

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**Determinação dos Processos de Enriquecimento e das  
Concentrações de Radônio em Minas Subterrâneas de Fluorita e  
Carvão do Estado de Santa Catarina: Critérios para Avaliação dos  
Riscos Radiológicos.**

*Carlos Eduardo Lima dos Santos*

**Orientador:** Prof. Dr. Rommulo Vieira Conceição IG/UFRGS

**Banca Examinadora:** Prof. Dr. Milton L. L. Formoso IG /UFRGS  
Prof. Dr. Lauro V. S. Nardi IG /UFRGS  
Dr. Paulo F. L. Heilbron CNEN

**Dissertação de Mestrado  
apresentada como requisito  
para obtenção do Título de  
Mestre em Geociências**

**Porto Alegre - 2008.**

## RESUMO

A inalação de gás radônio presente em minas subterrâneas pode implicar em seu decaimento e deposição de seus descendentes nos pulmões, causando danos ao tecido pulmonar e podendo induzir câncer. Em ambientes de minas subterrâneas, concentrações de radônio inferiores a  $500 \text{ Bq/m}^3$  são consideradas aceitáveis internacionalmente e concentrações superiores a  $1500 \text{ Bq/m}^3$  requerem sempre medidas de proteção para os trabalhadores mineiros. Os objetivos deste trabalho são determinar os processos de enriquecimento e as concentrações de radônio no ar, bem como as doses de radiação resultantes da presença deste elemento em três minas subterrâneas de fluorita e três de carvão no Estado de Santa Catarina. A concentração de radônio foi medida empregando dois tipos de detectores de traços nucleares (SSNTD), o LEXAN e o CR-39. Esse método de detecção consiste em contar, com auxílio de microscópio, traços resultantes da interação de partículas alfa com o filme, devido à penetração do Rn-222 no interior da câmara e seu processo de decaimento. A obtenção dos dados exigiu tempos de exposição nas minas que variaram de 90 a 180 dias. Teores de rádio em amostras de rochas, minerais e águas subterrâneas coletadas foram determinados e comparados com as correspondentes concentrações de radônio encontradas no ar. Observou-se que as minas de carvão apresentaram valores de concentração baixos, o que pode ser explicado pela baixa concentração de rádio nas rochas (arenitos e siltitos da capa e da lapa) e no carvão que compõem o ambiente mineiro ou, ainda, pela eficiência da ventilação. A dose média dos trabalhadores das minas de carvão foi estimada em  $0,70 \text{ mSv/a}$ , inferior ao limite de  $1 \text{ mSv/a}$  estabelecido pela CNEN para indivíduos do público, correspondendo a um risco de câncer fatal, após 50 anos de trabalho nessas condições, de  $0,2\%$ . Por outro lado, as minas de fluorita apresentaram concentrações elevadas de radônio, superiores a  $1000 \text{ Bq/m}^3$ . A ineficiência da ventilação e a liberação de radônio durante as inúmeras explosões podem ser responsáveis pela alta concentração de radônio nessas minas, uma vez que as concentrações de rádio nas rochas (granito normal e alterado) e nos minerais (fluorita verde e roxa) que compõem aquele ambiente mineiro não são tão elevadas. A modificação feita no sistema de ventilação de uma das minas de fluorita foi suficiente para reduzir as concentrações para níveis aceitáveis. O granito alterado contribuiu mais significativamente para o aumento da concentração de Rn-222 no ar que as demais rochas e minerais estudados, ou seja, granito normal e fluoritas verde e roxa. Os trabalhadores das minas de fluorita estão expostos a uma dose efetiva média da ordem de  $12 \text{ mSv/a}$ , inferior ao limite estabelecido pela CNEN para indivíduos ocupacionalmente expostos ( $20 \text{ mSv/a}$ ) e correspondendo a um risco de câncer fatal, após 50 anos de trabalho nessas condições, de  $2,5\%$ . A necessidade de classificação como indivíduos ocupacionalmente expostos de trabalhadores de minas de fluorita ou a melhoria do sistema de ventilação, à luz do requisito de otimização da proteção radiológica, é discutida e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

