemática a difusão e advecç o⁶, representativos dos essenciais meios de transporte do radônio no interior e exterior das rochas. Vale lembrar que todos os processos dos fluidos podem ser classificados em dois grandes grupos: transporte e transformação. Transporte refere-se aos processos

⁵Caracterizada pelas mudanç as climáticas ao longo do ano.

⁶Advecç o é o processo de convecção de calor ocorrido na horizontal.

que movem substâncias até a atmosfera por meios físicos. Os dois modos principais de transporte em mecânica dos fluidos ambientais são advecção e difusão (transporte relacionadas com movimentos aleatórios dentro de um fluido). O segundo grande grupo, a transformação, refere-se aos processos em que há mudança de uma substância de interesse em outra substância. Os dois modos principais de transformação são físicas (transformações provocadas pelas leis da física, como o decaimento radioativo) e químicas (transformações causadas por reações químicas ou biológicas, como a dissolução e respiração) (Socolofsky e Jirka, 2005).

A difusão difere da advecção na medida em que é aleatório por natureza. Um exemplo bem conhecido é a difusão do perfume em uma sala vazia. Se um frasco de perfume é aberto e deixar-se evaporar no ar, em breve o quarto inteiro estará perfumado. Também sabemos por experiência que o perfume será mais forte perto da fonte e mais fraco conforme nos afastamos, mas as moléculas das fragrância irão se espalhar por todo o quarto, devido aos movimentos aleatórios moleculares e turbulências. Assim, a difusão tem duas propriedades principais: é de natureza aleatória e o transporte ocorre de regiões de alta concentração para baixa concentração, até alcançar um estado de equilíbrio com concentração uniforme (Socolofsky e Jirka, 2005).

Com o apoio dos argumentos apresentados por Fischer et al. (1979), vamos pensar em duas fileiras de moléculas empilhadas na vertical, inicialmente em $x = 0$. Aqui, para fins didáticos, vamos considerar apenas uma componente de seu movimento tridimensional: direita ou esquerda ao longo do eixo x . Nós ainda podemos definir a massa das partículas a esquerda como M_l , a massa de partículas a direita como M_r , e a probabilidade (taxa de transferência por unidade de tempo) de deslocamento das partículas em $x = 0$ como k , com unidade de $[T^{-1}]$. Então, matematicamente, o fluxo médio de partículas da coluna da

esquerda para a direita é kM_l , e o fluxo médio de partículas da coluna da direita para a esquerda é $-kM_r$, onde o sinal negativo é usado para distinguir a direção. Assim, o fluxo líquido de partículas q_x é

$$q_x = k(M_l - M_r) \quad (2.2)$$

O que nos permite escrever a concentração de partículas em cada lado como

$$C_i = \frac{M_i}{\delta x \delta y \delta z} \quad (2.3)$$

com $i = l, r$, onde δx é a largura, δy é a largura e δz é a altura de cada coluna de moléculas. Fisicamente, δx é o passo média ao longo do eixo x executado por uma molécula no tempo δt . Para o caso unidimensional, queremos usar q_x para representar o fluxo na direção x por unidade de área perpendicular à x, daí, tomaremos $\delta y \delta z = 1$. Em seguida, notamos que uma aproximação de diferenças finitas para dC/dx é

$$\frac{dC}{dx} = \frac{C_r - C_l}{x_r - x_l} = \frac{M_r - M_l}{\delta x(x_r - x_l)} \quad (2.4)$$

Considerando $\delta x = (x_r - x_l)$ e substituindo (2.4) em (2.2) produz

$$q_x = -k(\delta x)^2 \frac{dC}{dx} \quad (2.5)$$

(2.5) contém duas incógnitas, k e δx . Fischer et al. (1979) argumenta que, desde que q não dependa de um δx arbitrário, devemos assumir que $k(\delta x)^2$ é uma constante, que chamaremos de coeficiente de difusão, D . Substituindo, obtemos a equação unidimensional do fluxo difusivo

$$q_x = -D \frac{dC}{dx} \quad (2.6)$$

É importante notar que o fluxo difusivo é uma grandeza vetorial e tem unidade de $[\frac{M}{L^2T}]$.

Generalizando a três dimensões, podemos escrever o vetor do fluxo difusivo em um ponto,

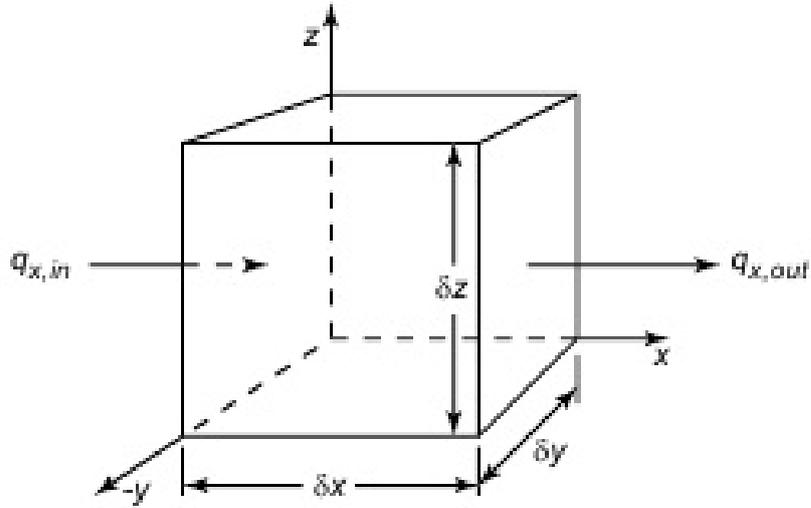


Figura 2.6: Ilustração do volume de controle diferencial (Socolofsky e Jirka, 2005).

acrescentando as outras duas dimensões de forma análoga, produzindo

$$\vec{q} = \vec{D} \left(\frac{\partial C}{\partial x}, \frac{\partial C}{\partial y}, \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \vec{D} \frac{\partial C}{\partial x_i} \quad (2.7)$$

Processos de difusão que obedecem esta relação são chamados de difusão Fickiana, e (2.6) é chamada de lei de Fick.

Embora a lei de Fick nos dê uma expressão para o fluxo de massa devido ao processo de difusão, ainda necessitamos de uma equação para prevê a mudança na concentração da massa ao longo do tempo em um ponto. Para derivar a equação de difusão, consideraremos um volume de controle (VC) diferencial apresentado na Figura 2.6. A mudança na massa M que flui por este VC ao longo do tempo é dada pela lei de conservação de massa

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \quad (2.8)$$

Para calcular os fluxos de massa difusivo dentro e fora do VC, usamos a lei de Fick. Para obter uma massa total de fluxo \dot{m} nós multiplicamos q_x na equação (2.6) pela área da

superfície ($A = \delta y \delta z$). Assim, podemos escrever o fluxo líquido na direção x como

$$\delta \dot{m}|_x = -D \delta y \delta z \left(\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_1 - \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_2 \right) \quad (2.9)$$

onde 1 e 2 localiza as faces de entrada e saída indicadas na figura

Para continuar é preciso encontrar um método para avaliar $\partial C / \partial x$ na saída indicada por 2. Para isso, usemos a linear expansão da série de Taylor, uma importante ferramenta para aproximar funções lineares. Substituindo $\partial C / \partial x$ para os dois primeiros termos f(x) na expansão em série de Taylor, temos

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_2 = \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_1 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_1 \right) \delta x \quad (2.10)$$

Agora, substituindo esta expressão na equação de fluxo líquido (2.9) e desconsiderando o subscrito 1, ficamos com

$$\delta \dot{m}|_x = D \delta y \delta z \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \delta x \quad (2.11)$$

Da mesma forma, na y e z direções, os fluxos líquidos através do volume de controle terão equações semelhantes. Antes de substituir estes resultados em (2.8), nós também devemos converter M para a concentração, reconhecendo $M = C \delta x \delta y \delta z$. Então, após a substituição da concentração C e dos fluxos líquidos $\delta \dot{m}$, nós obteremos a equação de difusão tridimensional:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.12)$$

que é uma equação fundamental na mecânica dos fluidos ambientais.

Nesse momento precisamos acrescentar o efeito da advecção a nossa descrição matemática, pois sabe-se que esse fenômeno também influencia a concentração de um fluido confinado.

A derivação da equação de difusão advecção baseia-se no princípio da superposição: advecção e difusão podem ser somadas, se forem linearmente independentes. Sobre a difusão

se mostrou ser um processo aleatório devido ao movimento molecular. Devido à difusão, cada molécula em um tempo δt se moverá um passo para a esquerda ou um passo para a direita (isto é, $\pm\delta x$). Por outro lado, pela advecção, cada molécula também se move $v\delta t$ na direção do fluxo. Estes processos são claramente aditivos e independentes; a presença do fluxo não muda a probabilidade de que a molécula vai dar um passo difusivo para a direita ou a esquerda, ele só acrescenta algo a essa etapa. Logo, o movimento líquido da molécula é $v\delta t \pm \delta x$, e assim, o fluxo total na direção x será J_x , incluindo o transporte advectivo e um termo de difusão Fickiana (Socolofsky e Jirka, 2005),

$$J_x = vC + q_x = vC - D\frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.13)$$

Como fizemos anteriormente, usemos esta lei do fluxo e a conservação de massa para derivar a equação de difusão advectiva. Consideraremos o nosso VC de antes, mas agora incluindo uma velocidade de fluxo, $\vec{v} = (v, u, w)$. Da conservação de massa, o fluxo líquido através do VC é dado pela equação (2.8), implicando que para a direção x, temos

$$\delta\dot{m}|_x = \left(vC - D\frac{\partial C}{\partial x}\right)\Big|_1 \delta y \delta z - \left(vC - D\frac{\partial C}{\partial x}\right)\Big|_2 \delta y \delta z \quad (2.14)$$

Como antes, usemos a linear expansão da série de Taylor para combinar os dois termos de fluxo, dando

$$vC|_1 - vC|_2 = -\frac{\partial(vC)}{\partial x}\delta x \quad (2.15)$$

e

$$-D\frac{\partial C}{\partial x}\Big|_1 + D\frac{\partial C}{\partial x}\Big|_2 = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

Então, para a direção x

$$\delta\dot{m}|_x = \left(-\frac{\partial(vC)}{\partial x} + D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right) \delta x \delta y \delta z \quad (2.17)$$

$\dot{m}|_y$ e $\dot{m}|_z$ são semelhantes a (2.17), mas com u e w para as componentes de velocidade, respectivamente.

Substituindo estes resultados em (2.8) e lembrando que $M = C\delta x\delta y\delta z$, obtemos

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(v_i C)}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x_i^2} \quad (2.18)$$

que é a equação de difusão advectiva desejada. Porém, o ar nas minas pode ser considerado incompressível ($\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$) e o fluxo de radônio representará um processo de transformação que chamaremos de R, resultando em

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x_i^2} \pm R \quad (2.19)$$

Por fim, pode-se mostrar que no caso do ar na mina em que há anisotropia⁷ na turbulência e no coeficiente de difusão ($\vec{D} = (E_x, E_y, E_z)$) e de existir uma substância que decai, se comportando como fonte (ϕ), para um gás radioativo com constante de decaimento λ , temos

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial x} + u \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \lambda C + \phi \quad (2.20)$$

Retornando ao problema proposto, comecemos a buscar uma descrição para variação temporal da concentração de ²²²Rn no interior de um ambiente fechado representado por uma caixa retangular, partindo da equação (2.20). Assumindo que a liberação de materiais vinda da construção é desprezível, o gás radônio é homogeneamente misturado com o ar ambiente ($C = C(t) \rightarrow \frac{\partial C}{\partial x_i} = 0$) e não reage com qualquer substância ou desaparece por qualquer outro processo que não sejam a ventilação e o decaimento natural. Então, podemos afirmar que haverá uma atividade distribuída de forma homogênea no ambiente fechado e a concentração que pode ser encontrada por meio da resolução da seguinte equação diferencial

⁷Um corpo é anisotrópico em relação a uma propriedade quando esta propriedade tem valores diferentes segundo a direção considerada.

linear:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = E_x \frac{S}{V} + C_0 \lambda_v - C_i (\lambda + \lambda_v) \quad (2.21)$$

onde $C_i(t)$ é a concentração de radônio (Bq m^{-3}) no ambiente fechado no tempo t , E_x a taxa de atividade exalada de radônio por unidade de área ($\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$), S a área exalante da construção (m^2), V o volume da caixa (m^3), C_0 a concentração de radônio do ar externo (Bq m^{-3}), λ_v a taxa de saída do ar devido a uma ventilação ou simplesmente a taxa de ventilação no interior do ambiente (h^{-1}), e λ a constante de decaimento do radônio ($7,54 \cdot 10^{-3} \text{h}^{-1}$) (Table of Nuclides, 2000). O UNSCEAR (1982) relata que valores de $\lambda_v < 0,1 \text{h}^{-1}$ representam casos de ventilação extremamente pobres e uma taxa de mudança do ar igual ou maior a $0,5 \text{h}^{-1}$ é sugerida para lugares como residências. É válido dizer que nessa equação $\phi = E_x \frac{S}{V} + C_0 \lambda_v$. Resolvendo a equação (2.21) na condição de equilíbrio transiente (depois de muito tempo, quando $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$), a concentração de radônio na caixa é escrita como:

$$C_{Rn} = \frac{E_x \frac{S}{V} + C_0 \lambda_v}{\lambda + \lambda_v} \quad (2.22)$$

No entanto, a partir dos valores medidos da atividade específica de ^{226}Ra , a taxa de atividade exalada de radônio por unidade de área E_x ($\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$) pode ser calculada teoricamente (UNSCEAR, 1988):

$$E_x = \frac{1}{2} A_{Ra} \lambda_{Rn} \rho \eta d \quad (2.23)$$

onde A_{Ra} é a atividade do ^{226}Ra (Bq kg^{-1}), λ_{Rn} a constante de decaimento do radônio (h^{-1}), ρ a densidade do material (kg m^{-3}), d a espessura da parede que limita o ambiente (m), e η o coeficiente de emanção, ou seja, a fração de radônio que consegue chegar à superfície da parede pelo processo de difusão e que pode ser determinada pela fração entre a atividade de radônio no ambiente e a atividade de rádio no material constituinte da parede (Anjos et al., 2011), assim, este termo depende da composição do material. É essencial comentar que a

equação (2.23) é válida apenas para condições secas, porque a presença de água nos materiais altera as condições de transporte no material, resultando em uma equação modificada para E_x (UNSCEAR, 2000).

Em uma mina, os processos de transporte de radônio dependem, essencialmente, da configuração e da conexão com o exterior através das cavidades subterrâneas, das passagens, dos poços e dos outros meios de comunicação, tais como fissuras e fraturas. No caso dos sistemas sem saída, a diferença de densidade do ar externo e interno é o parâmetro de controle principal, que pela convecção fazem trocas de ar, devido às diferenças de temperatura entre a mina e o exterior, provocando, em primeira aproximação, uma diferença de pressão (Atkinson et al., 1983; Hakl, 1997). De acordo com essa relação, na estação quente, quando o ar da caverna está mais frio que o ar exterior, a pressão exercida pelo ar de dentro será maior que a pressão externa e o ar flui para fora através da entrada. Já quando as condições externas são mais frias do que as internas, o ar flui para dentro da mina por meio da entrada (Hakl, 1997). Vale comentar que a temperatura dentro das minas e cavernas é praticamente constante, enquanto que a temperatura externa varia.

Ao observar uma caverna totalmente fechada, estudos mostram que os níveis de radônio aumentam com a distância da entrada da mina e a sua concentração dependerá muito da diferença de pressão ao longo do ano, provocada pela diferença de temperatura e não por possíveis alterações na pressão atmosférica (Da Silva et al., 2010). Baseado na descrição acima e na equação (2.20), o modelo do tubo sem saída foi desenvolvido através da produção de radônio nas rochas, seus produtos de decaimento, da difusão molecular e do fluxo de ar vindo do processo de advecção, no qual se assume que a mina pode ser tratada como se fosse um simples tubo com seção de choque e velocidade do ar constantes, onde a concentração de radônio só varia na direção x ao longo do túnel, o que implica em $C = C(x, t)$ e $\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial C}{\partial z} = 0$.

A partir daí, o transporte de radônio no subsolo apresenta a possibilidade de ser descrito pela seguinte equação de advecção-difusão (Wigley, 1967; Atkinson et al., 1983; Nazaroff, 1992.):

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} + E_x \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} + v.C(x, t) = -\lambda.C(x, t) + E_V \quad (2.24)$$

onde $C(x, t)$ (Bq m^{-3}) é a concentração de radônio, v (m h^{-1}) a velocidade do ar, $\lambda = 7,54 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ a constante de decaimento do radônio e E_V ($\text{Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) o termo característico da fonte, podendo também ser entendido como a taxa do fluxo de gás radônio que emana das parede rochosa da mina.

Na equação (2.24) o segundo termo do lado esquerdo corresponde à difusão-advecção normal da equação (2.20), enquanto que o terceiro descreve a influência da ventilação para a advecção. No lado direito, os termos descrevem o processo de decaimento do radônio e a liberação de radônio no ambiente de mina. Uma das soluções dessa equação é considerar a situação transiência (independência do tempo) e a condição de contorno $C(0, t) = 0$, permitindo, assim, escrever a concentração de radônio em qualquer distância x a partir da entrada do tubo como (Da Silva, 2010):

$$C(x) = C_\infty(1 - e^{-\lambda x/v}) \quad (2.25)$$

onde $C_\infty = E_V/\lambda$

Essa descrição sobre a concentração de radônio demonstra que no início do tubo hipotético conseguimos um valor baixo, o qual varia ao longo do ano, sobe com o aumento da distância a entrada do tubo e tende a um platô no final do tubo, onde temos pouca influência externa. Mostraremos como resultado da presente pesquisa, que uma mina com apenas uma entrada e sem fissuras ou crateras na sua extensão que permitam a entrada extra de ar do exterior, se comporta exatamente como um tubo e cujo platô pode ser entendido como falta de influência

sazonal e equilíbrio secular entre o radônio e seus filhos.

2.5 Radônio como traçador geológico

No item anterior, abordou-se o comportamento da concentração de radônio em uma mina e caverna se a mesma puder ser considerada um sistema fechado com apenas uma entrada, o que foi representado por um tubo, onde a concentração cresce exponencialmente com a distância até tender a um platô (valor constante), conforme a observação da linha (1) na Figura 2.7 modelada pela equação (2.25). Porém, alguns estudos de concentração de radônio em minas têm revelado um comportamento semelhante ao da curva (2) e (3) da mesma figura. De acordo com Atkinson *et al.* (1983), essas irregulares responsáveis pela diminuição na concentração do radônio são passíveis de serem interpretadas como sendo pelos efeitos de várias turbulências no ar, tornando menor a quantidade de radônio contida no ducto principal. Por sua vez, as turbulências são causadas por aberturas ao longo da caverna como fissuras, fraturas e novas saídas, o que permite que a concentração do gás radioativo seja um traçador geológico dessas aberturas. Essas turbulências seriam explicadas por entradas bruscas de ar nessas aberturas, levando a um aumento na velocidade do ar interno e a uma descontinuidade para baixo na concentração do tubo que estava tendendo para um platô. Para compreender melhor, passaremos, a partir da publicação de Atkinson *et al.* (1983) e da equação de difusão-advectação demonstrada, ao estudo do efeito chaminé e à buscar uma maneira diferente de escrever a concentração de radônio como função da distância à entrada da mina.

O efeito chaminé nos ventos, descrito, em linhas gerais, por Wigley e Brown (1976) e ilustrado na Figura 2.8, ocorre em minas e cavernas quando há duas ou mais entradas em

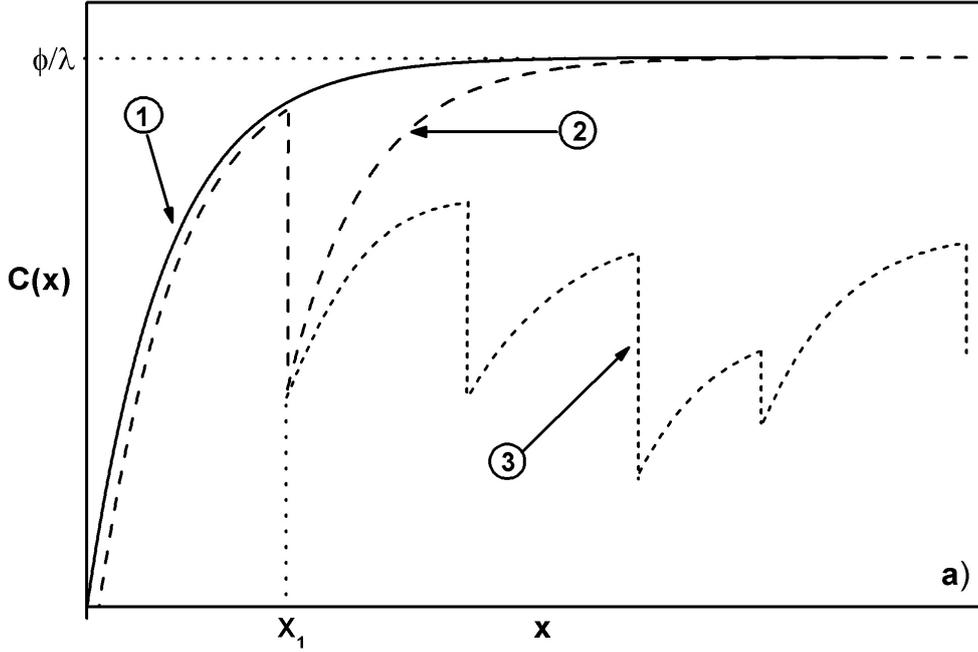


Figura 2.7: Perfis teóricos da concentração do radônio ao longo de uma mina tubular. A curva (1) representa um fluxo constante, a curva (2) sofre efeito de uma turbulência em X_1 , onde há uma diminuição de radônio, e a curva (3) sofre efeito de várias turbulências (Da Silva et al., 2010).

diferentes altitudes e a temperatura do ar interno é diferente do externo. Com isso, a pressão exercida na entrada mais baixa pela coluna de ar na parte de dentro da mina será diferente da pressão na parte de fora, pois a densidade do ar depende da temperatura. Então, podemos escrever a diferença de pressão, Δp , entre as entradas a partir das densidades médias das colunas de ar:

$$\Delta p = (\bar{\rho}_{interno} - \bar{\rho}_{externo})gh = (\Delta\bar{\rho})gh \quad (2.26)$$

onde g é a aceleração da gravidade e h é a diferença de altura entre a entrada mais baixa e mais alta. A densidade do ar pode ser escrita em função da temperatura virtual⁸, T^* , como:

$$\rho = \frac{p}{R_d T^*} \quad (2.27)$$

⁸A temperatura virtual é a temperatura do ar seco com a mesma densidade do ar úmido.