## ABSTRACT

The inhalation of radon present in underground mines can imply in the deposition of its descendents in the lungs, which may cause harm to the lungs tissues and induce cancer. Concentration of radon not greater than  $500 \text{ Bq/m}^3$  in the environment of underground mines is considered to be acceptable internationally and concentrations above  $1500 \text{ Bq/m}^3$  require protective measures for the miners. The objectives of this research work are to determine the enrichment processes and the concentrations of radon in air, as well as the resulting doses due to the presence of this radionuclide in three underground mines of fluorite and three underground mines of coal in the State of Santa Catarina. The concentration of radon was measured employing two types of detectors of nuclear tracks (SSNTD), the LEXAN and the CR-39. This detection method consists in counting, with the help of a microscope, tracks resulting from the interaction of alpha particles with the film, due to the penetration of Rn-222 in the interior of the detector chamber and its decaying process. Contents of radium in collected samples of rocks, minerals and underground water were determined and compared with the corresponding radon concentration found in the underground air. It was observed that the coal mines showed low concentrations of radon, which can be explained by the low concentration of radium in rocks (sandstones and siltites in the footwall and hangwall) and in the coal that composes the mining environment or, yet still, due to the good ventilation system. The average dose to the workers of the coal mines was estimated as  $0.7 \text{ mSv/a}$ , value inferior to the limit of  $1 \text{ mSv/a}$  established by the Brazilian Nuclear Energy Commission (CNEN) for members of the public, and corresponding to a risk of fatal cancer after 50 years of work under this condition of 0.2%. On the other hand, the fluorite mines showed much higher concentrations of radon and superior to  $1000 \text{ Bq/m}^3$ . The inefficiency of the ventilation system and the liberation of radon during the various explosions may have contributed to the high concentrations of radon in these mines since the concentration of radium in the rocks (normal and weathered granites) and in the minerals (green and purple fluorides) that compose the mining environment are not high. The modification of the ventilation system of one of the fluorite mines was sufficient to reduce the radon concentration to levels of the order of  $500 \text{ Bq/m}^3$ . The weathered granite contributes more significantly to the increase of the concentration of Rn-222 in the air than the other rocks here studied, i.e. normal granite as well as green and purple fluorites. The miners of the fluorite mines are exposed to effective radiation doses of the order of  $12 \text{ mSv/a}$ , value inferior to the dose limit of  $20 \text{ mSv/a}$  established in the Brazilian regulation for occupationally exposed individuals and corresponding to a risk of fatal cancer after 50 years of work under this condition of 2,5%. The need to consider the miners of the fluorite mines as occupationally exposed individuals or the improvement of the ventilation system, based on considerations of the optimization of the radiological protection is discussed and suggestions for future work are presented.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	2
ABSTRACT .....	3
SUMÁRIO.....	4
LISTA DE ANEXOS .....	6
LISTA DE FIGURAS .....	7
LISTA DE TABELAS.....	10
1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Problema .....	15
1.3 Hipótese .....	15
1.4 Objetivos .....	16
1.4.1 Objetivo Geral.....	16
1.4.2 Objetivos Específicos .....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 O Radônio como Fonte de Radiação Natural.....	17
2.2 Comportamento do Radônio .....	21
2.2.1 Fontes de Radônio .....	24
2.2.2 Características da Exalação do Radônio.....	26
2.3 Exposição por Inalação de Filhos do Radônio de Meia Vida Curta .....	30
2.4 Nível de Trabalho ( <i>Working Level – WL</i> ) .....	31
2.5 Concentração de Energia Alfa Potencial (CEAP) Fator de Equilíbrio (F) e Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC) .....	32
2.6 Outras Definições Relevantes .....	34
2.7 Cálculo da Dose Efetiva e do Risco devido à Inalação de Radônio.....	36
2.8 Exposição por Inalação de Filhos do Radônio de Meia Vida Longa.....	37
2.9 Otimização .....	39
2.10 O Radônio em Minas Subterrâneas .....	40
2.11 Técnicas de Medição de Concentrações de Radônio .....	47
2.11.1 A Monitoração do Radônio.....	49