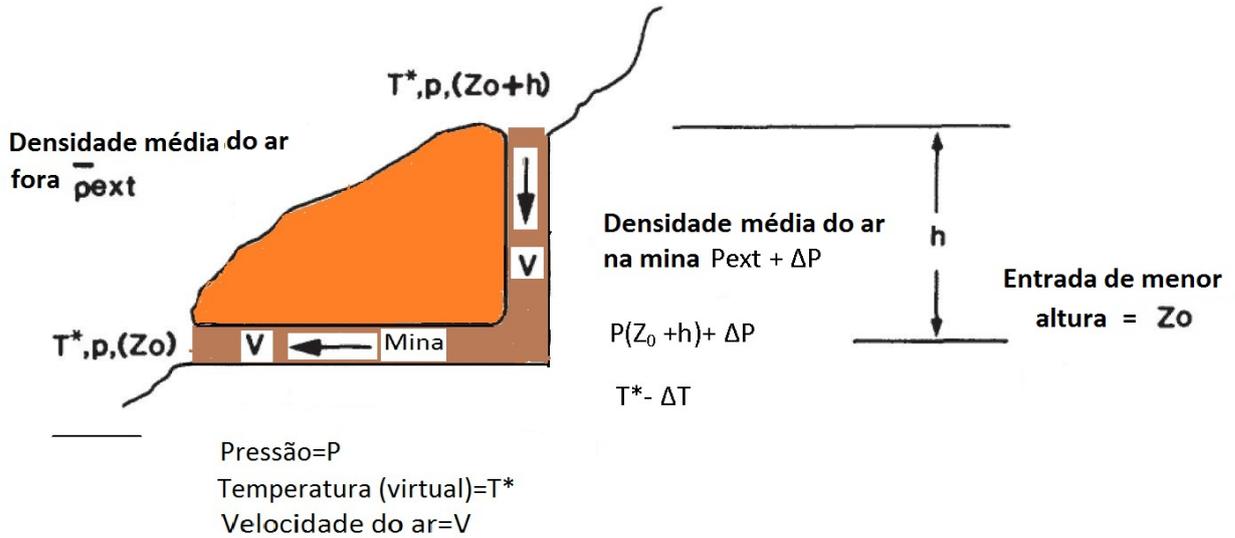


Figura 2.8: Ilustração esquemática do efeito chaminé em uma mina (Atkinson et al., 1983).

onde R_d é a constante específica do gás para o ar seco. Então, usando (2.27) em (2.26):

$$\Delta p \approx -gh \frac{\bar{\rho}_{interno}}{\bar{T}^*_{externo}} \Delta \bar{T}^* \quad (2.28)$$

Definindo $\Delta \bar{T}^* = \bar{T}^*_{interno} - \bar{T}^*_{externo}$. A aproximação aqui feita envolve uma dependência com h , mas é excelente para $h \leq 1000$ m. Assim, desde que $\bar{\rho}_{interno}$ seja quase constante com mudanças em $\Delta \bar{T}^*$, a diferença de pressão conduz a força do efeito chaminé. Logo, o descrevemos da seguinte maneira: quando o ar interno é mais frio ($\Delta \bar{T}^* < 0$), a pressão exercida pelo ar dentro da mina será maior que a pressão fora dela ($\Delta p > 0$) e o vento será empurrado pela entrada mais baixa. No caso contrário, o vento será empurrado pela entrada mais alta. Como a temperatura dentro da mina é praticamente constante, espera-se que o efeito chaminé inverta sua direção sazonalmente e até diariamente ao longo do ano.

Ao sabermos o que fissuras e crateras provocam no comportamento dos ventos, interpretaremos o efeito chaminé entre duas entradas de ar, como uma turbulência no modelo do tubo com apenas uma entrada, causando um decréscimo brusco na concentração de

radônio como um todo e uma dependência sazonal mais expressiva. Então, consideremos uma simples turbulência (fissura ou cratera) em um tubo localizada em X_1 , a qual aumentará a velocidade do vento de v_0 para v_1 . Por fim, assumindo que os fluxos de ar sejam misturados de forma imediata na posição da fissura ou cratera, pode-se descrever a concentração C_1 do fluxo interno a partir da turbulência como:

$$C_1 = \frac{v_0 C_p + (v_1 - v_0) C_t}{v_1} \quad (2.29)$$

onde C_t é a concentração de radônio do ar turbulento e C_p é a concentração no fluxo principal, obtida fazendo $x = X_1$ e $v = v_0$ na equação (2.25), como se não houvesse abertura. Assim, o comportamento apresentado pela curva (2) na Figura 2.7 é descrito matematicamente por:

$$C(x) = C_\infty(1 - e^{-\lambda(x-x_1)/v_1}) + C_1 e^{-\lambda(x-x_1)/v_1} \quad (2.30)$$

É importante observar que esse resultado também é solução da equação (2.24) com independência temporal e duas condições de contorno, $C(x_1) = C_1$ e $v = v_1$, e é válido para fins de cálculo da concentração de radônio em $x > X_1$, pois antes dessa posição da mina o comportamento do radônio mantém o descrito pelo tubo com apenas uma entrada da equação (2.25). É dessa forma que a descontinuidade matemática e a experimental comprovam juntas a existência de uma abertura na estrutura da mina.

O caso em que numerosas pequenas turbulências estejam presentes (curva (3) da Figura 2.7), não terá seus efeitos aprofundados e descritos matematicamente nesse texto, uma vez que não se insere nas minas abordadas neste estudo. O que nos parece relevante, contudo, é o fato de a cada turbulência haver um rebaixamento na concentração de radônio em relação ao platô proposto inicialmente pelo tubo sem saída.

2.6 Estimativa da dose

Quando a radiação passa entre a matéria, deposita energia no material envolvido. A partícula alfa e a partícula beta, eletricamente carregadas, depositam energia nas interações eletrônicas com elétrons constituintes do material. Os raios gama perdem energia por variados caminhos, mas cada um envolve liberação atômica de elétrons, que por sua vez vão levar energia para outros elétrons. De forma resumida, podemos dizer que em todos os casos a radiação produzirá, em última escala, interações elétricas no material (IAEA, 2004).

Cada vez que uma partícula carregada ioniza ou excita átomo, ele necessita perder a energia acumulada na interação até que não a tenha mais o suficiente para interagir; como resultado dessas perdas energéticas, ocorre um pequeno aumento na temperatura do material do qual o átomo faz parte. Por esse caminho, toda a energia depositada em um tecido biológico, devido à radiação, é eventualmente dissipada como calor, o que aumenta as vibrações atômicas e das estruturas moleculares, podendo ocasionar mudanças químicas que levam a efeitos biológicos nocivos.

Por outra vertente, os tecidos biológicos são formados por células, que por sua vez são constituídas de 80% de água e 20% de outros componentes biológicos complexos. Quando a radiação passa atravessa o tecido celular produz mudanças na molécula de água, fazendo com que ela emita radicais livres, também conhecidos como radicais livres de hidroxila (OH), capazes de provocar importantes alterações moleculares nas células (IAEA, 2004).

Durante muito tempo questionou-se como calcular o efeito da radiação. Como já mencionamos anteriormente, não podemos detectar a radiação de forma direta, mas sim, interpretar as medidas feitas em termos da energia que a radiação deposita em materiais como tecidos do organismo humano. Assim, pode-se calcular a dose absorvida por cada

tecido específico sabendo a quantidade de atividade ou energia que ele reteve em uma unidade de massa. A dose absorvida é medida em gray⁹, simbolizada por Gy, onde 1 Gy é igual a 1 J de energia uniformemente distribuída em 1 kg.

Com efeito, tipos diferentes de radiação vão causar diferentes efeitos nos materiais biológicos, então, uma mesma dose absorvida numa certa quantidade de gray não apresentará, necessariamente, o mesmo efeito em uma célula. Por exemplo, 1 Gy de partículas alfa é mais perigoso para um tecido do que 1 Gy de partículas beta devido às características já mencionadas. Então, para suprir essas diferenças em relação ao nível de periculosidade do tipo de radiação, criou-se a dose equivalente medida em sievert¹⁰ (Sv). A dose equivalente trata-se da dose absorvida multiplicada por um fator que leva em conta o caminho pelo qual um particular tipo de radiação depositou sua energia em um tecido. Com isso, podemos citar que no caso dos raios X, do raio gama e da partícula beta esse fator é igual a 1, já para a partícula alfa atribuímos o valor 20 (IAEA, 2004).

2.6.1 Cálculo da dose para radônio

Para o cálculo da exposição ao ²²²Rn pela inalação dos produtos de decaimento, o ICRP (1993) recomenda o uso de um único fator de conversão para relacionar a concentração de radônio com a dose efetiva para um indivíduo. Assim, a dose efetiva (E) para a inalação pode ser calculada por:

$$E = F.C_0.DCF.t \quad (2.31)$$

onde C_0 é a concentração de radônio medida no ar (Bq m^{-3}), t o tempo de exposição (h) e DCF ($\text{Bq}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ m}^3$) o fator de conversão de dose que leva em conta a descendência de

⁹O nome gray é em homenagem ao físico inglês Harold Gray (1905-1965).

¹⁰O nome sievert é uma homenagem ao físico sueco Rolf Sievert (1896-1966).

radônio (dose por quantidade de exposição).

Estimativas da DCF foram obtidas por meio de estudos epidemiológicos e de modelos dosimétricos, como o modelo do Trato Respiratório Humano desenvolvido pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, doravante ICRP. Avaliações de dosimetria de DCF apresentaram valores na faixa de 6 a 15 nSv Bq⁻¹h⁻¹m³ e, para abordagem epidemiológica, temos um valor de 6 nSv.Bq⁻¹h⁻¹m³ (UNSCEAR, 2000). O UNSCEAR recomenda para DCF um valor de 9 nSv Bq⁻¹h⁻¹m³ seja utilizado em avaliações de dose (UNSCEAR, 2000; UNSCEAR, 2006), comparativamente muito próximo do valor de 7,95 nSv Bq⁻¹h⁻¹m³ recomendado pela ICRP. Ambos os valores podem ser usados para o trabalhador e para a exposição de membros do público (ICRP, 1993). A ICRP espera publicar novos coeficientes de dose que substituirão a ICRP Publicação 65 sobre convenções de conversão de dose e informa que as mudanças provavelmente resultará no aumento DCF em torno de um fator de dois (ICRP, 2009). Para esta dissertação, o cálculo da dose efetiva para membros do público e dos trabalhadores utilizará o fator de conversão de dose da publicação da ICRP 65, ou seja, 7,95 nSv Bq⁻¹h⁻¹m³ (ICRP, 1993).

Tanto a dose para radiação gama quanto para o radônio serão tema de discussão do capítulo de exposição dos resultados a serem apresentados para o nosso estudo nas cavernas, pois, como se pôde observar, o objetivo dessa subseção resumiu-se em apenas introduzir o problema.

2.6.2 Recomendações de segurança

A Organização Mundial da Saúde, doravante OMS, recomenda que cada país apresente um conjunto de valores limites, para que seja tomado como referência no controle da radiação em um ambiente fechado. Tendo em conta os últimos dados científicos sobre os efeitos na

saúde do radônio, o nível de referência de 100 Bq.m^{-3} tem sido recomendado pela OMS (2009). No entanto, se este nível, por algum motivo específico, não puder ser implementado em um determinado país, ele não deve exceder 300 Bq.m^{-3} . Esse valor representa cerca de 10 mSv y^{-1} de acordo com cálculos recentes do ICRP (2009) (Anjos et al., 2010).

A grande preocupação atual, que tem levado à diminuição dos limites, é o risco de se desenvolver câncer mesmo a baixo nível de radiação. A estimativa da doença é convencionalmente feita a partir dos efeitos bem conhecidos de altas doses. Atualmente, devido à aceitação da idéia da inexistência de um limite para que a radiação provoque o aparecimento de células cancerígenas, os limites vêm sendo questionados. Porém, de acordo com um estudo muito recente não há nenhuma evidência direta dos efeitos de radiação para doses inferiores acerca de $0,5 \text{ Sv}$ (Preston et al., 2003). O que nos resta, então, é aceitar os limites já comprovados e esperar por novas pesquisas (Cigna, 2005).

Em 1993, a ICRP emitiu uma publicação atualizada sobre a dose para os trabalhadores e população que convive com o radônio. Esse relatório resume o grau de conhecimento atual sobre os efeitos na saúde da inalação de radônio e seus descendentes e faz recomendações para o controle da exposição em habitação e locais de trabalho. Assim, se constatou que o prejuízo para os membros do público em geral é ligeiramente superior para os trabalhadores, devido à presença de crianças e pessoas menos saudáveis. Mas, o ICRP aponta que nos locais de trabalho utilizados por membros do público, se a ocupação for baixa, por exemplo, em escritórios, bibliotecas, teatros e, portanto, também em cavernas, não se precisa de tratamento especial, evitando uma avaliação diferente para os trabalhadores (guias caverna) e membros do público (visitantes).

Outra referência é o limite recomendado pela ICRP (1991) para a dose efetiva de 20 mSv por ano, em média, durante um período de cinco anos, com a condição de que a dose

efetiva não exceda 50 mSv em cada ano. A ICRP definiu também um estado de ação, ou seja, a partir de um valor para a concentração de radônio a intervenção é recomendada para reduzir a exposição dos indivíduos. Ao assumir 2000 horas por ano de trabalho e um fator de equilíbrio de 0,4, a ICRP recomenda a adoção de um estado de ação dentro da faixa de 500 a 1500 Bq.m⁻³ ou de 3 a 10 mSv (Cigna, 2005).

Sobre a inclusão da radiação gama, o UNSCEAR (2000) afirmou que a exposição do homem à radiação externa e interna não deve exceder 2,8 mSv y⁻¹, porém, em se tratando de raios gama, a média de dose natural é de 0,50 mSv y⁻¹, não devendo ultrapassar muito esse valor e sendo o radônio e seus descendentes os responsáveis por todo resto da radiação natural recebida.

2.7 As rochas e suas concentrações de ⁴⁰K, ²³²Th e ²³⁸U

Além de permitir estimar a taxa de dose externa devido à radiação gama, a espectrometria de raios gama natural tem sido usada para um amplo número de aplicações geológicas, incluindo o mapeamento litológico de rochas e sedimentos não consolidados, a exploração mineral, os estudos de transporte de sedimentos e a investigação riscos provenientes do uso de determinados materiais de construção (Anjos et al., 2006, 2007; Estellita et al., 2010).

As concentrações de tório, urânio e potássio em rochas graníticas estão intimamente correlacionadas com suas respectivas composições minerais e características petrológicas gerais (Whitfield et al., 1959; Rogers e Ragland, 1961; Doventon et al., 1992). Urânio e tório em rochas ígneas e metamórficas são, normalmente, encontrados com alguns minerais que compõe estas rochas, tais como apatita, sphene e zircônio. Outros minerais altamente radioativos, como a monazita, alanita, uranita, torita e pyrochlore, são bem freqüentes na

natureza, entretanto, não são constituintes típicos das rochas graníticas. O urânio tende a ser altamente móvel perto da superfície da rocha, enquanto que o tório é um elemento inerte. Assim, o urânio é facilmente oxidado em forma de solução aquosa e pode ser prontamente lixiviado de pegmatitas e granitos e re-depositados em sedimentos distantes da rocha de origem, ao passo que o tório é relativamente estável, bem menos solúvel do que o urânio e o potássio e não se move, a não ser por meios mecânicos como o vento e processo de erosão. Tanto a concentração de tório quanto a de urânio tende a ser alta em rochas félsicas e a aumentar com a alcalinidade ou acidez, possuindo suas maiores concentrações em pegmatitas. O potássio presente nas rochas também aumenta com a acidez e é normalmente encontrado em feldspato potássico, como microclina e ortoclásio, ou em micas, como muscovita e biotita. Rochas que não apresentam esses minerais, possuem uma concentração de potássio muito baixa.

As características petrológicas de rochas graníticas e sedimentares associadas com os efeitos do tempo e do metamorfismo produzem alterações expressivas nas correlações entre os radionuclídeos naturais (Th, U, K, Th/U e Th/K). Conseqüentemente, as concentrações de tório, urânio e de potássio em diferentes amostras de granito resultam em seqüências individuais de diferenciação. A menos que haja uma mistura complexa de minerais radioativos na formação das rochas graníticas e sedimentares, tais correlações entre os radionuclídeos naturais podem ser usadas para identificar os minerais mais comuns presentes nas amostras. Hoje, diagramas potássio-tório são amplamente utilizados na identificação das associações de minerais pesados e minerais argilosos, além da discriminação de micas e feldspatos. Como o tório (por absorção) e potássio (composição química) estão associados com minerais argilosos, a proporção Th/K expressa o enriquecimento do tório relativo à concentração do potássio como um indicador de espécies de minerais argilosas, assim

como, pode ser um traçador de outros minerais radioativos. A Figura 2.9 representa uma carta litológica utilizada para determinar o tipo de mineral a partir de concentrações de Th e K medidas por espectrometria da radiação gama natural. Esta carta proposta por Schlumberger tem sido muito útil em vários trabalhos de mineração e ilustra como são identificadas as principais associações minerais presentes nas rochas a partir desses dois elementos.

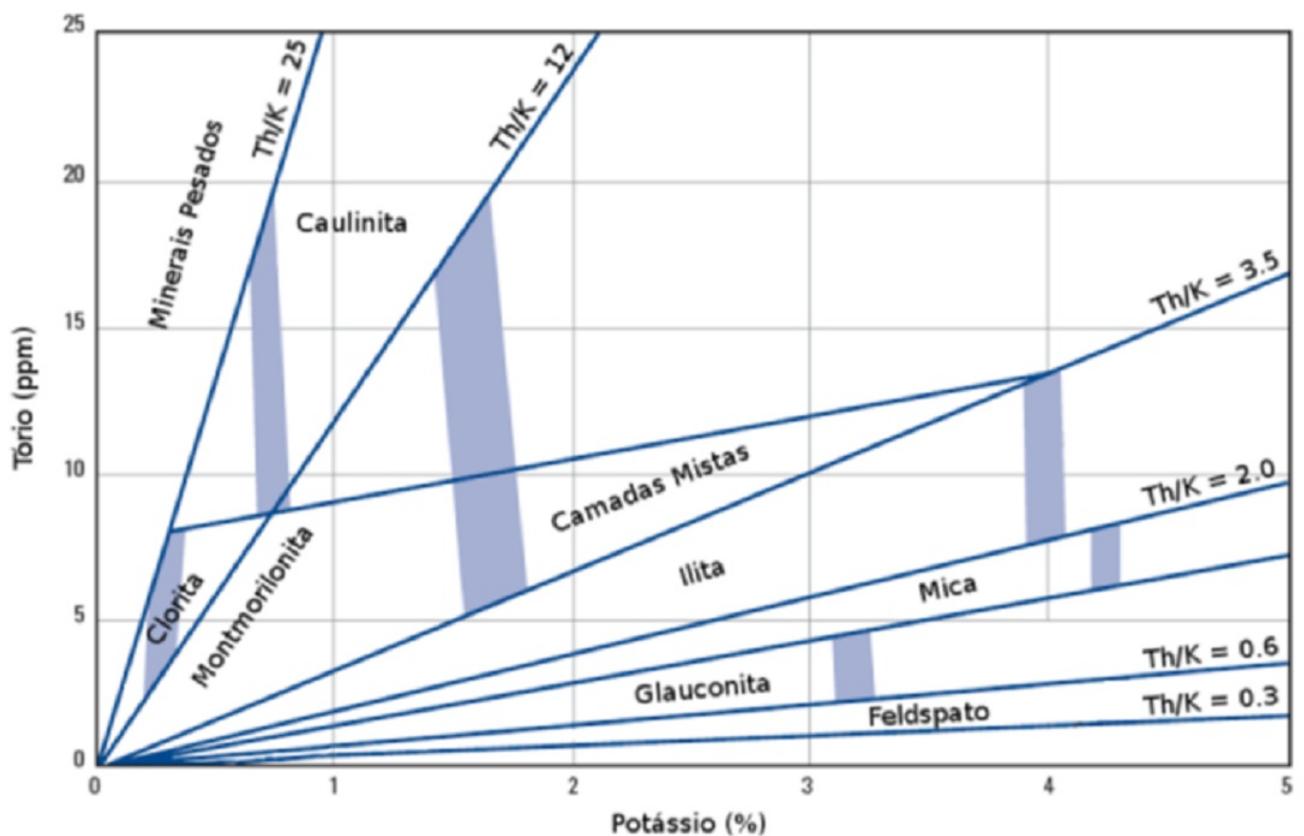


Figura 2.9: Carta Litológica com as associações de argilomineral a partir da razão Th/K, adaptada de Schlumberger (1986).

Capítulo 3

Descrição Geológica e Experimental

Após a exposição da fundamentação de todos os conceitos e modelos envolvidos na nossa pesquisa, passaremos à parte de caracterização experimental dos métodos utilizados neste trabalho. Em primeiro lugar, iremos descrever a localização e as características geológicas das minas Los Cóndores e La Carolina. Posteriormente, serão apresentados os procedimentos de coleta e análise de amostras, bem como das medidas *in situ*.

Este trabalho envolveu a participação de três instituições de pesquisa. Assim, a preparação de amostras de rochas e análises utilizando a técnica de espectrometria gama foi realizada no Laboratório de Radioecologia, doravante LARA, do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense. A análise das concentrações de radônio e medidas gama com a utilização de dosímetros termoluminescentes foi realizada pelo Laboratório de Dosimetria do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Já as medidas com monitores gama do tipo Geiger-Müller foram realizadas pelo LARA e pelo *Grupo de Estudios Ambientales*, doravante GEA, da *Universidad Nacional de San Luis - UNSL* (San Luis, Argentina). Os trabalhos de campo contaram com a participação das três Instituições.

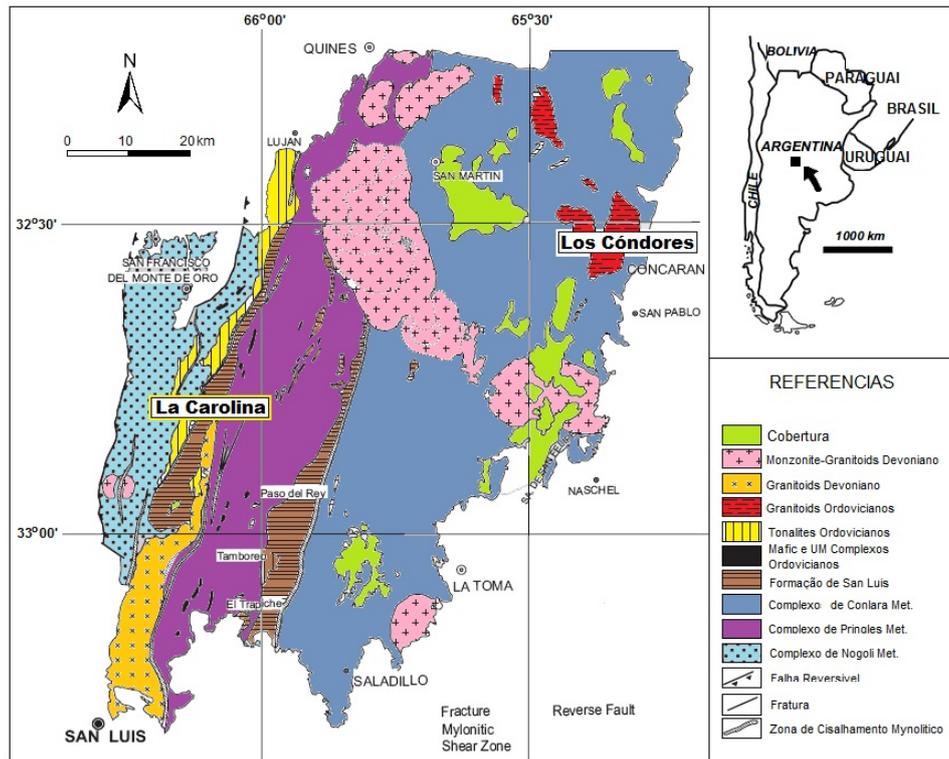


Figura 3.1: Mapa geológico da região de estudo na Argentina (modificado de López de Luchi et al., 2003).

3.1 As minas e suas características geológicas

As regiões de mineração de tungstênio e ouro da Argentina estão confinadas no Pampa, localizada na faixa norte-sul, entre as latitudes 25° e 35° S e a cerca de 250 km a leste da Cordilheira dos Andes. São constituídas por um embasamento cristalino Pré-Cambriano - Paleozóico, rochas vulcânicas Terciárias, cascalhos do Plioceno e cobertura Quaternária (Miller e Singewald, 1919). Essa faixa está composta de gnaiss granítico e xistos e se estende de norte a sul, com destaque para oeste. Essas regiões rochosas foram invadidas durante sua formação geológica por granitos, acompanhado de formações de turmalina-pegmatitos, com veios de quartzo, minérios de tungstênio, ouro e outros metais (Rastall e Wilcockson, 1920). A Figura 3.1 apresenta uma ilustração geológica da área de estudo.

As rochas que constituem os veios de ouro são formadas por rochas metamórficas, originadas na época Pré-Cambriana ou no início do Paleozóico, e muitos veios encontram-se paralelos à xistosidade. Como as rochas eruptivas jovens estão presentes somente em alguns distritos, a área de mineração parece estar relacionada com as rochas da idade Paleozóica, como parece ser o caso da extensão do Pampa de San Luis e de Córdoba. Auríferos de quartzo são o conteúdo principal dos veios, com os quais estão mais ou menos associados os auríferos de pirita. Sulfetos de cobre, chumbo e zinco estão presentes em quantidades menores. Assim, as paredes rochosas das minas são impregnadas frequentemente de auríferos de pirita. A maioria dos mineiros está confinada na zona enriquecida por oxidação, onde há a presença de ouro, sobretudo, em seu estado nativo (Miller e Singeward, 1919).

Um distrito importante para a mineração é La Carolina, na Província de San Luis, na encosta oeste do Cerro Tomolasta. Os depósitos desse lugar eram constituídos de um veio principal, com uma extensão norte-sul e uma inclinação de 50° a 80° a leste, incluindo vários veios paralelos, cobertos de placas pretas e cinzas amplamente impregnadas com pirita. A extensão da zona de mineração era de 125 m à 150 m (Miller e Singewald, 1919).

A mina de ouro La Carolina (32° 48' 0" S, 66° 60' 0" W) pertencia ao *West Argentine Gold Company*, uma empresa britânica que, em 1882, escavou um túnel de 380 m de extensão indo de leste a oeste da montanha Carolina, cruzando seus quatro veios principais. No total, cerca de 500 m de túneis foram escavados e várias saídas verticais foram feitas. Essa empresa esteve em operação até 1894, quando um desmoronamento do túnel principal matou 30 mineiros, resultando no fechamento da mina (Hoskold, 1904). Após o seu abandono, vários túneis secundários foram soterrados. Atualmente, essa mina encontra-se desativada para a mineração, mas ainda possui um túnel horizontal escavado para o interior da montanha, com apenas uma entrada principal (Figura 3.2). As fotos da Figura 3.3 nos oferecem uma

ilustração da estrutura e do trabalho de campo nessa mina.

Os principais depósitos argentinos de tungstênio estão situados, em boa parte, ao norte na província de Catamarca e ao sul, nas províncias de Córdoba e San Luis. Nessa região, encontravam-se distribuídas as minas argentinas mais importantes, localizadas na faixa da Sierra de Córdoba e da Sierra de San Luis. O principal minério extraído era rico em volfrâmio (tungstênio), mas também extraíam-se, em menores quantidades, scheelita, hubnerita e minério túngstico acompanhado por piratas, minérios de cobre, galena, bismuthinite, molibdenita, ocasionalmente, extraía-se cassiterita, e, em alguns lugares, notáveis quantidades de minerais nióbio e tântalo. O veio era principalmente de quartzo, às vezes, com mica branca e, ocasionalmente, de topázio e fluorita (Rastall e Wilcockson, 1920; Werner et al., 1998). Los Cóndores foi a maior mina de tungstênio da Argentina e a segunda da América do Sul, explorada por mineiros alemães e norte-americanos de 1898 à 1965.

A mina Los Cóndores está situada na Serra de San Luis, perto de uma pequena cidade chamada Concarán, na Província de San Luis ($32^{\circ} 33' 25''$ S, $65^{\circ} 15' 20''$ W). Ela foi aberta de um lado da montanha e trabalhada por galerias. O nível do túnel principal (nível 0) era composto por uma série de falhas, que exigiram vários desvios transversais. Como o minério precisava ser levado de baixo para cima da montanha, foi construída uma saída vertical no fim desse túnel principal, com uma altura de 90 m. No local foi instalado um sistema de elevadores para a retirada dos minérios. Após o seu abandono, várias galerias secundárias foram soterradas. Atualmente, o que resta da mina aparece como um túnel principal (nível 0) de 450 m com um eixo vertical no final deste ducto. A Figura 3.4 mostra a ilustração topográfica da mina Los Cóndores e a Figura 3.5 com algumas fotos da mina nos dá uma ilustração da sua estrutura e do trabalho de campo no local.

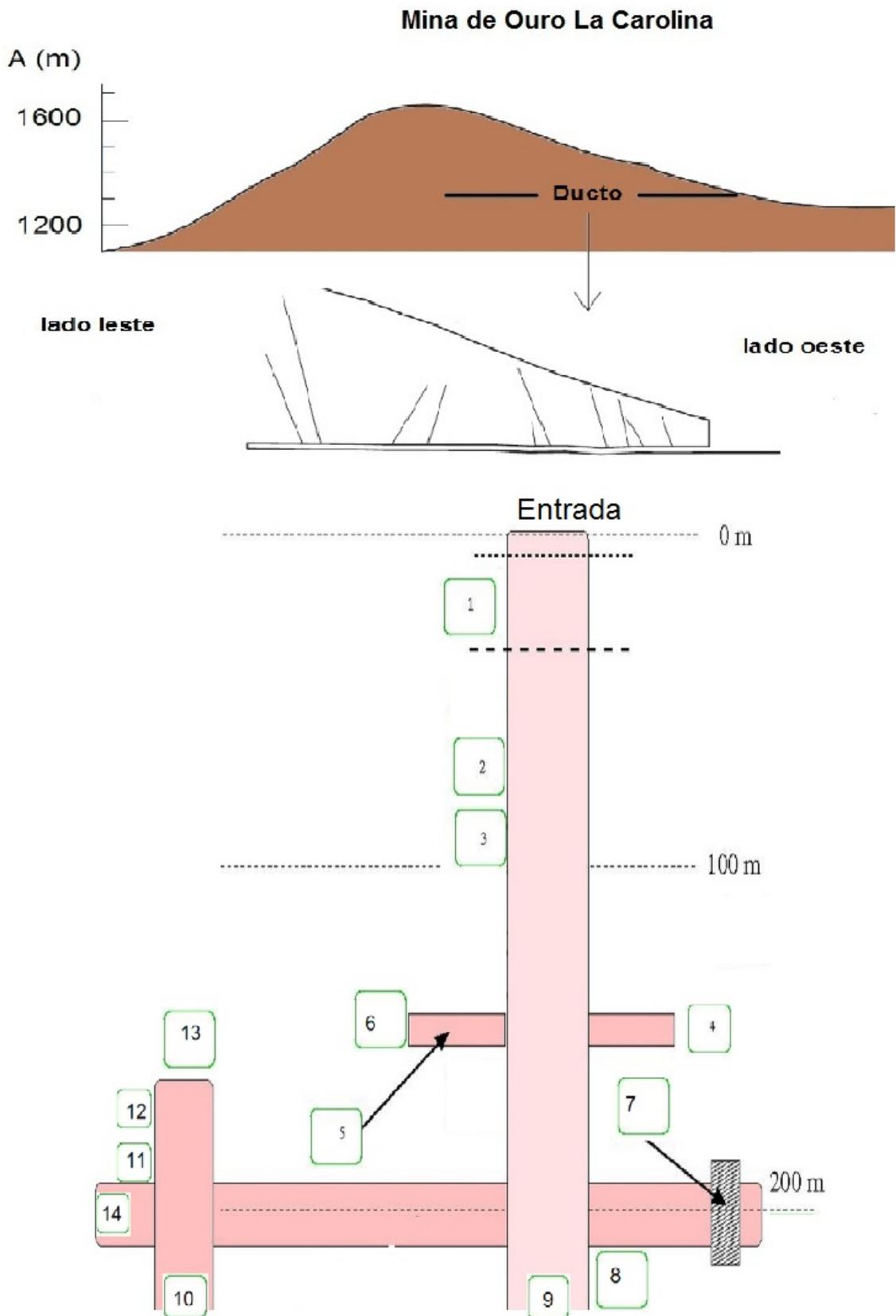


Figura 3.2: Topografia ilustrativa da mina La Carolina e o diagrama da disposição dos detectores durante as medidas de verão.



Figura 3.3: *Fotos ilustrativas da mina La Carolina e da disposição dos detectores.*

3.2 Procedimentos Experimentais

Quatro diferentes metodologias experimentais foram utilizadas neste trabalho. A distribuição das atividades dos radionuclídeos naturais (^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U) foi determinada a partir de amostras de rochas coletadas ao longo do túnel principal das minas La Carolina e Los Condores, seguido de análise em laboratório via técnica de espectrometria gama. A taxa de dose gama externa devido aos radionuclídeos naturais presentes nas minas foi avaliada usando tanto dosímetros termoluminescentes (TLD's) quanto medidores portáteis do tipo Geiger-Müller (GM). As medidas de concentração de ^{222}Rn foram realizadas utilizando-se detectores plásticos de traços nucleares do tipo CR-39. Estas medidas foram realizadas entre 2008 e 2010.

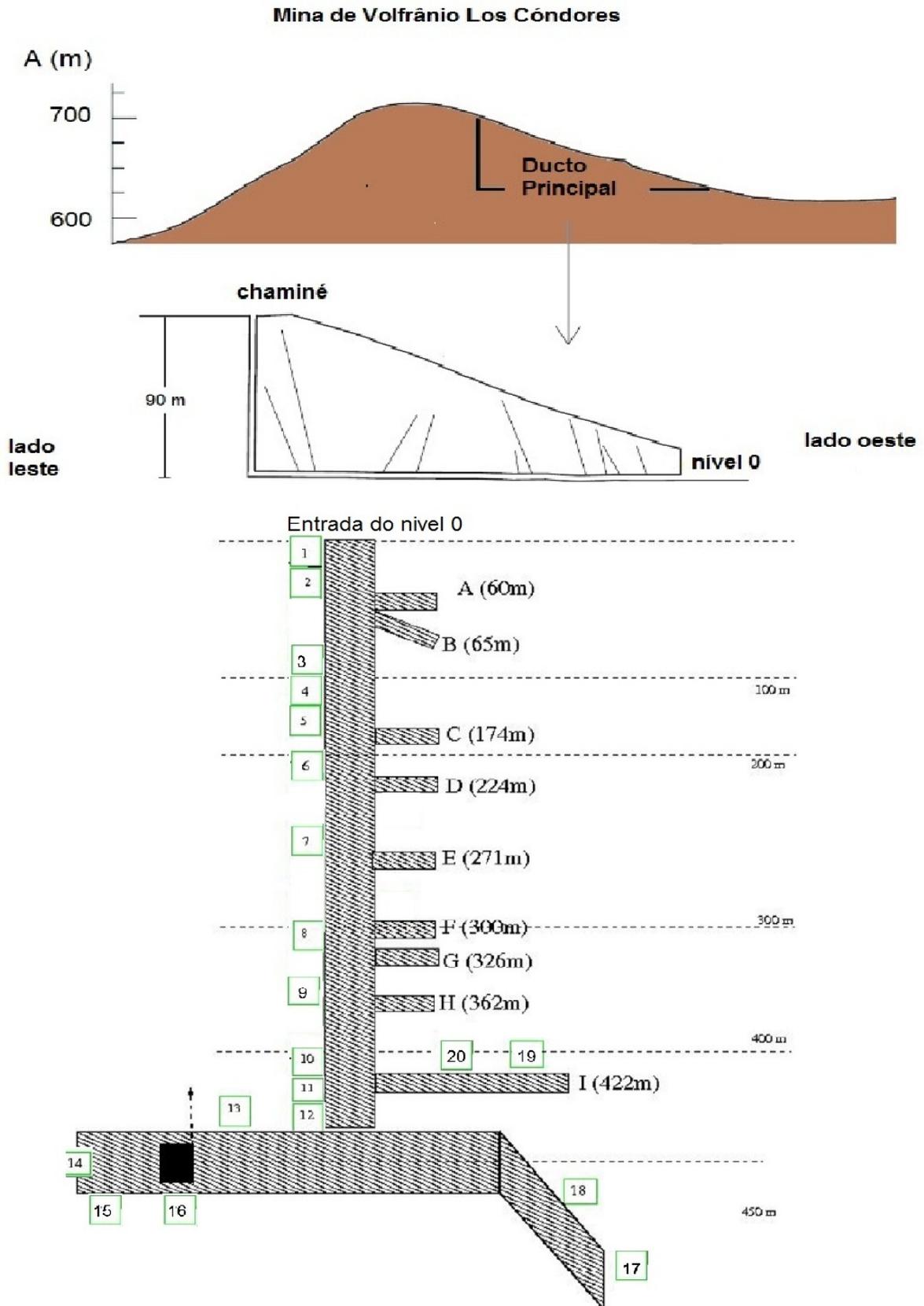


Figura 3.4: Topografia ilustrativa da mina Los Cóndores e o diagrama da disposição dos detectores durante as medidas de verão.



Figura 3.5: Fotos ilustrativas da mina Los Cóndores. À direita temos a foto do elevador desativado, que proporciona a saída vertical no fundo do seu túnel principal.

3.2.1 Medidas *in situ* e amostragens de rochas

Entre novembro de 2008 e fevereiro de 2009 foram realizados os primeiros trabalhos de campo relacionados a esta pesquisa. Era uma época de primavera-verão, quando podem ser observadas as temperaturas mais quentes do ano (em torno de 11° C) na região de San Luis.

As primeiras medidas foram realizadas na antiga mina de ouro de La Carolina. Assim, foram instalados detectores de radônio e dosímetros termoluminescentes (TLD), realizaram-se medidas *in situ* de taxa de dose gama e coletaram-se amostras de rochas. Os detectores de ^{222}Rn foram colocados em 14 locais do interior da mina, a uma distância de 20 cm das suas paredes e 1 m acima do solo, conforme ilustrado na Figura 3.2. Com a mesma configuração, foram instalados os dosímetros termoluminescentes, sendo que ambos ficaram expostos no interior da mina de La Carolina por período de 105 dias. Durante a instalação destes monitores foram coletadas cerca de 20 amostras de rochas que compunham as paredes das

galerias da mina. A seleção dos locais da amostragem foi feita com base em acessibilidade e de modo a abranger igualmente os túneis principais das minas. A análise das amostras tinha como finalidade avaliar o comportamento médio da distribuição de radionuclídeos naturais para cada mina. Também foram realizadas medidas de taxas de dose gama ao longo destas galerias com monitores do tipo Geiger-Müller (GM).

Entre novembro de 2009 e janeiro de 2010 foram realizadas as medidas na mina de tungstênio de Los Condores. Nessa mina, os detectores de radônio foram instalados em 20 locais, como ilustrado na Figura 3.4. O tempo de exposição foi reduzido para 42 dias, a fim de facilitar a análise dos traços no detector, já que os detectores CR-39 expostos em La Carolina mostraram densidade de traços muito alta, o que tornava mais difícil a sua análise em laboratório. Analogamente ao realizado em La Carolina, durante a instalação desses monitores, também foram coletadas cerca de 20 amostras de rochas que compunham as paredes das galerias da mina. Também foram realizadas medidas de taxas de dose gama ao longo destas galerias com monitores do tipo GM. Contudo, não foram feitas monitorações com TLD's, uma vez que os dados obtidos na mina La Carolina mostraram valores próximos entre as medidas via GM e TLD.

Finalmente, entre junho e setembro de 2010 foram realizadas as medidas de radônio no período de inverno em ambas as minas. Nesse trabalho de campo foram utilizados cerca de 20 monitores em cada uma das minas. As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam as ilustrações das disposições das novas medidas usando detectores CR-39 nas minas de La Carolina e Los Córdores, respectivamente. Para La Carolina, os detectores de CR-39 ficaram expostos por 34 dias, enquanto que em Los Córdores, ficaram expostos por 96 dias. O tempo para Los Córdores foi maior, baseado na observação das medidas do verão, as quais apresentaram menores valores de concentração de radônio.

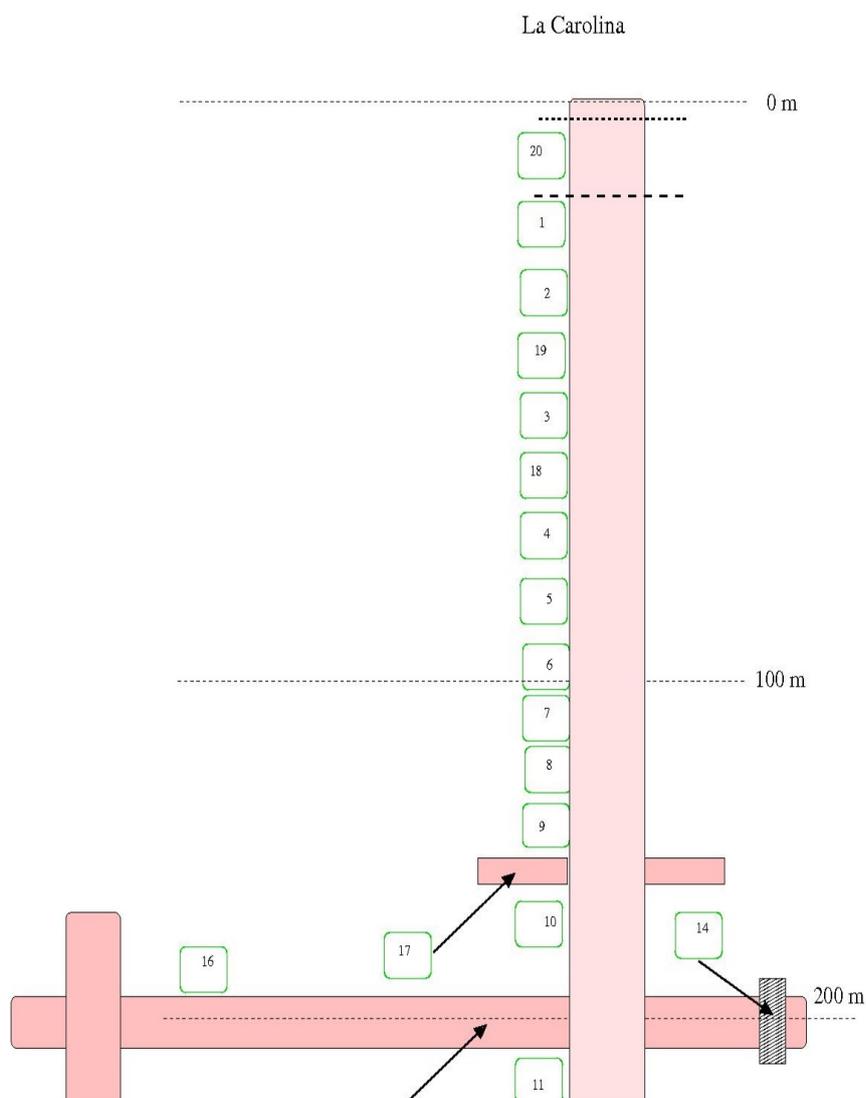


Figura 3.6: Diagrama da disposição dos detectores na mina La Carolina durante as medidas de inverno. O monitor 15 fica na passagem secundária próximo ao 16 e os monitores 12 e 13 ficam na continuação do 11.