<b>2.12 Os Detectores Plásticos de Traços Nucleares .....</b>	<b>51</b>
2.12.1 Formação dos Traços em Detectores Plásticos .....	52
2.12.2 Visualização dos Traços Latentes .....	54
2.12.3 Ataque Químico .....	54
2.12.4 Eficiência dos Detectores Plásticos .....	55
<b>3 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1 Geologia dos Depósitos de Carvão Sul-Catarinenses .....</b>	<b>59</b>
3.1.1 Características das Minas de Carvão Estudadas .....	63
<b>3.2 Geologia das Jazidas de Fluorita .....</b>	<b>66</b>
3.2.1 Características das Minas de Fluorita Estudadas .....	67
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>70</b>
<b>4.1 População e Amostra .....</b>	<b>72</b>
<b>4.2 Procedimento Experimental .....</b>	<b>73</b>
4.2.1 Para as Análises de Concentração de Radônio .....	73
4.2.2 Para as Análises Qualitativas e Quantitativas de Radioatividade .....	80
<b>4.3 Instrumentos de Medida .....</b>	<b>81</b>
4.3.1 CR-39 ( <i>Columbia Resin 1939</i> ), Detector de Radiação Gama e Detector ativo <i>Doseman-Pro</i> .....	81
4.3.2 Microscópio Óptico e Demais Técnicas de Análises .....	82
<b>4.4 Coleta de Dados .....</b>	<b>82</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>84</b>
<b>5.1 Concentrações de Radônio no Ar .....</b>	<b>84</b>
5.1.1 Concentrações de Radônio no Ar nas Minas de Carvão .....	84
5.1.2 Concentrações de Radônio no Ar nas Minas de Fluorita .....	89
5.1.3 Concentrações de Radônio no Ar nas Minas de Fluorita Obtidos com o <i>DOSEMAN</i> .....	98
5.1.4 Teores de Rádio nas Rochas das Minas de Carvão .....	102
5.1.5 Teores de Rádio nas Rochas das Minas de Fluorita .....	103
5.1.6 Teores de Rádio nas Águas das Minas de Fluorita .....	106
<b>5.2 Relação entre Concentração de Radônio no Ar e Concentração de Rádio nas Rochas .....</b>	<b>107</b>
5.2.1 Relação entre Concentração de Radônio no Ar e Concentração de Rádio nas Rochas das Minas de Carvão .....	107
5.2.2 Relação entre Concentração de Radônio no Ar e Concentração de Rádio nas Rochas das Minas de Fluorita .....	110
<b>5.3 Dose Efetiva e Risco Radiológico .....</b>	<b>115</b>
5.3.1 Dose Efetiva e Risco Radiológico para as Minas de Carvão .....	115
5.3.2 Dose Efetiva e Risco Radiológico para as Minas de Fluorita .....	117
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>122</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>126</b>

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Resultados obtidos com o detector de medida instantanea doseman- pro.....	131
---	-----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Série de decaimento do U-238.....	22
Figura 2 - Séries de decaimento do Th-232. ....	23
Figura 3 - Diagrama esquemático dos processos de emanção do radônio....	28
Figura 4 - Exalação do radônio a partir do material de construção ou do solo.	29
Figura 5 - Esquema de decaimento dos filhos de meia vida curta do radônio (diagrama empilhado ou cumulativo). ....	30
Figura 6 - Esquema de decaimento dos filhos do radônio com meia vida longa (diagrama empilhado ou cumulativo) .....	38
Figura 7 - Detector para estimativas rápidas, pequenos recipientes metálicos ( <i>canisters</i> ) contendo carvão ativado. ....	48
Figura 8 - Detectores tipo traços ( <i>track etch</i> ), que consistem, essencialmente, numa pequena câmara circular, contendo um pedaço de plástico. ....	49
Figura 9 - Evolução do ataque químico, no detector plástico, com o decorrer do tempo .....	57
Figura 10 - Mapa da região estudada.....	61
Figura 11 - Coluna estratigráfica do depósito de carvão Sul-Catarinense. ....	62
Figura 12 - Esquema do método de lavra por câmaras e pilares .....	64
Figura 13 - (A) Ilustração de uma típica mina de carvão, com entrada principal, saída do carvão por esteiras e, (B) saída do ar viciado (sujo), por exaustão. .....	65
Figura 14 - Método de lavra <i>Shrinkage stopping</i> . Desmonte (realce) do bloco de lavra. ....	68
Figura 15 - Perfil longitudinal de uma mina de fluorita .....	68