Los Condores

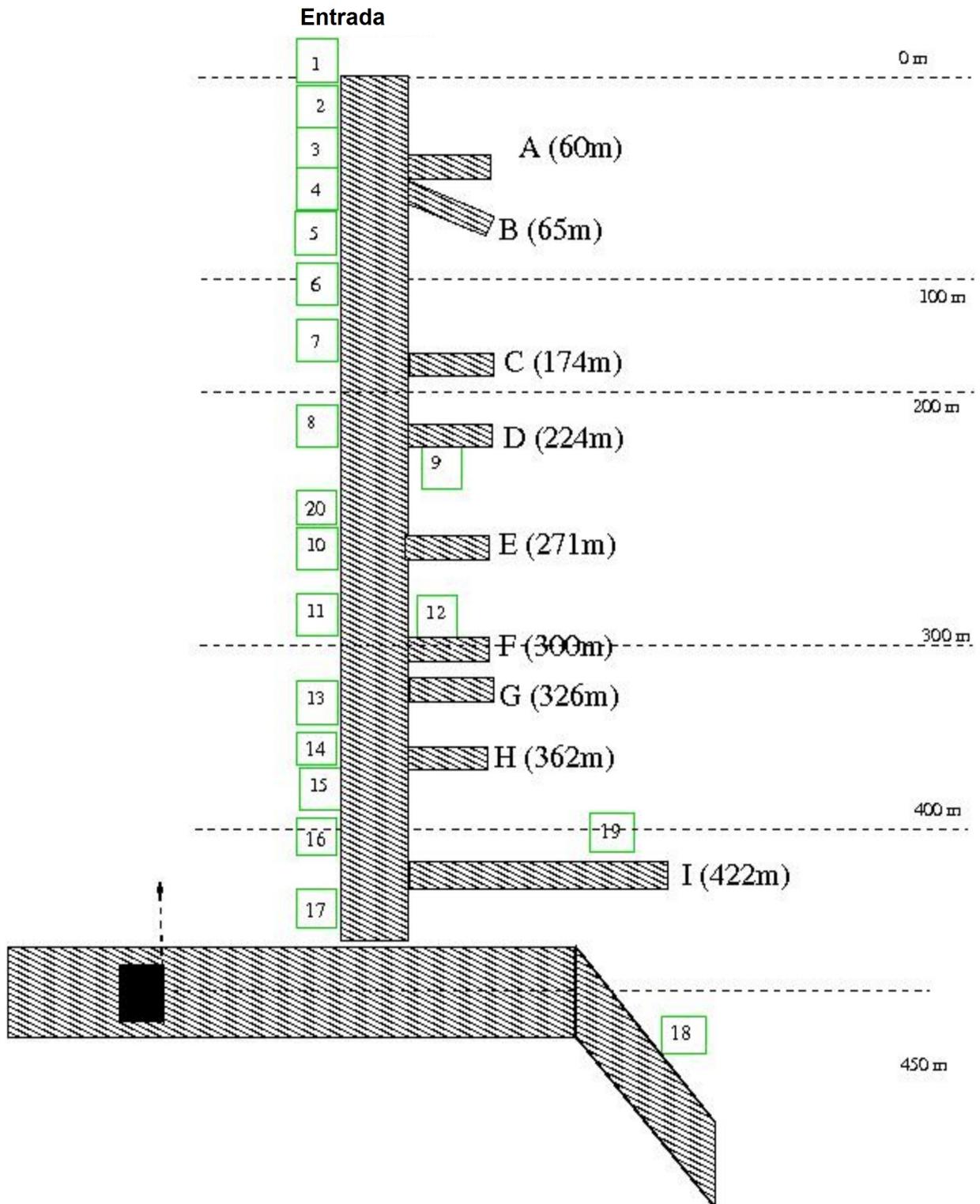


Figura 3.7: Diagrama da disposição dos detectores na mina Los Cóncores durante as medidas de inverno.

De forma paralela, obtivemos os seguintes valores para a temperatura por dados climáticos externos obtidos da *Red de Estaciones Meteorológicas* (<http://www.clima.edu.ar/app/Index.asp>), doravante REM, e medidas internas realizadas por nossa equipe durante a realização deste trabalho: temperatura média externa na mina La Carolina foi cerca de 15 °C no verão e 6 °C no inverno, e temperatura interna observada tanto no inverno quanto no verão foi de 16 ± 1 °C; temperatura média externa na mina Los Cóndores foi cerca de 20 °C no verão e 9 °C no inverno com uma temperatura interna anual em torno de 15 °C a 20 °C

3.2.2 Preparação das amostras de rocha

As amostras de rocha tinham cerca de 2 kg cada, mas usamos apenas 200 g para a medida após serem preparadas no LARA. O preparo consistiu, inicialmente, de pulverização com o auxílio de um moinho. Depois seus grãos foram homogeneizados, com o auxílio de uma peneira com tela de 1 mm, com o intuito de se remover lascas de rocha misturadas aos grãos. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 110 °C. Esse procedimento dura, em média, 24 horas. Tempo necessário para que a massa não varie mais, garantindo que toda a água fora retirada da amostra. Realizar esse procedimento para todas as amostras garante que os dados possam ser inter-comparados. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em potes cilíndricos com diâmetro de 6 cm e altura de 3 cm. Para tanto, foram utilizadas cerca de 150 g de amostra em cada pote ou recipiente. Em seguida, os potes foram pesados e lacrados. Em geral, é importante que essas amostras sejam armazenadas por um período de cerca de 45 dias. Isso é necessário para se atingir o equilíbrio do ^{228}Ra e ^{226}Ra com o ^{220}Rn e ^{222}Rn e seus produtos de decaimento de meia vida curta, respectivamente, presentes nas amostras, eliminando-se assim, fontes externas de isótopos de radônio que podem estar nos

recipientes, mas que não são realmente provenientes das amostras em estudo.

3.2.3 Medidas das concentrações de ^{232}Th , ^{238}U e ^{40}K

O arranjo experimental mais indicado para as medidas de concentrações ^{232}Th , ^{238}U e ^{40}K é aquele capaz de detectar o decaimento da radiação γ destes elementos. Este tipo de radiação pode ser detectada através de sua interação com cristais cintiladores ou com semicondutores. Neste sentido, o LARA possui dois tipos de detectores usados para a espectroscopia da radiação γ : um constituído de um cristal cintilador inorgânico de iodeto de sódio ativado com tálio ($\text{NaI}(\text{Tl})$) associado a uma fotomultiplicadora e outro de um material semiconductor composto por germânio hiper-puro (HPGe).

Em linhas gerais, o aparato experimental é composto de uma blindagem de chumbo, um detector com sua eletrônica associada e um sistema de aquisição de dados, que consiste em uma placa de aquisição inserida em um micro-computador e gerenciada por um software específico. O detector fica posicionado no interior da blindagem, bem como a amostra a ser medida.

A função da blindagem é minimizar a quantidade de contagens proveniente da radiação γ de fundo e, conseqüentemente, evidenciar o conteúdo das amostras. Suas paredes são compostas de uma camada externa de chumbo e de uma camada interna de cobre. Sua tampa possui uma espessa camada de chumbo também revestida com cobre. A camada de cobre minimiza os efeitos do Backscattering nas paredes da blindagem. Para realizar as medições de radiação γ das amostras deste estudo, foi utilizado um detector de HPGe, modelo GX5522 da CANBERRA, acoplado a uma blindagem de ultra low-background para detecção da radiação. A Figura 3.8 apresenta uma ilustração deste detector. Trata-se de um detector semiconductor e a condução nesses materiais está relacionada com a energia de excitação



Figura 3.8: *Imagens da blindagem de chumbo e do detector de HPGe utilizado no LARA.*

dos elétrons, ou seja, quanto maior a temperatura maior será a energia dos elétrons para superar o gap de energia e, com isso, mais elétrons serão promovidos da banda de valência à banda de condução. O material semiconductor é utilizado para detectar radiação, porque ao interagir com esse material, a radiação provoca a excitação dos elétrons que saem da banda de valência para a banda de condução, que sob a influência de um campo elétrico, resultam em um pulso que é detectado. Como o germânio possui um gap relativamente pequeno, existe grande probabilidade de haver excitação térmica, gerando ruído térmico no detector. Para reduzir esse efeito, o detector deve ser operado a baixas temperaturas e, normalmente, utiliza-se nitrogênio líquido para resfriá-lo, pois sua temperatura é de 77 K (Canberra, 2003; Knoll, 1979).

A calibração do sistema foi realizada utilizando material de referência da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) para medidas de K, U e Th: RGK-1, RGU-1

e RGTh-1, respectivamente (IAEA, 1987). O padrão de potássio (RGK-1) é um sulfato de potássio extra puro com 44,8% de K e, com quantidades de urânio e tório menores do que 0,001 e 0,01 ppm (partes por milhão), respectivamente. O padrão de urânio (RGU-1) é composto de minério de urânio diluído e sílica a concentração de 400 ppm de U. As quantidades de K (menor que 20 ppm) e Th (menor que 1 ppm) neste padrão são desprezíveis. O padrão de tório (RGTh-1) é composto de minério de tório diluído em sílica a concentração de 800 ppm, contendo alguma quantidade de U (6,3 ppm) e K (0,02%).

A calibração em energia do NaI(Tl) foi realizada na faixa de 0,5 a 3 MeV. As seguintes emissões de fótons foram identificadas como pico de energia no espectro: ^{40}K (1460,8 keV), ^{214}Bi (609,3, 1120,3 e 1764,5 keV) e ^{208}Tl (583,2 e 2614,5 keV).

As atividades absolutas de ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th das amostras medidas no HPGe foram determinadas diretamente a partir das contagens presentes nos picos associados às emissões gama de ^{40}K (1460,8 keV), ^{214}Bi (1764,5 keV) e ^{208}Tl (2614,5 keV), respectivamente, e a partir das atividades presentes nas amostras de referência (Anjos et al., 2005, 2006, 2010a). Para tanto foi utilizado o método relativo, o qual só é válido para amostras e padrões preparados na mesma geometria e medidos no mesmo sistema de aquisição. Assim, a atividade absoluta é dada por:

$$A_D = A_P \left(\frac{N_D - N_{FD}}{N_P - N_{FP}} \right) \quad (3.1)$$

onde A_D é a concentração de atividade em Bq kg^{-1} da amostra desconhecida, A_P a concentração de atividade em Bq kg^{-1} da amostra padrão, N_D o número de eventos ocorridos na formação de um fotópico em uma amostra desconhecida, N_P o número de eventos ocorridos na formação de um fotópico em uma amostra padrão, N_{FD} o número de eventos ocorridos na formação de um fotópico devido à contribuição de fundo para a amostra desconhecida e

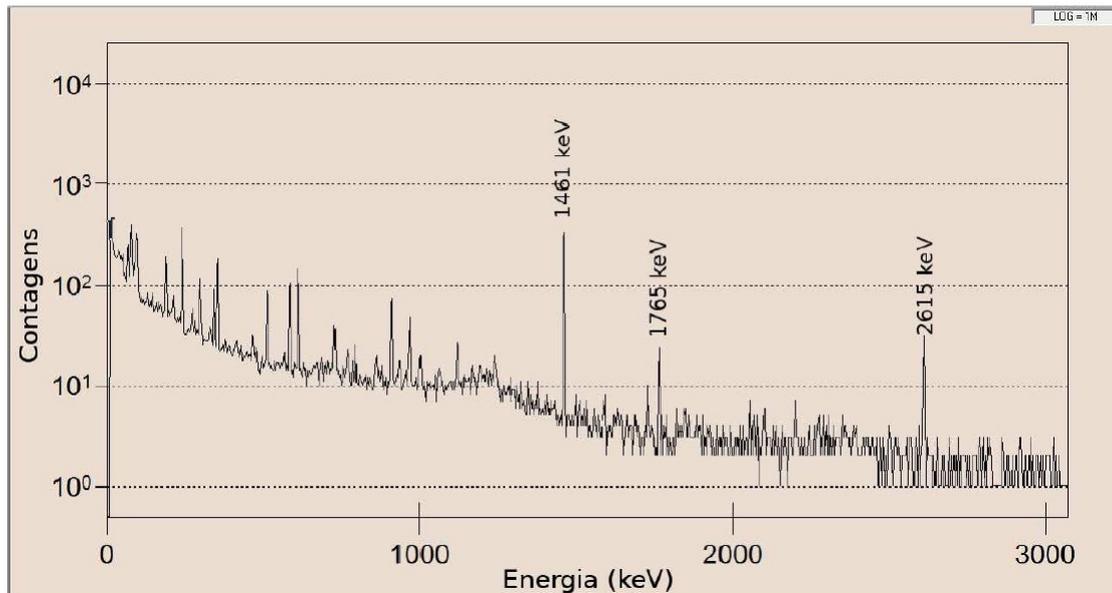


Figura 3.9: *Espectro de energia com 24 h de contagem de uma das amostras de rocha analisadas neste trabalho, medida no HPGe.*

N_{FP} o número de eventos ocorridos na formação de um fotópico devido à contribuição de fundo para a amostra padrão.

A boa resolução do detector HPGe pode ser observada na Figura 3.9 pelo espectro típico de uma amostra de rocha analisada, onde nota-se que os picos de interesse são bem separados.

Uma vez obtida a atividade absoluta de ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th numa amostra, suas concentrações são expressas em atividade por unidade de massa seca (Bq kg^{-1}). Com base nas considerações de abundância relativa dos elementos na natureza, as concentrações desses radionuclídeos terrestres são expressas em concentrações equivalentes, ou seja, K em porcentagem (%) e U e Th em partes por milhão (ppm). Portanto, se faz necessária uma correlação entre essas unidades e a atividade específica das amostras: cada 1% de potássio natural corresponde à uma atividade específica de ^{40}K igual a 317 Bq kg^{-1} ; atividade específica de uma amostra contendo 1 ppm de ^{232}Th e 1 ppm de ^{238}U natural correspondem, respectivamente, à 4,08 e $13,0 \text{ Bq/kg}$. Assim, unidades de massa permitem obter melhores

informações sobre o comportamento desses elementos radioativos. A unidade que expressa a massa em meios ambientais para solo ou rochas é g/kg, essa também pode ser expressa como partes por milhão (ppm) da ordem de 10^{-6} , que é equivalente a microg/kg. Desse modo, a concentração de atividade (A), em Bq/kg, pode ser convertida em microg/kg, pela seguinte equação:

$$C = 7,56 \cdot 10^{-23} M_a T_{\frac{1}{2}} A \quad (3.2)$$

onde C é a conservação convertida para microg/kg, M_a a massa atômica do radionuclídeo em g/mol e $T_{\frac{1}{2}}$ a meia-vida do elemento em anos. No caso de K, utiliza-se a porcentagem por ser um elemento mais abundante, com uma ordem de grandeza de 10^{-2} , o que nos obriga a multiplicarmos a equação (3.2) por um fator 10^4 para que também possamos usá-la na conversão.

As incertezas associadas às medições realizadas neste trabalho foram determinadas a partir da propagação dos erros em todos os parâmetros envolvidos, tais como a determinação do número de contagens em um pico do espectro de energia, a massa e o volume das amostras, a calibração e o sistema de aquisição etc. Desse modo, para este trabalho, as incertezas nas medidas ficaram em torno de 4% para amostras medidas no HPGe.

3.2.4 Medidas das concentrações de ^{222}Rn

As medidas de radônio foram realizadas utilizando-se detectores plásticos de traços nucleares, do tipo CR-39, com $1,7 \text{ cm}^2$ de área e 0,9 mm de espessura, introduzidos em uma câmara de difusão de radônio, conhecidas como monitores tipo NRPB/SSI (Orlando et al., 2002). A Figura 3.10 apresenta uma ilustração destes dispositivos.

O monitor NRPB/SSI foi desenvolvido por pesquisadores do *National Radiological Protection Board* (NRPB) da Inglaterra. Trata-se de uma câmara de difusão construída



Figura 3.10: Monitor NRPB/SSI, câmara de difusão de polipropileno condutor com aproximadamente 5,5 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura, onde é introduzida a película de CR-39.

inicialmente de polipropileno que foi posteriormente substituído por um plástico condutor pelo *Swedish Radiation Protection Institute* (SSI) da Suécia. O monitor consiste em duas partes que se encaixam e montam a câmara de difusão. Uma das partes comporta-se como uma base e tem uma área rebaixada onde é colado o detector. A outra parte engloba um pequeno espaço (aproximadamente um cilindro de 14 cm^3) onde o radônio que se difunde para o interior é confinado. Esse monitor permite somente a difusão de ^{222}Rn para o seu interior, impedindo a entrada de seus filhos e de ^{220}Rn (Da Silva, 2005; Shweikani e Darrani, 1995).

A difusão do ^{222}Rn ocorre por pequenos espaços (“gaps”) entre as duas partes do monitor. A sua entrada ocorre exponencialmente com uma constante de crescimento muito maior que aquela do decaimento radioativo, dessa forma, após poucos minutos (aproximadamente 25 min) de exposição, a concentração de ^{222}Rn no interior da câmara equivale à externa. O tempo de difusão de isótopos de radônio no monitor é longo suficiente

para impedir a entrada de ^{220}Rn , e as ínfimas aberturas oferecidas pelos “gaps” também impedem a entrada de filhos de radônio para dentro do monitor (Orlando et al., 2002).

O polímero comercialmente conhecido como Columbia Resin 39 (CR-39) é o detector plástico de maior eficiência disponível atualmente e que apresenta o contraste ideal para visualização dos traços. É também o plástico que apresenta melhor resistência contra danos causados pelas condições ambientais e é totalmente amorfo, o que ajuda na regularidade dos traços. Neste trabalho foi utilizado o CR-39 da marca Lantrack com área de $1,7\text{ cm}^2$ e espessura de $0,9\text{ mm}$ (Da Silva, 2005). Assim, o CR-39 é bombardeado por partículas alfa emitidas pelo ^{222}Rn e pelos seus filhos, produzidos no interior do monitor, os quais devem se manter em equilíbrio durante o período de exposição.

A análise dos detectores ^{222}Rn foi realizada pelo Laboratório de Dosimetria do Departamento de Física Nuclear da Universidade de São Paulo. Os detectores plásticos de traços nucleares representam a técnica passiva mais utilizada para detecção de radônio e seus filhos. O princípio para detecção é baseado na formação do traço latente devido aos danos na estrutura molecular provocados pela passagem de partículas alfa, prótons, íons pesados ou fragmentos de fissão que incidem sobre o detector. A partir de um tratamento químico adequado, esse traço torna-se visível ao microscópio óptico, permitindo a contagem de traços presentes, conforme ilustrado na Figura 3.11. A principal medida pretendida em detectores plásticos é o número de traços observáveis por centímetro quadrado do detector, ou seja, a densidade de traços (Da Silva, 2005).

O monitoramento de ^{222}Rn é efetuado relacionando o número de traços existentes no detector com a concentração de emissores alfa presentes no ambiente, por meio de calibração em ambientes de concentração conhecida. O uso extensivo desse monitor por laboratórios europeus e a realização de inter-comparações permitiram a estimativa de um fator de

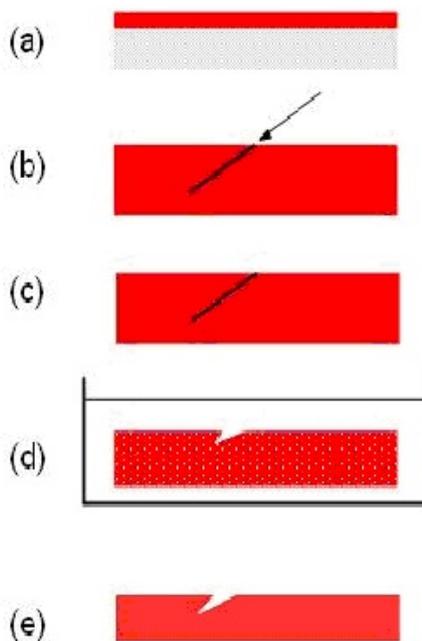


Figura 3.11: *Ataque químico e a formação de traço: (a) SSNTD; (b) incidência de partículas; (c) traço latente; (d) ataque químico; (e) traço.*

calibração médio e bem estabelecido para esta combinação de monitor e detector (Orlando et al., 2002). O fator de calibração relaciona a densidade de traços presente no detector com a concentração de ^{222}Rn no ambiente monitorado e o tempo de exposição.

Para determinar esse fator para nossas condições de medida e ataque químico, um grupo separado de monitores foi exposto à uma fonte de radônio (^{226}Ra de 96,57 kBq, modelo 2000A, Pylon Electronics Inc.) em uma câmara de 583 ± 3 L por determinado período de tempo, e o valor obtido foi de $2,8 \pm 0,2$ traços. $\text{m}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ kBq}^{-1} \text{ h}^{-1}$, próximo a valores já publicados (Orlando et al., 2002). A concentração de radônio na câmara foi averiguada com um detector célula de Lucas (modelo 110A, Pylon Electronics Inc.).

O detector foi calibrado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN-CNEN). Após o ataque químico (numa solução de KHO a 30% a 80 °C por 5,5 h) a densidade de traços no detector CR-39 foi determinada



Figura 3.12: *Ilustração do dispositivo Geiger-Müller utilizado neste trabalho.*

por um sistema semi-automático de análise de imagens, acoplado a um microscópio óptico (Da Silva e Yoshimura, 2005). A incerteza na medida da densidade de traços é estimada pela raiz quadrada do número total de traços dividida pela área total analisada.

3.2.5 Determinação da taxa de dose gama externa

Um medidor portátil de radiação gama do tipo Geiger-Müller (GM) foi utilizado para medições instantâneas da taxa de dose gama no interior das minas La Carlona e Los Córdores, como um monitor de área, calibrado dentro de uma precisão de $\pm 10\%$ de acurácia para taxas de dose ambiental equivalente $H^*(10)$ de até 100 mSv h^{-1} . Cerca de 200 medições, uniformemente distribuídas, foram realizadas nos ductos principais das duas minas. Durante as medições, o equipamento foi mantido a uma distância de 1 m acima do solo, essa distância é adotada porque as agências de saúde atestam que a maioria dos órgãos vitais do homem fica a 1 m do solo durante grande parte das atividades do dia. A Figura 3.12 apresenta uma ilustração do dispositivo GM utilizado.

Além dos monitores GM, dosímetros termoluminescentes (TLD's) foram utilizados neste

trabalho para a estimativa de taxas de dose, devido à radiação gama natural presente na mina de La Carolina. Assim, dois tipos de cristais termoluminescentes foram utilizados. Um deles é o fluoreto de lítio LiF:Mg,Ti, comercialmente conhecido como TLD100 da Harshaw Chemical Co., que se apresenta como um paralelepípedo com massa aproximada de 20 mg e dimensões de 3,0 mm × 3,0 mm × 0,9 mm. O segundo foi o fluoreto de cálcio natural (CaF₂) de cor verde de Santa Catarina, Brasil, que é a base das pastilhas P42. Elas são fabricadas no Laboratório de Dosimetria do IF-USP e têm forma cilíndrica de 5,0 mm de diâmetro e aproximadamente 0,9 mm de altura. São obtidas por prensagem a frio de uma mistura adequada de cristais de CaF₂ (60% em peso) e NaCl (40% em peso) pró-análise com granulação variando de 75 µm e 177 µm de diâmetro (Umisedo et al., 1990).

Cada monitor, protegido da luz solar e da umidade por uma placa de plástico preto, continha dois detectores do mesmo tipo, totalizando quatro TLD's dispostos em pares, um de cada par foi colocado entre dois filtros de 0,5 milímetros de Pb. A energia gama efetiva e a dose ambiental equivalente de cada monitor foram determinadas pelo Laboratório de Dosimetria do IF-USP. O detector foi calibrado com uma curva obtida através da exposição de cada grupo de detectores a uma fonte de gama do ¹³⁷Cs e ⁶⁰Co com valores conhecidos de picos de energia no ar. Todos os detalhes técnicos desse procedimento para adquirir as doses podem ser vistos em Guimarães e Okuno (2003).

É importante comentar, o motivo pelo qual só nos preocupamos em obter medidas de dose gama no verão. A radiação gama é resultado da composição da rocha e da estruturação do local, assim, não há estudos que mostrem a variação desse tipo de radiação com a estação do ano, diferentemente do radônio, que tem grande influência sazonal e até diária.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

A partir dos temas já abordados, dentre os quais citamos a exposição dos principais conceitos, modelos e métodos a serem utilizados na interpretação dos fenômenos naturais contidos nos ambientes fechados e subterrâneos propostos, trataremos, pois, neste capítulo da exposição e compreensão dos resultados. Para isso, analisaremos os valores de concentrações de ^{40}K , ^{222}Rn , ^{232}Th e ^{238}U obtidos, aplicaremos o ^{222}Rn como um traçador ambiental de ambientes subterrâneos para a descobrir rachaduras em uma estrutura física e, por fim, estimaremos as taxas de dose natural a que as pessoas podem estar expostas ao frequentarem esses locais.

4.1 Radioisótopos naturais aplicados à caracterização ambiental

Conforme mencionado anteriormente, ambientes subterrâneos são armadilhas para o radônio, um gás nobre proveniente das séries de decaimento do urânio e tório, produzido continuamente em rochas e sedimentos. Assim, antes de aplicar os radioisótopos naturais

na caracterização de ambientes subterrâneos, é necessário relembrar e aprofundar alguns conceitos sobre a movimentação do radônio em uma mina. A Figura 4.1 apresenta uma ilustração dos processos de emanção, migração e exalação do radônio em rochas e sedimentos. O gás de radônio emana do interior das rochas com uma frequência que é influenciada por um grande número de fatores, como as características litológicas da rocha, as conjunturas estruturais (tais como falhas e fissuras), suas propriedades físicas e químicas, o modo de transporte (difusão ou fluxo de fluido) e influências atmosféricas, como precipitação, vento e temperatura (Sharma, 1997). O radônio nesses ambientes é geralmente transportado por fluxo de ar advectivo na região subterrânea e por difusão molecular (mecanismo dominante nos canais intergranular, capilares e pequenos poros). Já em poros e fraturas maiores, o fluxo de ar por advecção pode tornar-se importante ou mesmo dominante.

A heterogeneidade do material geológico é uma fonte de grande variação da quantidade e característica da difusão do radônio em um meio poroso. Mica e vermiculita, minerais em flocos, possuem uma formação que faz o coeficiente de difusão chegar a metade ou até a um terço do valor teórico. Minerais argilosos e xistos contêm proporções significativas de minerais em flocos, geralmente orientadas, de modo a impedir o movimento vertical. Eles retardam a difusão para uma extensão maior, se for comparado a um meio poroso com a mesma porosidade, mas composto por partículas esféricas (Cigna, 2005). O processo de transporte advectivo é mais relevante que a difusão molecular, porque concede ao ^{222}Rn a oportunidade de viajar grandes distâncias no subsolo antes da sua decadência. Esse tipo de fluxo existe, principalmente, por diferenças de temperatura entre a região do subsolo e o exterior (Da Silva, 2010).

Visando a investigação completa dos questionamentos mencionados, que vão se estreitar



Figura 4.1: Ilustração dos processos de emanção, migração e exalação do radônio em rochas e sedimentos.

na interpretação da concentração de radônio como traçador de fissuras e crateras em estruturas rochosas, ou a ausência delas, inicialmente serão abordados os resultados para as concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U obtidos nas amostras de rochas provenientes das minas La Carolina e Los Córdores, com o objetivo de caracterizar a sua formação rochosa.

4.1.1 As concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os valores das concentrações de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K encontrados nas amostras de rochas que constituem as paredes das galerias das minas de La Carolina e Los Córdores respectivamente. Esses valores sugerem que os minerais radioativos presentes nas amostras de rochas estão em baixa concentração, evidenciando, assim, a possibilidade de haver certa semelhança na formação rochosa destas minas. Analisando nossos dados postos no diagrama tório-potássio, ilustrado na Figura 4.2, obtemos informações

mineralógicas qualitativas sobre composição mineral das rochas que formam os túneis das duas minas, nota-se que as concentrações de Th (na escala em partes por milhão) e K (em percentagem) possuem uma relação direta. Isso permite que os dados sejam classificados em zonas ou clusters com valores distintos da razão Th/K, cada qual representando diferentes associações de minerais. Usando a Carta Litológica, proposta por Schlumberger (1986) na Figura 2.9 e que também se encontra disposta sobre os dados da Figura 4.2, é possível observar que o conjunto dos resultados experimentais obtido para a mina de tungstênio Los Córdones pode ser facilmente interpretado como um sistema montmorilonita-ilita e, a mina de ouro La Carolina como um sistema clorita-ilita-montmorilonita. Esses resultados confirmam que as rochas que compõem as duas minas possuem formações minerais semelhantes e, portanto, deveriam produzir taxas de dose parecidas, devido à exposição externa de partículas alfa e raios gama.

Tabela 4.1: Valores médios das concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U das amostras de rochas da mina La Carolina coletadas próximas aos monitores de radônio. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.2.

Monitor Referente	$^{40}\text{K}(\text{Bq kg}^{-1})$	$^{232}\text{Th}(\text{Bq kg}^{-1})$	$^{238}\text{U}(\text{Bq kg}^{-1})$
1	567 ± 32	40 ± 4	31 ± 4
2	558 ± 28	28 ± 3	19 ± 3
3	720 ± 40	46 ± 4	34 ± 4
4	1020 ± 50	60 ± 6	57 ± 6
9	320 ± 30	60 ± 6	45 ± 6
10	215 ± 20	19 ± 5	12 ± 2
12	1550 ± 100	85 ± 9	73 ± 7
14	250 ± 20	40 ± 6	35 ± 5

4.1.2 Taxas de dose devido à exposição externa de raios gama

As taxas de dose devido à exposição externa de raios gama dependem das concentrações dos radionuclídeos naturais presentes nas paredes das minas. A maior parte da radiação

Tabela 4.2: Valores médios das concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U das amostras de rochas da mina Los Cóndores coletadas próximas aos monitores de radônio. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.4.

Monitor Referente	$^{40}\text{K}(\text{Bq kg}^{-1})$	$^{232}\text{Th}(\text{Bq kg}^{-1})$	$^{238}\text{U}(\text{Bq kg}^{-1})$
1	1109 ± 66	43 ± 3	38 ± 2
3	550 ± 33	46 ± 4	31 ± 2
5	650 ± 39	25 ± 2	20 ± 1
7	930 ± 56	45 ± 3	64 ± 4
9	553 ± 33	31 ± 2	32 ± 2
12	1295 ± 78	49 ± 3	28 ± 2
14	819 ± 49	42 ± 3	30 ± 2
18	800 ± 48	37 ± 2	26 ± 2

gama provém, como já visto, de radionuclídeos terrestres. Uma vez que as concentrações de radionuclídeos naturais presentes nas amostras das paredes rochosas das minas La Carolina e Los Cóndores foram determinadas na seção 4.1.1, seus resultados podem ser comparados com as respectivas medidas de taxas de dose devido à exposição externa de raios gama.

Histogramas experimentais da frequência relativa da taxa de dose originária de emissores gama naturais presentes no ar dos túneis principais das minas La Carolina e Los Cóndores, utilizando um detector Geiger-Müller, são mostrados na Figura 4.3. Em cada histograma foi ajustado uma distribuição Gaussiana, para os quais os valores médios e os desvios de taxa de dose gama externa no ar ($X_c \pm \Delta X_c$) foram obtidos a partir da altura máxima da distribuição e de sua largura na metade de sua altura (*Full Width at Half Maximum* - FWHM), respectivamente. De acordo com esta figura, os valores da taxa de dose de radiação gama medidos no interior das duas minas apresentam o dobro dos níveis médios observados para a taxa de dose gama terrestre no ar em ambientes ao ar livre, uma vez que o túnel principal da mina La Carolina apresentou $X_c = 0,11 \pm 0,06 \mu\text{Sv h}^{-1}$ e o da mina Los Cóndores apresentou $X_c = 0,13 \pm 0,03 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Segundo o UNSCEAR (2000), o valor médio observado para a taxa de dose gama terrestre no ar em ambientes

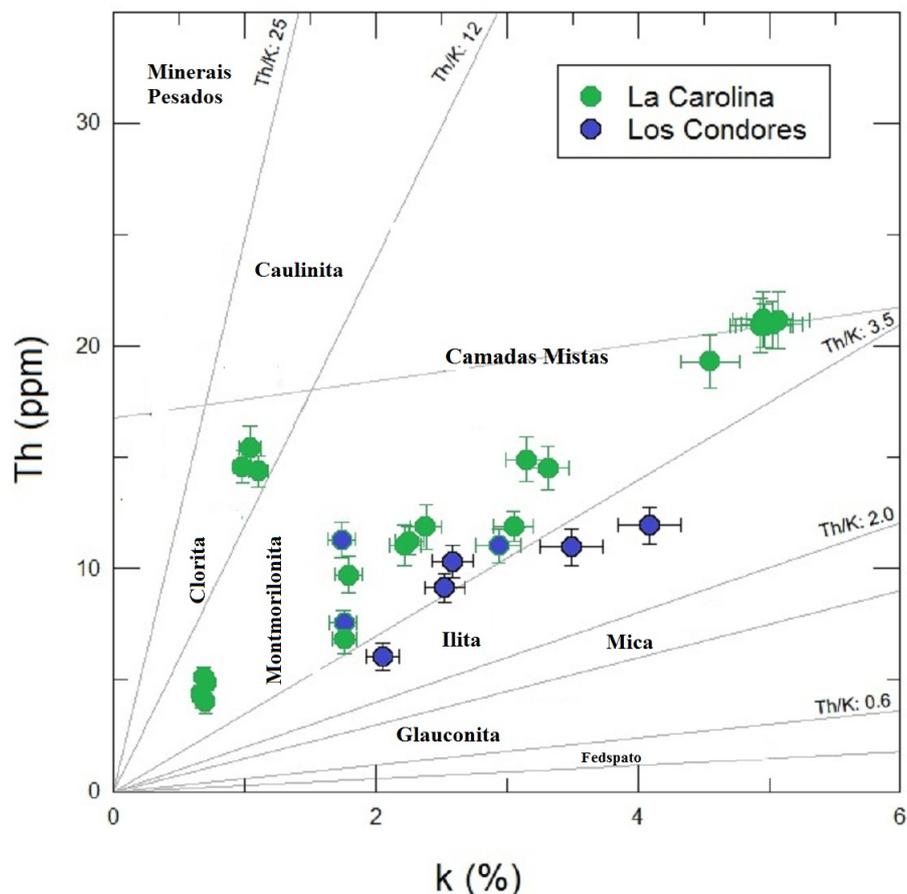


Figura 4.2: Correlações entre tório e potássio contidas nas amostras de rocha da mina La Carolina e Los Córdores.

abertos é de $0,5 \text{ mSv y}^{-1}$ ou $0,06 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Porém, nota-se que os valores de taxas de dose nas duas minas são ainda baixos e muito semelhantes, confirmando a hipótese apresentada na secção 4.1.1 de que as rochas que compõem as duas minas possuem baixas concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U e com formações minerais parecidas. Esse resultado sugere, então, que qualquer variação que possa vir a ser observada nos valores das concentrações de radônio nessas minas é proveniente de suas propriedades físicas como ventilação e pressão. Uma vez que elas possuem formações geológicas semelhantes, a mesma quantidade de radônio deveria ser emanada no interior de ambas as minas. Assim, o fluxo de gases, proveniente de suas taxas de emanção e suas velocidades de ventilação nestes ambientes fechados, deve

ser um fator importante. Por fim, poderia se questionar a irrelevância da radiação gama sendo essa o dobro da média ao ar livre, mas vale dizer que ao relento nós só recebemos radiação cósmica e do solo, com isso, ao entrarmos em um local fechado com paredes como importantes emissores gama, teremos, facilmente, o dobro encontrado nas minas, o que o torna insignificante.

4.1.3 As concentrações de ^{222}Rn nas minas

A ventilação é o fator ambiental dinâmico que se mostra na literatura como grande responsável pelas constantes variações do radônio nas minas. Até as mudanças de temperatura sazonal ou diária, causará, em última análise, alterações no sentido e no módulo da velocidade dos ventos desses lugares subterrâneos, empurrando ou expulsando o gás decaído (Sharma, 1997; Hakl et al., 1992, 1997). Então, nossa proposta é fazer o estudo da concentração do ^{222}Rn e do comportamento da ventilação de forma paralela, buscando sempre compreender como um influência no outro. Para isso, propusemos a utilização da equação (2.22), apresentada na seção 2.4, para resolver o modelo de um ambiente fechado formado por um material que emana radônio e, assim, relacionar a concentração de ^{222}Rn com o vento ao longo do comprimento da mina, através da taxa de ventilação, cuja unidade é h^{-1} . Mas, conforme apresentaremos, usamos as equações expostas pelo Atkinson *et al.* (1983) para obter aproximações do comportamento da concentração do gás, à medida que nos distanciamos de uma entrada. Essas equações contêm um termo chamado de velocidade de ventilação, cuja unidade é m/h. Apesar de ter praticamente o mesmo significado físico, a diferença nas unidades poderia atrapalhar possíveis comparações. Dessa forma, com a finalidade de acabar com essa diferença, pesquisamos uma relação matemática entre a velocidade de ventilação, o radônio e o modelo em ambientes fechados. Segundo o

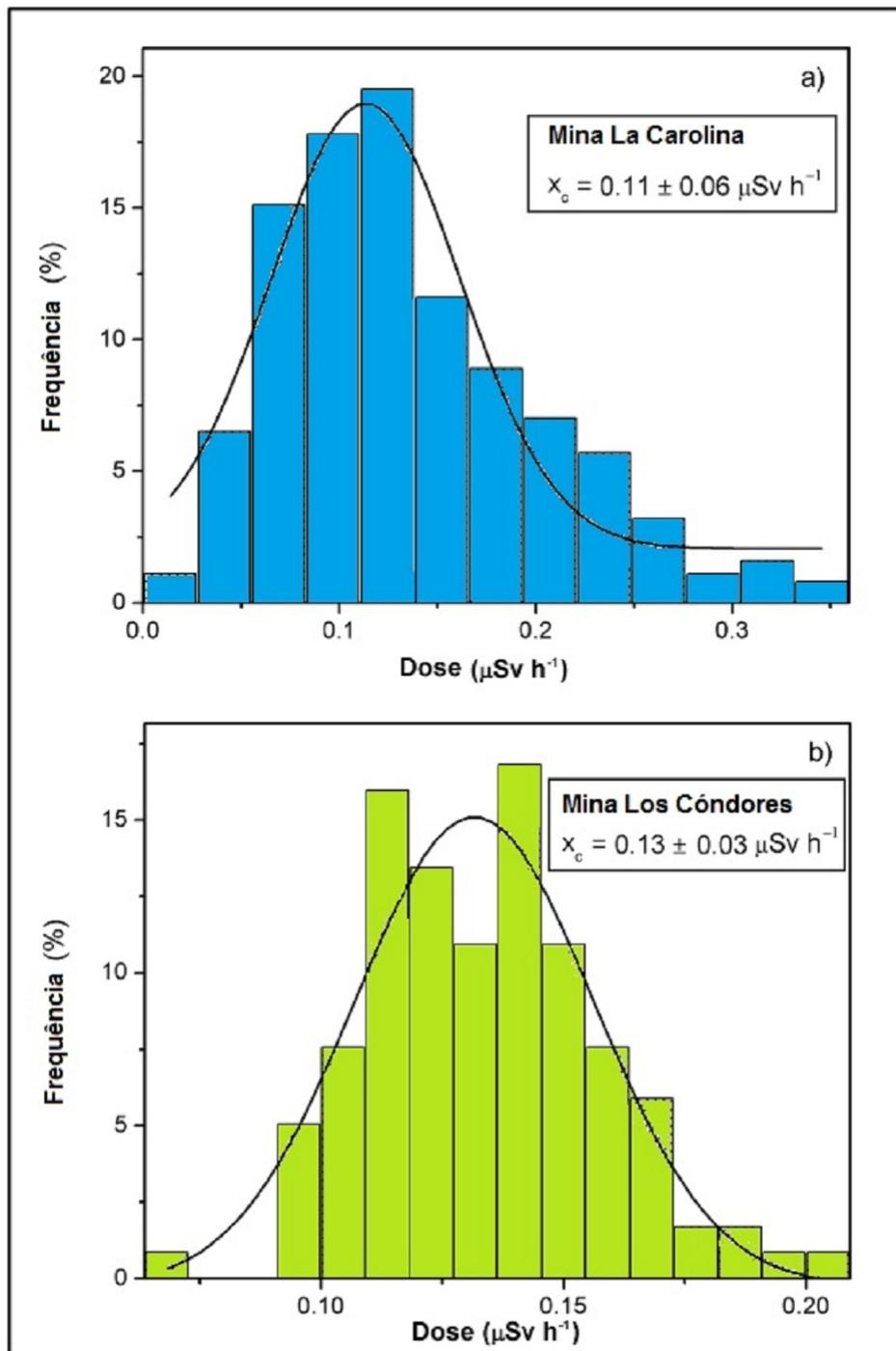


Figura 4.3: Histogramas experimentais da frequência relativa com a taxa equivalente de dose gama externa nas principais galerias de **a** mina de ouro La Carolina e **b** mina de volfrâmio Los Cóncores. As curvas sólidas representam os ajustes Gaussianos.

UNSCEAR (1982), a equação abaixo é proveniente do mesmo modelo da caixa retangular e com a possibilidade de ser aplicado em minas tubulares em condição de independência temporal e espacial:

$$C_{Rn} = \frac{E_x h L + A_k}{v_{fl}} + C_0 \quad (4.1)$$

onde E_x é a taxa de atividade exalada de radônio por unidade de área das rochas (Bq m⁻² h⁻¹), h a largura da mina (m), L o comprimento (m), \dot{A}_k a taxa de radônio emanado de uma determinada fonte dentro da mina (Bq h⁻¹) (geralmente, o termo \dot{A}_k , que é acrescido a idéia da concentração externa do radônio representada por C_0 no modelo da caixa, se torna importante no caso de colocarmos água enriquecida com radônio no interior da mina) e v_{fl} a velocidade do fluxo de ar no interior do lugar (m³ h⁻¹). No entanto, \dot{A}_k pode ser desconsiderado, pois não teremos a existência de uma fonte alta de radônio. Assim, podemos resumir a equação (4.1) em:

$$C_{Rn} = \frac{E_x h L}{v_{fl}} + C_0 \quad (4.2)$$

Isolando v_{fl}

$$v_{fl} = \frac{E_x h L}{C_{Rn} - C_0} \quad (4.3)$$

Porém, precisamos da velocidade da ventilação e não da velocidade do fluxo de ar na mina. Então, multiplicamos ambos os lados da equação (4.3) por $\frac{1}{A}$ (sendo A (m²) a área transversal do tubo retangular no qual representamos o ambiente) e definimos a velocidade de ventilação como $v = \frac{v_{fl}}{A}$. Isso nos permite escrever, a partir da equação (4.3), a seguinte expressão, capaz de relacionar, com certa confiabilidade, a velocidade de ventilação e a concentração de radônio:

$$v = \frac{1}{A} \left(\frac{E_x h L}{C_{Rn} - C_0} \right) \quad (4.4)$$

Retornemos neste momento ao estudo da concentração de ^{222}Rn em minas e de que maneira a mesma pode ser utilizada como traçador de entradas extras de ar. As medidas do radônio em La Carolina e Los Cóndores foram realizadas, primeiramente, durante a temporada de verão; além disso, foram feitas as seguintes observações: as diferenças de temperatura dentro e fora das minas eram parecidas e as paredes que compõem as duas minas apresentam, como demonstrado na seção 4.1.1, formações rochosas semelhantes. Então, esperava-se que as distribuições da concentração de ^{222}Rn para as duas minas fossem semelhantes. No entanto, os resultados revelaram que as distribuições eram bem diferentes e, uma modelagem mais detalhada dos processos de troca de ar entre as partes das minas deveriam ser levada em conta para compreender a variação espacial da concentração de ^{222}Rn . A diferença das distribuições e o desejo de analisar os efeitos sazonais para o radônio nos impulsionaram a fazer outras medidas durante o inverno. Com base nesses dois conjuntos de medidas, daremos continuidade a nossa investigação.

4.1.3.1 Mina de ouro La Carolina

Conforme apresentado na Figura 3.2, a mina de ouro La Carolina possui uma entrada principal com dimensão 2,0 m \times 2,3 m e um túnel principal com 250 m de comprimento. Não há a indicação de entradas secundárias e também não há evidências de fissuras ou crateras em suas paredes, o que indica que não ocorre outra comunicação com o exterior além da entrada principal. As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os valores obtidos para as concentrações de ^{222}Rn ao longo do ducto principal da mina La Carolina, medidas durante o verão e inverno, respectivamente. Observa-se que as concentrações de ^{222}Rn apresentam variações significativas ao longo de seu túnel principal nas duas estações do ano. Os valores mais baixos são observados perto da entrada principal da mina, enquanto que os mais elevados

estão situados no término de seu túnel principal.

De acordo com a Tabela 4.3, observa-se que no verão, a concentração de ^{222}Rn aumenta rapidamente logo a partir de sua entrada e que pode ser observada como uma subida de formato exponencial, conforme Figura 4.4. À medida que se avança para o interior da mina, essa concentração sobe mais lentamente, atingindo um platô na direção do final do ducto principal (ao redor do detector 11 da Figura 3.2). Nessa região, espera-se que a taxa de aumento do ^{222}Rn passe a ser equilibrada pelo seu decaimento radioativo. O comportamento descrito indica que a concentração pode ser representada pelo modelo em que um gás radiativo esteja confinado em um tubo fechado com apenas uma entrada e capaz de ser representado, então, pela equação (2.25). Ao analisarmos os dados da Tabela 4.4, nota-se que a concentração de ^{222}Rn no interior da mina La Carolina, durante o inverno, apresenta valores baixos e de comportamento constante numa região próxima a sua entrada principal. Isso significa que houve uma maior troca de ar na entrada da mina durante a estação de inverno, fazendo com que o acúmulo do gás radioativo seja menor nessa estação quando comparado com o comportamento observado no verão. Contudo, ao analisar a concentração de ^{222}Rn em direção ao interior do túnel principal, nota-se que a concentração volta a subir rapidamente a partir de cerca de 150 m da entrada principal. De acordo com a Figura 4.4, essa subida apresenta novamente um comportamento exponencial. À medida que se avança ainda mais para o interior da mina, a concentração do gás sobe mais lentamente, atingindo um platô na direção do final do ducto principal. Esse valor, no final, é semelhante ao valor observado no verão, indicando que realmente não deve haver grande circulação de ar no final do ducto principal, bem como as temperaturas nesse local devem ser equivalentes nas duas épocas do ano. Em relação ao comportamento do ^{222}Rn , no inverno, espera-se que ele também possa ser representado pela equação (2.25) a partir da distância $x_0 \approx 125$ m da

entrada principal da mina.

Assim, a equação (2.25) foi usada para ajustar os dados expostos nas Tabelas 4.3 e 4.4 a fim de obtermos uma descrição matemática para a concentração de radônio em função da distância da entrada da mina. O ajuste obtido, bem como os parâmetros encontrados, são apresentados na Figura 4.4.

Tabela 4.3: *Medidas de concentração de radônio da mina La Carolina feitas durante o verão. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.2.*

Distância da entrada(m)	Monitor	^{222}Rn (Bq m $^{-3}$)	Erro (Bq m $^{-3}$)
19,7	1	1760	140
85,5	2	3840	310
98,7	3	4580	370
118,4	4	4510	360
118,4	5	4530	360
131,6	6	5000	400
164,5	7	5190	420
164,5	8	5120	410
243,4	9	5600	450
276,3	11	5050	410
276,3	10	5310	430
282,9	12	5640	450
296,1	13	5750	460
309,2	14	6040	490

Os ajustes apresentados na Figura 4.4 foram feitos no programa Grapher 2007, colocando os parâmetros da equação (2.25) para variar. Assim, no verão obtemos os seguintes resultados: $C_{\infty} = 5700 \pm 200$ Bq m $^{-3}$ e $v = 0,52 \pm 0,1$ m h $^{-1}$. O $R^2 = 0,94$, dado calculado automaticamente pelo programa, o qual chamamos de desvio quadrático médio e nos mostra o quão bom é o ajuste, pois quanto mais $R^2 \rightarrow 1,00$, melhor será a aproximação matemática. Esse ajuste nos permite afirmar o quanto o modelo do tubo com apenas uma entrada é confiável para o caso de uma mina sem saídas. No inverno conseguiram-se os mesmos valores para a concentração do radônio no infinito e a velocidade de ventilação e

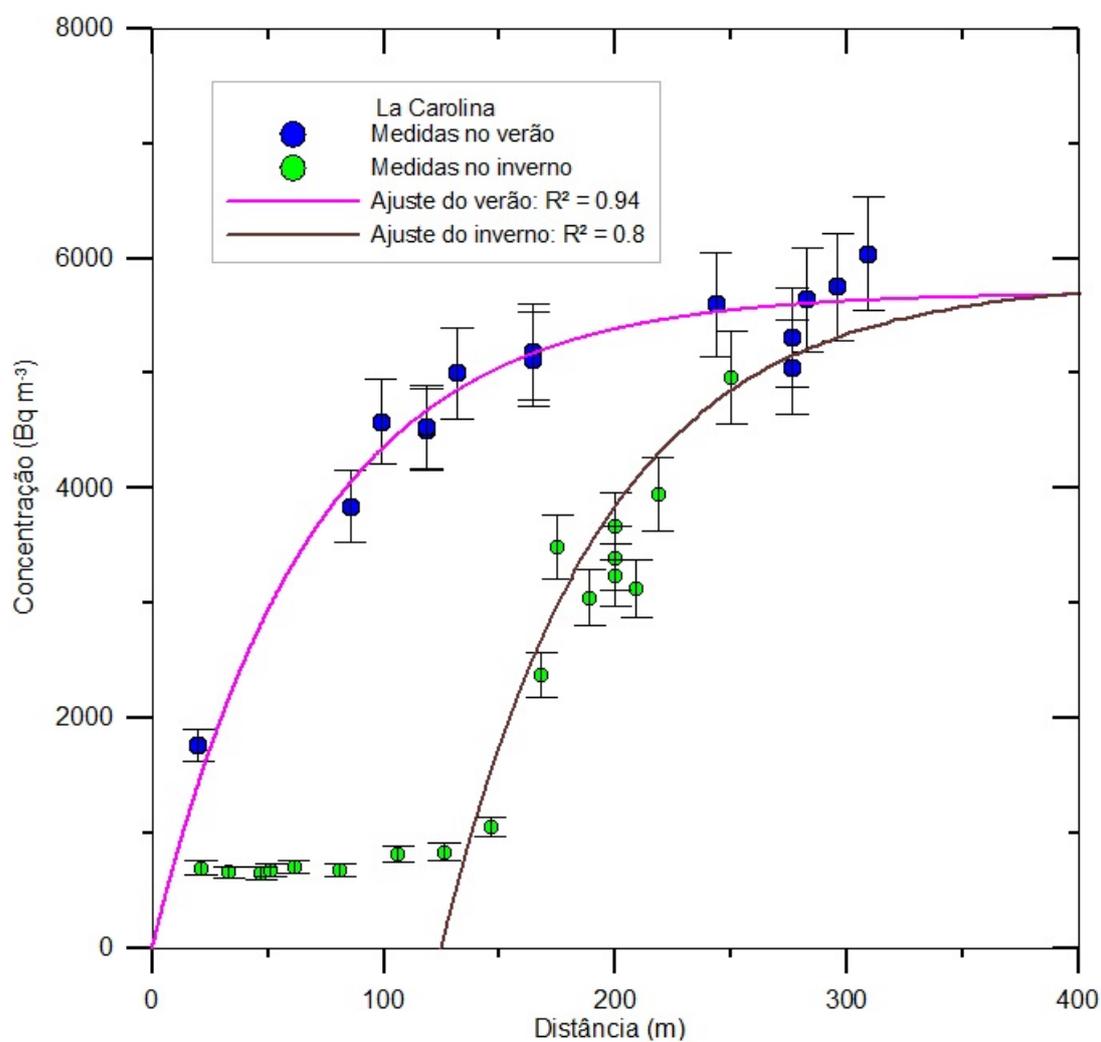


Figura 4.4: Concentração de radônio versus distância da entrada da mina La Carolina. Os pontos azuis e a linha rosa representam os dados e a aproximação vinda da equação (2.25) para o verão, respectivamente. Analogamente, os pontos verdes e a linha marrom têm a mesma representação para o inverno.

Tabela 4.4: *Medidas de concentração de radônio da mina La Carolina feitas durante o inverno. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.6.*

Distância da entrada(m)	Monitor	^{222}Rn (Bq m $^{-3}$)	Erro (Bq m $^{-3}$)
21	2	695	58
33	19	657	54
47	3	655	55
51	18	675	55
61	4	707	58
81	5	680	56
106	6	819	67
126	7	836	72
146	8	1056	86
168	9	2376	189
175	17	3488	281
189	10	3049	249
200	14	3392	279
200	15	3241	271
200	16	3672	292
209	11	3123	252
218,5	12	3952	321
250	13	4968	406

$R^2 = 0,8$. Mas, visando esse ajuste, fizemos duas considerações: os dados de concentração demoraram mais a iniciar a subida exponencial característica do modelo, só ocorrendo por volta de 125 m, então, retiramos os sete primeiros para fazer a curva marrom; percebemos que o ajuste do inverno estava deslocado em relação ao verão, logo, reescrevemos a equação (2.25) no formato abaixo:

$$C(x) = C_{\infty}(1 - e^{-\lambda(x-x_0)/v}) \quad (4.5)$$

com $x_0 = 125$ m.

Após analisarmos os dados do verão e do inverno observamos que as medidas de concentração de ^{222}Rn , cuja distância ultrapassa os 250 m (valor do comprimento do ducto principal de La Carolina), foram feitas em galerias secundárias e servem para reforçar o platô proposto no modelo utilizado e, os baixos valores da concentração de ^{222}Rn , observados até a

distância de cerca de 125 m da entrada da mina durante a estação de inverno (bem diferente do verão, que subia rapidamente), sugerem a ocorrência do aumento e inversão do sentido da ventilação no início da mina. Uma possível explicação é dada porque a temperatura externa é muito baixa em relação à temperatura interna, ocasionando a expulsão de uma maior quantidade de gás até a distância aproximada de 125 m. No verão, um comportamento oposto deve ocorrer, uma vez que se espera que a temperatura interna tenda a se igualar com a externa, provocando uma constância no vento na extensão da mina. Esse comportamento da temperatura pode ser confirmado com dados climáticos externos obtidos da REM e medidas internas realizadas por nossa equipe durante a realização deste trabalho. A temperatura média externa foi cerca de 15 °C no verão e 6 °C no inverno, já a temperatura observada tanto no inverno quanto no verão no interior da mina La Carolina foi de 16 ± 1 °C. Assim, a interpretação da variação da concentração de ^{222}Rn , medida no inverno, é de que à medida que a taxa de ventilação da entrada da mina vai diminuindo ao se avançar para o interior da mina, a condição vista no verão volta a aparecer com a mesma subida exponencial e o mesmo platô como se a entrada da mina ficasse a 125 m de sua entrada real.

Paralelamente, estudamos o comportamento da velocidade de ventilação ao longo da mina através da equação (4.4). Para isso usamos $h = 2,0 \pm 0,2$ m, $L = 250 \pm 10$ m, $A = 2,0 \pm 0,2$ m \times $2,3 \pm 0,2$ m, $C_0 = 10 \pm 3$ Bq m⁻³ e $E_x = 5,5 \pm 1,0$ Bq h⁻¹ m⁻². Esse valor para a taxa de atividade exalada de radônio, por unidade de área e tempo, refere-se à média das taxas encontradas para as amostras de granito usadas no artigo de Anjos *et al.* (2011), pois as paredes das minas têm forte influências graníticas. A partir dos parâmetros citados e dos valores para a concentração de radônio nas Tabelas 4.3 e 4.4, foi construído o gráfico da ventilação em função da distância da entrada da mina, conforme mostra a Figura 4.5.

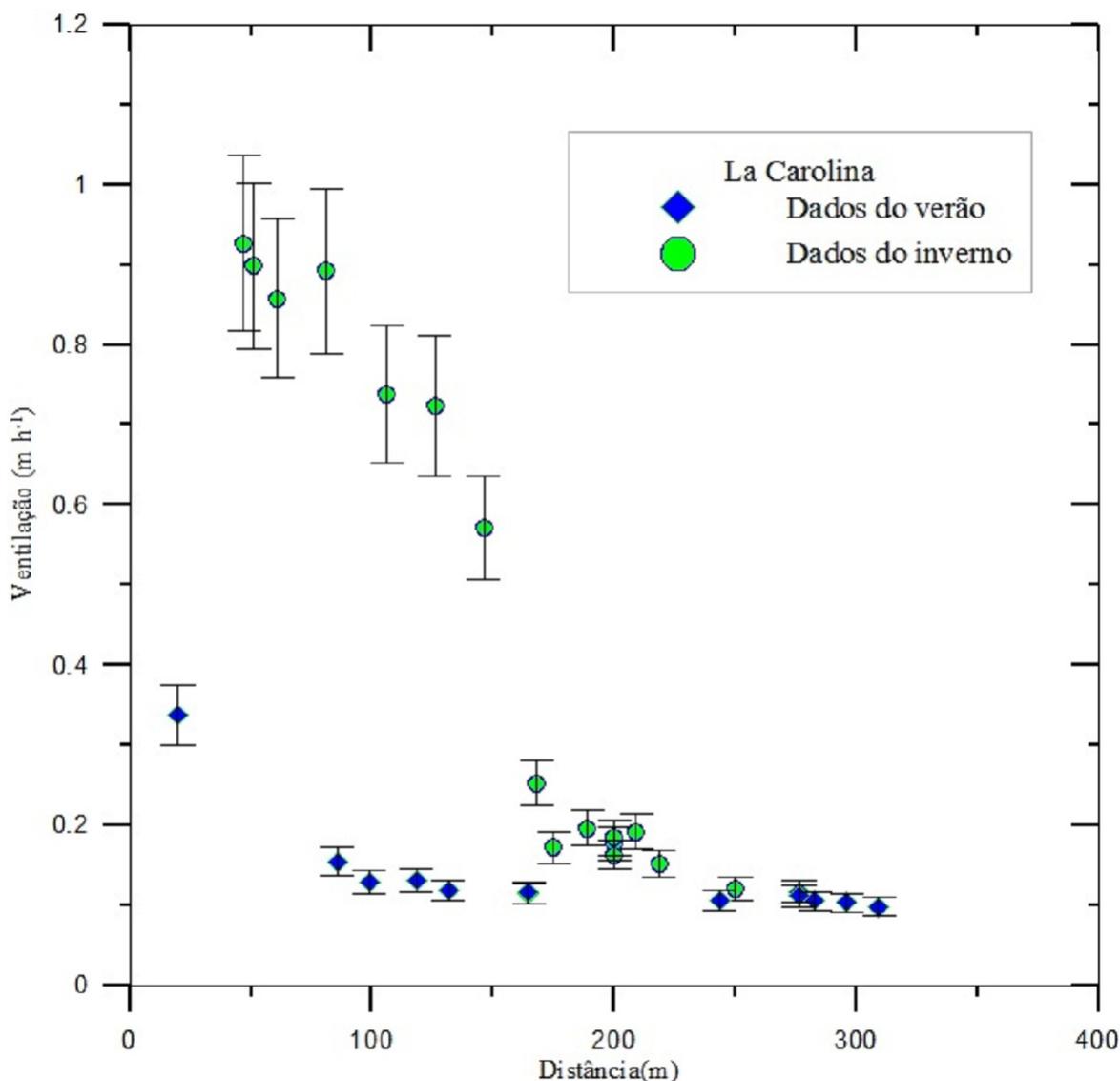


Figura 4.5: Velocidade de ventilação versus distância da entrada da mina La Carolina. Os pontos azuis são os dados do verão obtidos da equação (4.4) e os pontos verdes são do inverno.

A Figura 4.5 nos traz informações essenciais para compreenderem os fenômenos relacionados com a diferença na concentração de ^{222}Rn nas duas estações do ano. No verão, a velocidade de ventilação se mantém praticamente constante em toda mina La Carolina, tendo somente uma pequena subida perto da entrada. Essa característica é capaz de justificar a perfeição do modelo de um gás confinado em tubo aplicado para essa mina, pois, o mesmo prevê uma ventilação constante, fato que, acrescido pela ausência de crateras ou fraturas, completa todos os requisitos da teoria. Já no inverno, há um brusco aumento da velocidade

de ventilação e uma provável inversão do sentido do vento (porque a temperatura externa se torna bem menor que a temperatura interna), provocando a expulsão do gás. Os valores de velocidade mais altos duram até, aproximadamente, 115 m em relação à entrada, quando começam a decrescer e tendem a um valor constante (semelhante ao encontrado verão) no restante do ducto principal da mina. Esse decréscimo da velocidade ocorre justamente ao redor da posição, na qual conseguimos calcular o bom ajuste com relação a equação (2.25) para a concentração de ^{222}Rn e, por consequência, encontrar os mesmos parâmetros do verão. Por fim, é válido frisar que tirando a média dos valores utilizados para fazer a Figura 4.5, obtivemos $0,14 \text{ m h}^{-1}$ para o verão e $0,52 \text{ m h}^{-1}$ para o inverno, o que comparando ao $0,52 \text{ m h}^{-1}$ para a velocidade de ventilação vinda do modelo do tubo, ratifica a confiabilidade das nossas observações.

4.1.3.2 Mina de tungstênio Los Cóndores

Na mesma região e com características e origens geológicas semelhantes à La Carolina, podia-se esperar que a mina de tungstênio Los Cóndores apresentasse o mesmo comportamento para concentração de ^{222}Rn no seu interior. Esperava-se, pelo menos, uma leve queda no platô por conta da entrada de ar vertical no final da mina. Porém, outras características foram observadas. Antes de abordá-las, pode-se ressaltar que o radônio é influenciado por vários fatores ambientais, sendo a ventilação o preponderante entre os dinâmicos. Uma fissura ou fatura tende a provocar um brusco aumento na velocidade desse vento subterrâneo. Assim, demonstraremos que, adicionado ao efeito chaminé provocado pela entrada de ar no final da mina, a mina Los Cóndores apresenta uma entrada de ar vinda de uma rachadura.

A estrutura do túnel principal de Los Cóndores é um exemplo claro de ambientes

subterrâneos que tem aberturas para o exterior situadas em dois níveis diferentes, onde o fluxo de ar seria controlado pelos ventos do efeito chaminé. Como o ar no verão é mais frio no interior do que fora da mina, a pressão exercida pelo ar interno é maior que a pressão de fora da mina, fazendo com que o vento sopra para fora pela entrada inferior (nível 0 da Figura 3.2). Já no inverno, o fenômeno é invertido e o vento é empurrado pela entrada superior.

Em Los Cóndores, a variação das concentrações de radônio com a distância, sendo o zero colocado no centro do eixo vertical da entrada superior, é mostrado na Figura 4.6, conforme os dados expostos nas Tabelas 4.5 e 4.6. O eixo y do gráfico da Figura 4.6 é graduado em escala logarítmica para dar proporção das descidas da concentração de radônio nas estações, revelando que essa varia de forma irregular, ao contrário do padrão observado em La Carolina na Figura 4.4. É importante dizer que, apesar de termos colocados detectores em passagens secundárias, para esse estudo só consideramos os dados da passagem principal da mina.

A presença de uma entrada no fundo da mina Los Cóndores poderia explicar as concentrações de radônio, em geral, mais baixas na sua extensão em comparação à outra mina. No entanto, apenas nos primeiros 50 m em relação ao eixo vertical (C10 a C12) ocorreu esse comportamento, sendo assinalado pelos valores baixos ao redor dos detectores C9 e C6 (veja Figura 3.4).

De acordo com Atkinson *et al.* (1983), os recuos irregulares da atividade de ^{222}Rn poderiam ser interpretados como os efeitos de várias turbulências no ar devido às rachaduras na estrutura da mina. Portanto, a aplicação do modelo do tubo sem saída para a mina de Los Cóndores, como já mencionado no capítulo 2, seria uma simplificação excessiva e seu padrão de concentração é melhor explicado se considerados os fluxos de ar secundários e turbulentos. Isso é feito matematicamente pela equação (2.30), obtida para o modelo de

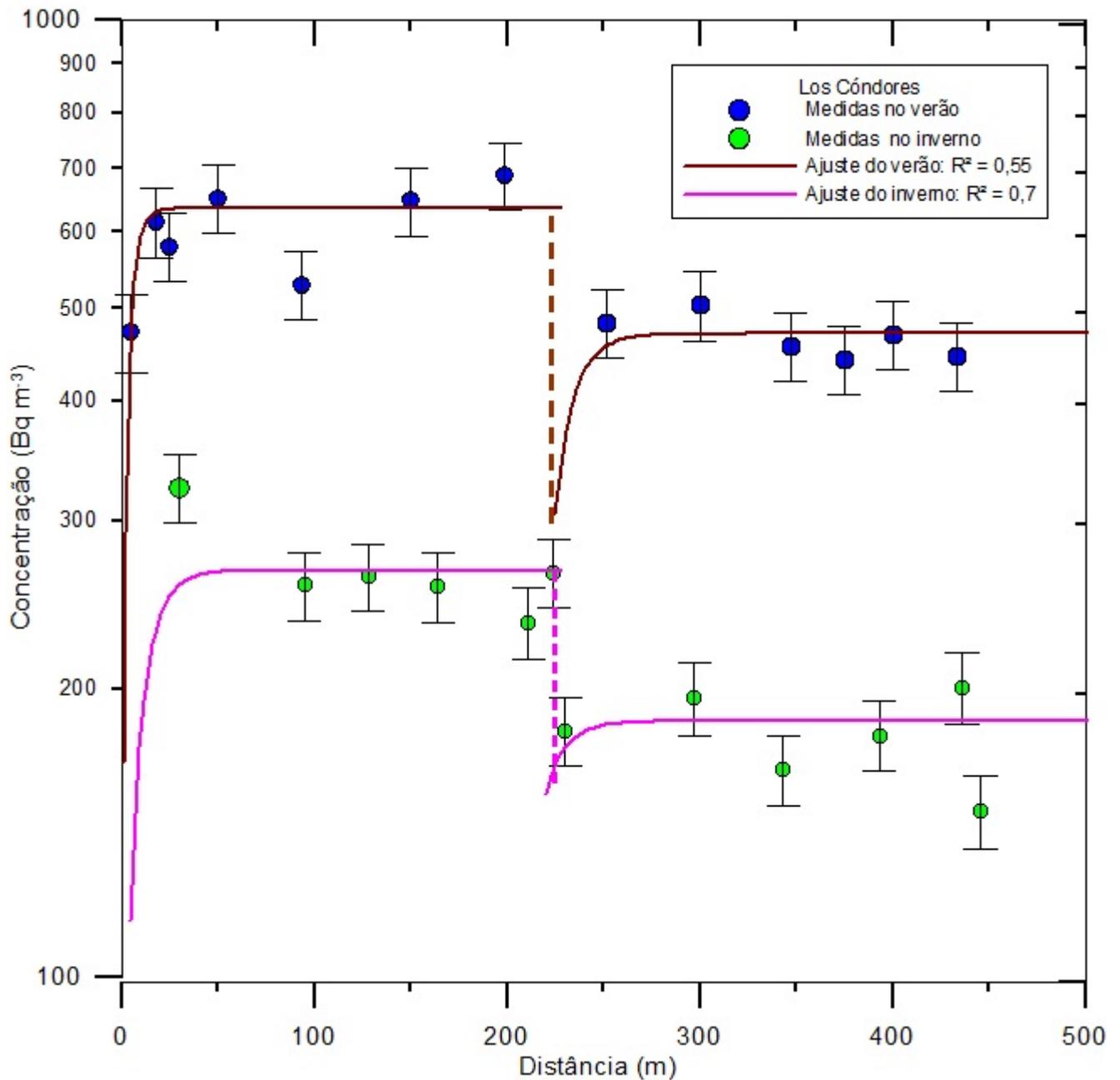


Figura 4.6: Concentração de radônio versus distância da chaminé da mina Los Cóndores. Os pontos azuis e a linha marrom representam os dados e a aproximação vinda da equação (2.25) em distâncias menores de 225 m e da equação (2.30) em distâncias maiores de 225 m para o verão, respectivamente. Analogamente, os pontos verdes e a linha rosa têm a mesma representação para o inverno. O eixo y do gráfico foi graduado em escala logarítmica para dar proporção das descidas da concentração de radônio e que elas são praticamente iguais no verão e no inverno.

Tabela 4.5: *Medidas de concentração de radônio da mina Los Cóndores feitas durante o verão. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.4.*

Distância da chaminé(m)	Monitor	^{222}Rn (Bq m $^{-3}$)	Erro (Bq m $^{-3}$)
10	12	616	51
20	11	580	47
25	10	653	53
88	9	529	44
145	8	648	53
194	7	689	55
247	6	483	40
295	5	504	42
342	4	457	38
370	3	442	37
395	2	469	39
428	1	446	36

um gás confinado em um tubo com um orifício localizado. Este modelo deve ser aplicado a partir da posição da queda da atividade, representando uma descontinuidade matemática por conta de uma entrada de ar.

Uma informação histórica diz que quando a mina Los Cóndores estava em operação, vários túneis secundários foram abertos a partir do túnel principal. Muitos deles foram totalmente ou parcialmente soterrados após o abandono do lugar. Isso fez com que sobrassem apenas algumas partes deles. Assim, as quedas acentuadas da concentração de radônio na parte central do ducto principal (por volta de 225 m da entrada vertical) podem ser interpretadas como uma diluição de radônio, devido à entrada de ar com teor baixo de radônio vindo de entradas secundárias soterradas ou de fissuras maiores. Em ambos os casos, os valores dessa concentração são capazes de fornecer novas informações sobre a estrutura da mina, atuando como um bom marcador geológico.

As conclusões obtidas dos dados foram confirmadas com os ajustes esboçados na Figura 4.6 para o verão e o inverno. Dessas aproximações matemáticas, conseguimos os seguintes valores para o verão: $C_{\infty} = 691 \pm 20$ Bq m $^{-3}$ e $v = 0,04 \pm 0,01$ m h $^{-1}$ para

Tabela 4.6: *Medidas de concentração de radônio da mina Los Cóndores feitas durante o inverno. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.7. Sob alguns monitores não obtivemos resultados de detecção necessários para análise.*

Distância da chaminé(m)	Monitor	^{222}Rn (Bq m $^{-3}$)	Erro (Bq m $^{-3}$)
47	17	325	27
95	15	257	21
128	13	262	21
169	11	256	21
211	10	235	20
224	20	265	22
230	8	181	15
297	7	196	17
343	6	165	14
393	5	179	15
435	2	201	17
450	1	149	13

a equação (2.25) ajustada até a distância de 225 m da chaminé; $C_\infty = 488 \pm 5$ Bq m $^{-3}$, $v_1 = 0,1 \pm 0,05$ m h $^{-1}$ e $C_1 = 482 \pm 3$ Bq m $^{-3}$ para a equação (2.30) plotada a partir da distância de 225 m da chaminé até a entrada principal, tendo para a curva inteira o $R^2 = 0,55$. Já no inverno tivemos: $C_\infty = 267 \pm 10$ Bq m $^{-3}$ e $v = 0,24 \pm 0,05$ m h $^{-1}$ para a equação (2.25) ajustada até a distância de 225 m da chaminé; $C_\infty = 197 \pm 10$ Bq m $^{-3}$, $v_1 = 0,1 \pm 0,05$ m h $^{-1}$ e $C_1 = 174 \pm 8$ Bq m $^{-3}$ para a equação (2.30) plotada a partir da distância de 225 m da chaminé, tendo para a curva inteira o $R^2 = 0,7$.

É interessante observar que dois fatores se mantiveram iguais nas duas estações, a saber: a velocidade da ventilação (v_1), caracterizada pela possível entrada de ar vinda de uma fissura ou cratera e, a queda percentual da concentração de ^{222}Rn em 225 m. Esta última foi calculada tomando desde dois pontos, um exatamente antes e outro depois da brusca queda, até todos os dados utilizados no gráfico. Para usar mais de dois pontos, trabalhamos com uma média da concentração antes da queda e outra média depois, a partir dessas duas médias, calculou-se a queda percentual. Em todos os cálculos obtivemos, em média, o valor

de $29 \pm 4\%$ para o verão e o inverno. Valores que nos permite entender que o fator responsável pela descontinuidade da concentração do gás é independente de mudanças sazonais. Este fator é um ingrediente da estrutura física como fissuras ou crateras.

Analogamente à mina La Carolina, analisamos a velocidade de ventilação da mina de tungstenio Los Cóncores com a equação (4.4). Para tanto, foram usados os mesmos parâmetros, exceto o valor atribuído a L , onde usamos 450 m. Os resultados são apresentados em um gráfico velocidade de ventilação versus distância da chaminé, mostrado na Figura 4.7, apesar de os resultados plotados para a velocidade de ventilação serem bem distintos dos encontrados para v e v_1 pelo modelo do tubo com um buraco localizado — aspecto possivelmente explicado por uma falta de uma constância na velocidade na mina. Mas, o comportamento geral visto é considerável, pois apresenta um brusco aumento nas duas estações semelhante a queda da concentração de ^{222}Rn a, aproximadamente, 225 m da chaminé, que é a distância onde a concentração diminuiu. Esse aumento na velocidade empurra uma quantidade maior de radônio para fora e confirma, com total segurança, a existência de uma entrada de ar vinda do exterior.

Sobre a concentração média de ^{222}Rn , conseguimos demonstrar a diminuição da velocidade de ventilação ao longo da mina do inverno para o verão, caracterizada pela mudança de temperatura, gera um aumento na concentração, perceptível ao compararmos a Figura 4.7 com a Figura 4.6. Adicionado a informação de que, segundo as mesmas fontes da mina La Carolina, a temperatura externa média é cerca de $20\text{ }^\circ\text{C}$ no verão e $9\text{ }^\circ\text{C}$ no inverno com uma temperatura interna anual por volta de $15\text{ }^\circ\text{C}$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$ — fato confirmador da diminuição da velocidade do inverno para o verão.

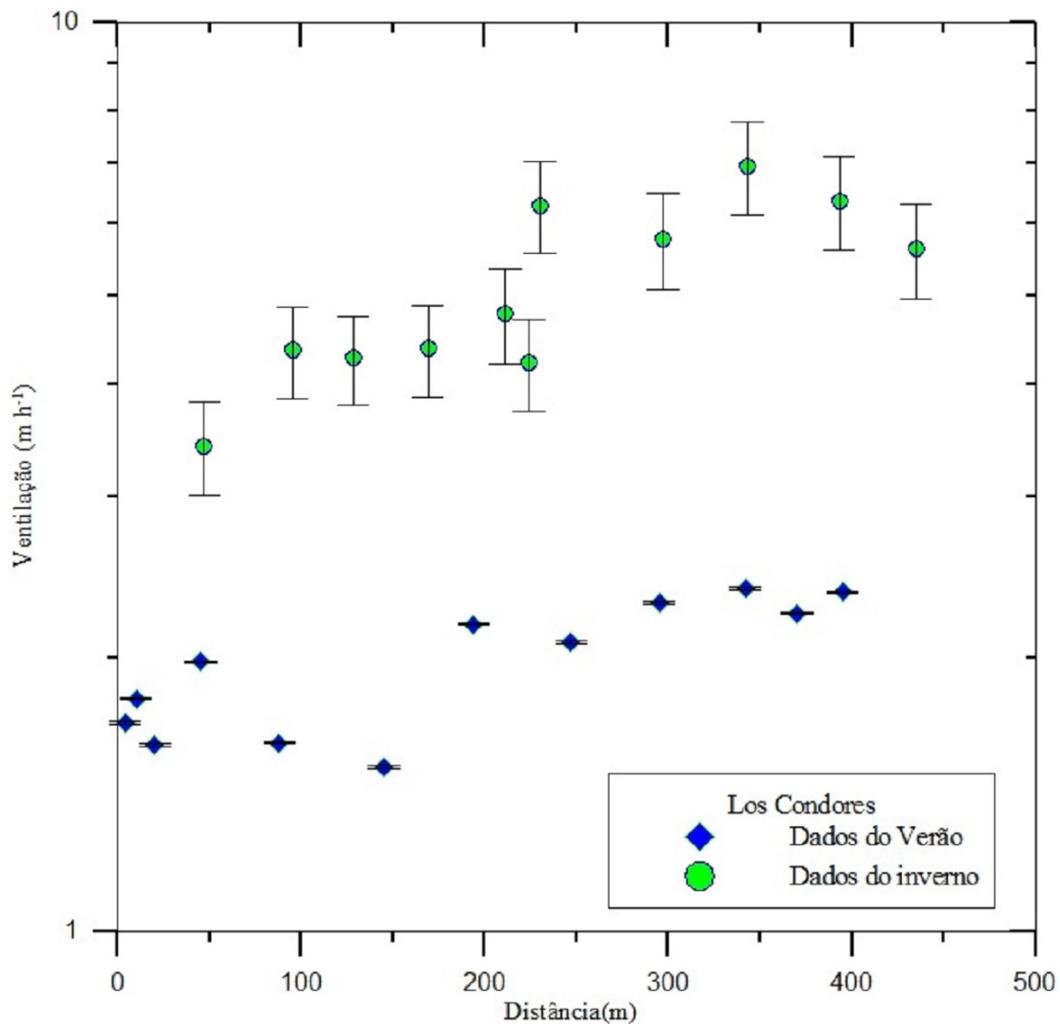


Figura 4.7: *Velocidade de ventilação versus distância do eixo da chaminé da mina Los Cóncores. Os pontos azuis são os dados do verão obtidos da equação (4.4) e os pontos verdes são do inverno. O eixo y do gráfico foi graduado em escala logarítmica para dar proporção das subidas da velocidade de ventilação.*

4.2 Dose recebida nas minas

Uma vez que as duas minas são atualmente utilizadas para passeios turísticos, este item será dedicado à discussão das doses de radiação alfa e gama recebida por uma pessoa (guia turístico ou visitante) frequentadora desses locais. Além disso, pretendemos comparar as doses estimadas de radiação com os limites propostos pelas agências internacionais para a radiação, a fim de analisarmos o quanto a quantidade adquirida pode vir a ser maléfica à saúde.

4.2.1 Dose recebida do radônio

Com relação à magnitude do risco para a saúde laboral no ambiente subterrâneo, é possível, relatando os altos níveis de radônio que foram encontrados nestas duas minas abandonadas, estimar a dose efetiva para os trabalhadores.

Os valores observados da concentração de ^{222}Rn na mina La Carolina durante o verão (época em que há a maior atividade turística nas minas) variaram de $1,8 \pm 0,1$ para $6,0 \pm 0,5$ kBq m^{-3} , com uma concentração média de $4,8 \pm 0,8$ kBq m^{-3} . Quantidade essa que sugere a existência de implicações significativas para a saúde dos exploradores da mina de ouro tanto casual quanto profissional (visitantes e guias turísticos, respectivamente), ultrapassando mais de três vezes o limite superior do nível de ação¹ de $1,5$ kBq m^{-3} , recomendado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 2008). Por outro lado, a concentração de ^{222}Rn no inverno foi mais amena, indo de $0,7 \pm 0,06$ kBq m^{-3} a $5,0 \pm 0,4$ kBq m^{-3} , com uma média de $2,1 \pm 0,2$ kBq m^{-3} . Esse resultado indica o quanto as mudanças sazonais influenciam também na dose recebida do radônio, pois apesar de a concentração ainda está acima do nível de ação, é menos da metade da média do verão.

Da análise dos dados de radônio provenientes da mina Los Cóndores, nota-se que no verão sua concentração de ^{222}Rn variou de $0,43 \pm 0,04$ kBq m^{-3} para $1,48 \pm 0,12$ kBq m^{-3} , com uma média de $0,6 \pm 0,2$ kBq m^{-3} , diminuindo ainda mais no inverno, indo de $0,15 \pm 0,02$ kBq m^{-3} a $0,33 \pm 0,03$ kBq m^{-3} com uma média de $0,21 \pm 0,02$ kBq m^{-3} . Os resultados para a mina Los Cóndores demonstram a importância da ventilação, seja natural ou artificial, em ambientes fechados. Assim, é importante recorrer à ventilação forçada (sistemas de exaustão) em ambientes de trabalho subterrâneos, caso a ventilação natural não seja suficiente.

¹Vale ressaltar que o nível de ação ocorre quando o valor mínimo de referência adotado no local é ultrapassado, e alguma intervenção deve ser adotada para diminuir a concentração de radônio.

As minas na Argentina são visitadas por um número significativo de entusiastas da mineração. Embora o valor médio da concentração de radônio, obtido a partir de La Carolina, sugira que o risco representado pelos elevados níveis de radônio seja considerável até para exploradores casuais, antes que a gravidade seja quantificada, é necessário estimar o número de horas gasto nas minas por vários grupos. Assim, de acordo com Gillmore *et al.* (2001), os exploradores casuais tendem a gastar 2 h em média para cada visita em muitas minas na Inglaterra, provavelmente em 10 ocasiões por ano, o que corresponde à uma exposição de 20 h anuais. Para os exploradores de minas dedicado / ocupacional, no entanto, o tempo anual de incidência é muito maior. Comportamento semelhante ocorre nas minas turísticas na Argentina. Com isso, da equação (2.31) com 0,5 e 7,95 nSv Bq⁻¹h⁻¹m³ para F e DFC, respectivamente, é possível fazer uma estimativa da dose efetiva, devido à inalação de radônio por visitantes e guias turísticos. A Tabela 4.7 mostra os resultados para quatro classificações de exploradores de minas, calculados com os valores médios das concentrações de radônio citados anteriormente e da equação (2.31). A contribuição de radônio para a dose recebida é, segundo publicações da UNSCEAR, relatada por uma média anual de 1,15 e 0,10 mSv para ²²²Rn e ²²⁰Rn, respectivamente, e a Tabela 4.7 apresenta as previsões de 11 mSv y⁻¹ ou 30 mSv y⁻¹ para os guias turísticos, dependendo do turno diário na mina La Carolina. Este é um resultado significativo em relação aos limites da dose ocupacional de 20 mSv y⁻¹ sugerido pela ICRP (2008). No entanto, como a profissão de guia ainda não é considerada oficial, esses profissionais não possuem um programa de monitoramento de radiação (uma investigação adicional, levando em consideração a utilização de monitores pessoais durante o tempo de trabalho, poderia esclarecer essa questão).

O problema da dose recebida vinda do radônio é sério e precisa ser tratado como tal, pois, como já discutimos, a mortalidade dos mineiros é antiga e somente confirmada por inalação

Tabela 4.7: A contribuição do radônio para a dose recebida por exploradores de mina (duas classificações) e por trabalhadores com duas possibilidades de regime de ocupação diária em La Carolina e Los Córdores.

Classificação (número de visitas)	Tempo anual na mina (h)	Dose em La Carolina (mSv)		Dose em Los Córdores (mSv)	
		Verão	Inverno	Verão	Inverno
<i>Casual</i> (10)	20	0,38±0,07	0,17±0,02	0,04±0,02	0,017±0,002
<i>Esportista</i> (60)	60	1,14±0,20	0,50±0,10	0,14±0,05	0,051±0,005
<i>Trabalhador parcial</i> (300)	600	11,4±2,0	5,0±1,0	1,43±0,5	0,51±0,05
<i>Trabalhador integral</i> (240)	1560	29,7±6,0	13,0±3,0	3,72±2,0	1,33±0,20

do radônio nos dias contemporâneos, a qual, inclusive, é certificada cientificamente como a segunda maior causadora de câncer pulmonar. Enquanto, a solução do problema pode ser uma simples abertura de ar, como fica claro ao compararmos na Tabela 4.7 as doses sempre abaixo do limite da mina Los Córdores em relação a La Carolina que é pouco ventilada, ou, caso necessário, a colocação de um sistema mecânico de ventilação artificial.

4.2.2 Dose gama recebida

De acordo com o apresentado na secção 4.1.2, a taxa de dose devido à radiação gama natural nas minas La Carolina e Los Córdores é, respectivamente, $X_c = 0,11 \pm 0,06 \mu\text{Sv h}^{-1}$ e $X_c = 0,13 \pm 0,03 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Esses valores são extremamente baixos, não representando riscos às pessoas. Na realidade, como visto na secção anterior, o maior risco está associado à exposição ao radônio e seus filhos de decaimento.

A fim de confirmar esses dados, outro método de medida da taxa de dose gama foi usado em La Carolina. Esse consistia na colocação de detectores TLD's junto aos detectores CR-39 para o radônio. Esse procedimento nos permitiu obter uma segunda fonte de dados para a radiação gama de tal modo que pudemos elaborar uma comparação entre as medidas. A Tabela 4.8 traz os resultados obtidos por esse método ao longo da mina. Contudo, é

importante lembrar que os detectores TLD's foram instalados a uma distância de 20 cm das paredes da mina, enquanto que o detector GM, usado para montar os histogramas da Figura 4.3, produz valores de taxas de dose a uma distância de 1 m do solo e cerca de 1 m de distância das paredes da mina.

Tabela 4.8: *Medidas de dose gama na mina La Carolina feitas durante o verão com o detector TLD's colocados próximos aos monitores de radônio. A posição de cada monitor dentro da mina pode ser visualizada na Figura 3.2.*

Munitor Referente	Dosagem gama em 105 dias(mSv)	Dose gama($\mu\text{Sv h}^{-1}$)
1	$0,5 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,04$
2	$0,8 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,08$
3	$0,7 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,04$
4	$1,0 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,08$
5	$0,9 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,08$
6	$0,9 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,08$
7	$0,8 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,08$
8	$0,9 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,08$
9	$0,9 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,08$
10	$1,0 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,08$
11	$0,7 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,04$
12	$0,9 \pm 0,2$	$0,2 \pm 0,08$
13	$1,0 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,08$
14	$0,12 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,08$

Com o objetivo de comparar os resultados, precisamos converter os dados obtidos em Sv de 105 dias para Sv h^{-1} , os quais foram feitos dividindo pelo tempo de exposição em horas e colocados na Tabela 4.8. Então, calculamos a média, obtemos $0,54 \pm 0,07 \mu\text{Sv h}^{-1}$, sendo essa ligeiramente maior do valor para a média da Gaussiana do histograma de La Carolina (ver Figura 4.3), possivelmente, devido à maior eficácia dos TLD's e pela menor distância do detector à parede. Porém, é inegável, nos dois métodos, que os valores de dose gama nas minas são baixos, têm a mesma ordem de grandeza nas duas medidas e se tornam insignificantes se comparado a dose recebida do radônio em um mesmo período de tempo.

Similarmente ao feito com o radônio, é possível estimar com os valores médios dos

histogramas, a contribuição da radiação gama externa à dose eficaz. Assim, a Tabela 4.9 mostra os resultados para quatro classificações de frequentadores de minas, evidenciando que as doses gama externas são sempre muito menores do que as doses internas devido à inalação de radônio. Além disso, de acordo com UNSCEAR (2000), a contribuição média da dose gama externa anual em todo o mundo varia, tipicamente, de 0,3 a 0,6 mSv, o que nos permite afirmar que a radiação gama não é um problema para a pessoa que trabalha até em tempo integral no interior das minas, mas o grande vilão da história é o radônio.

Tabela 4.9: A contribuição dos raios gama para a dose recebida por exploradores de mina (duas classificações) e por trabalhadores com duas possibilidades de regime de ocupação diária em La Carolina e Los Cóndores.

Classificação (número de visitas)	Tempo anual na mina (h)	Dose em La Carolina (mSv)	Dose em Los Cóndores (mSv)
<i>Casual</i> (10)	20	< 0,01	< 0,01
<i>Esportista</i> (60)	60	< 0,01	< 0,01
<i>Trabalhador Parcial</i> (300)	600	0,07 ± 0,03	0,08 ± 0,02
<i>Trabalhador Integral</i> (240)	1560	0,16 ± 0,07	0,20 ± 0,03

Capítulo 5

Conclusões

O radônio e os seus produtos de decaimento radioativo são responsáveis por 48% da dose ambiental radioativa na superfície. Existem três isótopos mais conhecidos do radônio, dos quais o mais importante sob o ponto de vista ambiental é o ^{222}Rn , cuja meia-vida é de 3,82 dias. Em ambientes fechados, como no caso de minas e de algumas residências, a concentração desse gás pode superar os valores médios encontrados a céu aberto (8 Bq m^{-3}) em mais de 2000 vezes. Desde 1980, esse fato tem chamado a atenção de agências de proteção ambiental em diversos países, o que levou a inclusão desse gás no estabelecimento de programas de monitoramento ambiental. Tradicionalmente, esse elemento tem sido aplicado no desenvolvimento de trabalhos de proteção radiológica, uma vez que ele se difunde facilmente em ambientes de convívio humano, através de materiais de construção, solos, água, submetendo esses ambientes à existência de radioatividade natural. Entretanto, ele possui uma grande aplicabilidade ambiental em estudos dos mecanismos de transporte, via troposfera, de aerossóis e poluentes atmosféricos. Na presente pesquisa, avaliamos sua utilização como um marcador ou traçador geológico de ambientes subterrâneos.

Os resultados obtidos neste texto confirmaram que a variação na concentração de ^{222}Rn

em minas pode ser correlacionada com a presença de fissuras, fraturas e demais aberturas secundárias em sua estrutura. Essa correlação foi muito positiva na mina de tungstênio Los Córdoros, onde medidas de concentração de ^{222}Rn no seu túnel principal, realizadas tanto na estação de verão quanto de inverno, mostraram a existência de uma saída de ar secundária a 125 m da saída vertical localizada no final desse túnel (túnel de um elevador antigo), apesar da investigação física desse local da mina não apontar para a presença de aberturas.

Os resultados para a mina de ouro La Carolina indicaram que o seu túnel principal não apresenta ligações secundárias com o meio externo, uma vez que não houve uma variação na concentração de ^{222}Rn que apontasse para essa constatação. O radônio presente nessa mina comportou-se de acordo com um modelo de um gás aprisionado em um tubo que contém apenas uma entrada principal.

Esses comportamentos distintos foram referendados pelas medidas das taxas de dose externa da radiação gama e das concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U . As taxas mostraram que os valores de dose gama eram similarmente baixas em ambas as minas. As medidas de concentrações confirmaram que as doses eram baixas (possuindo as concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U também baixas) e que as duas minas possuem formação geológicas semelhantes, uma vez que as rochas que compunham as suas paredes possuem composições mineralógicas parecidas. Isso nos permitiu constatar que apesar de as duas minas argentinas possuírem rochas de origem semelhantes e mesmas características geológicas, o comportamento observado para o radônio foi bem diferente devido às mudanças físicas, ligadas ao fluxo de ar presente nas minas. Expor essa diferenciação permitiu-nos alcançar o objetivo maior desta investigação, que é a de utilizar o radônio para rastrear perturbações ambientais sobre o aspecto estrutural.

Outro fator adicional a presente pesquisa é que a variação das temperaturas do verão para

o inverno no lado externo das minas provocou mudanças no sentido e no módulo da velocidade dos ventos subterrâneos, proporcionando uma alteração significativa nas concentrações de ^{222}Rn . Assim, durante a estação de verão em La Carolina, encontramos a concentração de radônio dentro de uma faixa de $1,8 \pm 0,1$ a $6,0 \pm 0,5$ kBq m^{-3} com uma média $4,8 \pm 0,8$ kBq m^{-3} . Durante o inverno, encontramos uma faixa de variação mais baixa, indo de $0,7 \pm 0,06$ kBq m^{-3} a $5,0 \pm 0,4$ kBq m^{-3} com uma média de $2,1 \pm 0,2$ kBq m^{-3} . Já em Los Córdobres, embora o acúmulo de radônio fosse menor que em La Carolina, devido à presença de duas grandes entradas de ar (a principal no início e a vertical no final do túnel, provocando o efeito chaminé que expulsa mais gás radioativo), também foi observado o efeito da variação da temperatura em diferentes épocas do ano. No verão, a concentração de ^{222}Rn variou de $0,43 \pm 0,04$ kBq m^{-3} a $1,48 \pm 0,12$ kBq m^{-3} com uma média de $0,6 \pm 0,2$ kBq m^{-3} e, no inverno, ficou de $0,15 \pm 0,02$ kBq m^{-3} a $0,33 \pm 0,03$ kBq m^{-3} com uma média de $0,21 \pm 0,02$ kBq m^{-3} . O comportamento do radônio nessas minas deixa evidente o quanto a temperatura externa muda o valor da quantidade acumulada de radônio decaído das paredes.

Para quantificar os traços geológicos observados pelo radônio, foi preciso usar uma descrição matemática da variação da concentração de radônio com a distância em relação a uma entrada no interior dos ambientes propostos. Para tanto, usamos dois modelos que se mostraram bem razoáveis para este estudo. Na mina La Carolina foi utilizado o modelo de um gás radioativo confinado em um tubo com apenas uma entrada, no qual o acúmulo do gás cresce exponencialmente com a distância à entrada, tendendo a uma constante no final do tubo, pois o lugar não apresenta saídas extras de ar. Na mina Los Córdobres foi utilizado o modelo de um gás radioativo confinado em um tubo com mais de uma entrada. Esse modelo foi bem sucedido ao demonstrar que essa mina apresenta uma falha natural em sua estrutura geológica, além das duas entradas conhecidas.

Outro aspecto importante no texto foi a discussão a respeito do impacto proveniente de dois tipos principais de radiação no subsolo: a radiação alfa e gama. Sobre a dose de radiação alfa vinda do radônio, nossos resultados apresentaram a existência de um problema que pode ser alarmante para saúde das pessoas que trabalham na mina de La Carolina. Esse local pobre em ventilação, durante o verão, mostrou uma concentração de radônio capaz de exceder em quatro vezes o limite superior do nível de ação de $1,5 \text{ kBq m}^{-3}$ recomendado pela ICRP. Com isso, este trabalho indica que ações corretivas devem ser tomadas nesse local de trabalho, a fim de reduzir os riscos de saúde para guias turísticos. Típicas ações de mitigação, como, por exemplo, a introdução de ventilação forçada ou a redução da carga horária diária do empregado poderiam ser adotadas. No entanto, antes de adotar tais ações corretivas, sugerimos que um estudo mais aprofundado sobre a variação diária da concentração de radônio e sobre o fator de equilíbrio típico do túnel da mina seja realizado, pois isso permitirá avaliar mais precisamente o efeito desse gás, uma vez que essas minas são ambientes onde a quantidade da dose recebida do radônio pode variar bastante sazonalmente e até, segundo alguns autores, diariamente. Em contrapartida, foi constatado que a dose de radiação gama em ambas as minas se mostrou insignificante em relação à dose interna proveniente do radônio.

Assim, a maior preocupação para a exposição ocupacional em ambientes subterrâneos é realmente o radônio, uma fonte radioativa perigosa, incolor, inodora, insípida e quimicamente inerte. Em outras palavras: uma “radiação underground”.

Referências Bibliográficas

- [1] **(Anjos et al., 2005)** Anjos, R. M., Veiga, R., Soares, T., Santos, A. M. A., Aguiar, J. G., Frascá, M. H. B., et al. (2005). Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. *Radiation Measurements*, 39, 245-253.
- [2] **(Anjos et al., 2006)** Anjos, R. M., Veiga, R., Macario, K., Carvalho, C., Sanches, N., Bastos, J., et al. (2006). Radiometric analysis of quaternary deposits from the southeastern Brazilian coast. *Marine Geology*, 229, 29-43.
- [3] **(Anjos et al., 2007)** Anjos, R. M., Veiga, R., Carvalho, C. Macario, K., & Gomes, P. R. S. (2007). Geological provenance of Quaternary deposits from the southeastern Brazilian coast. *Nuclear Physics A*, 787, 642-647.
- [4] **(Anjos et al., 2008)** Anjos, R. M., Veiga, R., Carvalho, C., Sanches, N., Estellita, L., Zanuto, P., et al. (2008). Natural sources of radiation exposure and the teaching of radioecology. *Physics Education*, 43, 423-428.
- [5] **(Anjos et al., 2010a)** Anjos, R. M., Macario, K. D., Lima, T. A., Veiga, R., Carvalho, C., Fernandes, P. J. F., et al. (2010). Correlations between radiometric analysis of Quaternary deposits and the chronology of prehistoric settlements from the Southeastern Brazilian coast. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 75-81.

- [6] **(Anjos et al., 2010b)** Anjos, R. M., Umisedo, N., da Silva, A. A. R., Estellita, L., Rizzotto, M., Yoshimura, E. M., et al. (2010). Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina. *Journal of Environmental Radioactivity*. 101, 153-158.
- [7] **(Anjos et al., 2011)** Anjos, R. M., Ayub, J. Juri, Cid, A. S., Cardoso, R. & Lacerda, T. (2011). External gamma-ray dose rate and radon concentration in indoor environments covered with Brazilian granites. *Journal of Environmental Radioactivity*. 102, 1055-1061.
- [8] **(Atkinson et al., 1983)** Atkinson, T. C., Smart, P. L. & Wigley, T. M. L. (1983). Climate and natural radon levels in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada. *Artic and Alpine*. 15, 487-502.
- [9] **(Canberra, 2003)** Canberra (2003). *Germanium Detectors, User's Manual*. USA: Canberra Industries Inc.
- [10] **(Chassot, 1995)** Chassot, Attico (1995). Raios X e radioatividade. *Quimica Nova na Escola*. 2, 19-22.
- [11] **(Chung, 2001)** Chung, K. C. (2001). *Introdução à Física Nuclear*. Brasl: UERJ. cap. 1 e 8.
- [12] **(Cigna, 2005)** Cigna, A. A. (2005). Radon in caves. *International Journal of Speology*. 34, 1-18.
- [13] **(Knoll, 1979)** Knoll, G. F. (1979). *Radiation Detection and Measurement*. New York: Jonh Wiley & Sons. 816p.
- [14] **(Da Silva, 2005)** Da Silva, A. A. R. (2005). *Radônio e filhos em residências da cidade de São Paulo*. Tese de doutorado, IF-USP.

- [15] **(Da Silva et al., 2010)** Da Silva, A. A. R., Valladares, D. L., Anjos, R. M., Velasco, H., Rizzoto, M. & Yoshimura, E. E. (2010). Assessment the health hazard from ^{222}Rn in old metalliferous mines in San Luis, Argentina. *Water, Air and Soil Pollution*. 218, 371-386.
- [16] **(Eappen et al., 2006)** Eappen, K. P., Mayya, Y. S., Patnaik, R. L. & Kushwaha, H. S. (2006). Estimation of radon progeny equilibrium factors and their uncertainty bounds using solid state nuclear track detectors. *Radiation Measurements*. 41, 342-348.
- [17] **(Estellita et al., 2010)** Estellita, L., Santos, A. M. A., Anjos, R. M., Yoshimura, E. M., Velasco, h., da Silva, A. A. R., et al. (2010). Analysis and risk estimates to workes of Brazilian granitic industries and sandblasters exposed to respirable crystalline silica and natural radionuclides. *Radiation Measurements*. 45, 196-203.
- [18] **(Gillmore et al., 2001)** Gillmore, G. K., Phillips, P., Denman, A., Sperrin, M. & Pearce, G. (2001). Radon levels in abandoned metalliferous mines, Devon, Southwest England. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 49, 281-292.
- [19] **(Fischer et al., 1979)** Fischer, H. B., List, E. G., Koh, R. C. Y., Imberger, J. & Brooks, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. New York: Academic Press.
- [20] **(Guimarães e Okuno, 2003)** Guimarães, C. C. & Okuno, E. (2003). Blind performance testing of personal and environmental dosimeters based on TLD-100 and natural $\text{CaF}_2: \text{NaCl}$. *Radiation Measurements*. 37, 127-132.

- [21] **(Hakl, 1997)** Hakl, J. (1997). Application of radon-222 as a natural tracer in environmental studies. Ph.D. thesis. Lajos Kossuth University. <http://ganymedes.lib.unideb.hu:8080/dea/bitstream/2437/80292/2/ertekezes.pdf>
- [22] **(Hakl et al., 1992)** Hakl, J., Hunyadi, I., Csige, I., Géczy, G., Lénárt, L. & Töröcsik, I. (1992). Outline of natural radon occurrences on karstic terrains of Hungary. *Radiation Protection Dosimetry*. 45, 183-186.
- [23] **(Hakl et al., 1996)** Hakl, J., Csige, I., Hunyadi, I., Várhegyi, A. & Géczy, G. (1996). Radon transport in fractured porous media - experimental study in caves. *Environment International*. 22, S433-S437.
- [24] **(IAEA, 1987)** IAEA, (1987). Preparation and certification of IAEA gamma spectrometry reference materials, RGU-1, RGTh-1 and RGK-1. *International Atomic Energy Agency*. Report-IAEA/RL/148.
- [25] **(IAEA, 2004)** IAEA, (2004). Radiation, people and the environment. *International Atomic Energy Agency*. Report-IAEA/PI/A.75/04-00391.
- [26] **(ICRP, 1993)** ICRP (1993). *International Commission on Radiological Protection*. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Oxford: Pergamon.
- [27] **(ICRP, 1994)** ICRP (1994). *International Commission on Radiological Protection*. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Oxford: Pergamon.
- [28] **(ICRP, 2008)** The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. In: ICRP Publication 103, vol. 37. Annals of the ICRP. 2-4.

- [29] **(ICRP, 2009)** ICRP (2009). *International Commission on Radiological Protection*. International Commission on Radiological Protection statement on radon. ICRP Ref 00/902/09. http://www.icrp.org/icrp_radon.asp.
- [30] **(Lario et al., 2005)** Lario, J., Sánchez-Moral, S., Canaveras, J. C., Cuezva, S. & Soler, V. (2005). Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to assess user's annual affective dose. *Journal of Environmental Radioactivity*, 80, 161-174.
- [31] **(López de Luchi et al., 2003)** López de Luchi, M. G., Cerredo, M. E., Siegesmund, S., Steenken, A. & Wemmer, K. (2003). Provenance and tectonic setting of the protoliths of the Metamorphic Complexes of Sierra de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58, 525-540.
- [32] **(Máduar, 2000)** Máduar, Marcelo Francis (2000). *Determinação de fatores de conversão de dose para radiação gama externa em residências*. Dissertação de Mestrado, IPEN-USP, Cap 1.
- [33] **(Miller e Singewald, 1919)** Miller, B. L. & Singewald, J. T. (1919). *The mineral deposits of South America*. New York: Mcgraw-Hill Book Company. p. 598
- [34] **(Nazaroff, 1992)** Nazaroff, W. W. (1992). Radon transport from soil to air. *Reviews of Geophysics*, 30, 137-160.
- [35] **(NCRP, 1984)** NCRP (1984). Exposures from the Uranium Series with Emphasis on Radon and Its Daughters. *National Council on Radiation Protection and Measurements*. ISBN 0-913392-67-7.
- [36] **(Okuno e Yoshimura, 2010)** Okuno, E. & Yoshimura, E. (2010). *Física das Radiações*. Brasil: Oficina de Textos. cap. 1.

- [37] **(Orlando et al., 2002)** Orlando C., Orlando, P., Patrizii, L., Tommasino, L., Tonnarini, S., Trevisi, R., et al. (2002). A passive radon dosimeter suitable for workplaces. *Radiation Protection Dosimetry*, 102, 163-168.
- [38] **(Rastall e Wilcockson, 1920)** Rastall, R. H. & Wilcockson, M. A. (1920). Tungsten ores: London, Imperial Institute Monograph on Mineral Resources with Special Reference to the British Empire. *John Murray*, p. 81.
- [39] **(Rogers e Ragland, 1961)** Rogers, J. J. W. & Ragland, P. C. (1961). Variation of thorium and uranium in selected granitic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 25, 99-109.
- [40] **(Schlumberger, 1986)** Schlumberger (1986). *Log Interpretation Charts*. Houston: Schlumberger Well Services. p. 122.
- [41] **(Sharma, 1997)** Sharma, P. V. (1997). *Environmental and Engineering Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 372.
- [42] **(Shweikani e Durrani, 1995)** Shweikani, R. & Durrani, S. A. (1995). Thoron Contributions in radon measurements in the environments. *Radiation Measurements*, 25, 615-616.
- [43] **(Socolofky e Jirka, 2005)** Socolofsky, Scott A. & Jirka, Gerhard H. (2005). *CVEN 489-501: Special Topics in Mixing and Transport Processes in the Environment*. Texas: Coastal and Ocean Engineering Division. cap. 1, 2 e 4, anexo B.
- [44] **(Table of Nuclides, 2000)** Table of Nuclides (2000). *Nuclear Data Evaluation Laboratory e Korea Atomic Energy Research Institute*. <http://atom.kaeri.re.kr>

- [45] **(Umisedo et al., 1990)** Umisedo, N. K., Fratin, L., Fausto, A. M. F., Okuno, E. & Mol, A. W.(1990). Manufatura de detetores TL usando fluorita brasileira com vidros. *Sociedade Brasileira de Física, Proc. XIII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada*. SBF, Brazil, p. 142.
- [46] **(UNSCEAR, 1982)** UNSCEAR (1982). *Iopnizing radiation: Sources and biological effects - Annex D: Exposures to radon and thoron and their decay products*. United Nations: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- [47] **(UNSCEAR, 1988)** UNSCEAR (1988). *Sources, effects and risks of ionizing radiation - Annex A: Exposures from natural sources of radiation*. United Nations: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- [48] **(UNSCEAR, 2000)** UNSCEAR (2000). *Sources and effects of Ionizing Radiation*. United Nations: United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation.
- [49] **(UNSCEAR, 2006)** UNSCEAR (2006). *Effects of Ionizing Radiation - Annex E: Sources-to-Effects Assessment for radon in home and Workplaces*. United Nations: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- [50] **(Viñas et al., 2007)** Viñas, R., Eff-Darwich, A., Soler, V., Martin-Luis, M. C., Quesada, M. I. & Nuez, J. (2007). Processing of radon time series in underground environments: Implications for volcanic surveillance in the island of Tenerife, Canary Islands, Spain. *Radiation Measurements*, 42, 101-115.

- [51] **(Werner et al., 1998)** Werner, A. B. T., Sinclair, W. D. & Amey, E. B. (1998). International strategic mineral issues summary report-Tungsten. US Geological Survey Circular 930-O.
- [52] **(Whitfield et al., 1959)** Whitfield, J. M., Rogers, J. J. W. & Adams, J. A. S. (1959). The relationship between the petrology and the thorium and uranium contents of some granitic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 17, 248-271.
- [53] **(WHO, 2009)** WHO (2009). Who handbook on indoor radon: A public health perspective. *World Health Organization*. ISBN 978 92 4 154767 3.
- [54] **(Wigley, 1967)** Wigley, T. M. L. (1967). Non-steady flow through porous medium and cave breathing. *Journal of Geophysical Research*, 72, 3199-3205.