- Figura 16 - Detectores instalados, em pontos diferentes. Na esquerda temos dois detectores CR 39 e um Lexan, e na direita um detector CR 39 e dois LEXAN, um é o detector temporizador..... 75
- Figura 17 - Alguns campos dos detectores CR 39. Em (A) um campo de contagem de uma mina de carvão, em (B) um campo de contagem de uma mina de fluorita e, em (C) um campo de contagem de uma mina de fluorita de um detector saturado. .... 76
- Figura 18 - Detector de radônio modelo *Doseman-Pro* da marca Sarad GmbH.79
- Figura 19 - Concentração de Rn-222 em função do ponto/detector da Mina MI. O valor da radiação natural de fundo (BG) está destacado em vermelho. .... 86
- Figura 20 - Concentração de Rn-222 em função do ponto/detector da Mina MBI. O valor da radiação natural de fundo (BG) está destacado em vermelho. .... 86
- Figura 21 - Concentração de Rn-222 em função do ponto/detector da Mina MM. O valor da radiação natural de fundo (BG) está destacado em vermelho. .... 87
- Figura 22 - Gráfico comparativo da concentração de Rn-222, das três minas de carvão, em função dos pontos amostrados. .... 87
- Figura 23 - Concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado da mina de fluorita RB para as duas campanhas (C1 e C2) e a radiação natural de fundo (BG)..... 91
- Figura 24 - Concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado da mina de fluorita NF para as duas campanhas (C1 e C2) e a radiação natural de fundo (BG)..... 94
- Figura 25 - Concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado da mina de fluorita MF para as duas campanhas (C1 e C2) e a radiação natural de fundo (BG)..... 97
- Figura 26 - Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC) em função do tempo na sala de café da mina RB. .... 100
- Figura 27 - Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC) em função do tempo na frente de lavra da mina RB ..... 100
- Figura 28 - Concentração de Rádio em função do tipo rocha (capa, carvão e lapa) das minas de carvão. .... 103
- Figura 29 - Concentração de Rádio em função do tipo rocha (granito alterado e normal) e dos minerais (fluorita verde e roxa) das três minas de fluorita. .... 105



- Figura 30 - Concentração de Rn-222 no ar em função da concentração de Ra-226 das minas de carvão para a capa (teto)..... 108
- Figura 31 - Concentração de Rn-222 no ar em função da concentração de Ra-226 das minas de carvão para o carvão (produto)..... 108
- Figura 32 - Concentração de Rn-222 no ar em função da concentração de Ra-226 das minas de carvão para a lapa (pisso). ..... 109
- Figura 33 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar, em função da concentração de Rádio no granito normal, das minas de fluorita. .... 111
- Figura 34 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar em função concentração de Rádio no granito alterado, das minas de fluorita. .... 112
- Figura 35 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar em função concentração de Rádio na fluorita verde, das minas de fluorita. .... 112
- Figura 36 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar em função concentração de Rádio na fluorita roxa, das minas de fluorita. .... 113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exposição a radiação em seres humanos devido a radionuclídeos internamente depositados.....	20
Tabela 2 - Exposição da população norte-americana a todas as fontes de radiação. ....	21
Tabela 3 - Propriedades do Rn-222 e seus descendentes. ....	21
Tabela 4 - Propriedades de decaimento do Rn-220 (torônio) e descendentes.	22
Tabela 5 - Energia alfa potencial dos filhos do Rn-222 de meia-vida curta .....	32
Tabela 6 - Teores de urânio em diferentes rochas magmáticas. ....	41
Tabela 7 - Teores de urânio das principais rochas metamórficas. ....	41
Tabela 8 - Teores de urânio das principais rochas sedimentares. ....	42
Tabela 9 - Concentrações de atividade do Ra-226 nas grandes famílias de rochas .....	42
Tabela 10 - Concentrações típicas de Radônio em minas subterrâneas de alguns países.....	44
Tabela 11 - Limites de dose efetiva ocupacional, estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear.....	45
Tabela 12 - Estimativa dos riscos de câncer, durante toda a vida, para indivíduos ocupacionalmente expostos e para a população inteira. ....	45
Tabela 13 - Característica dos detectores plásticos.....	52
Tabela 14 - Condições recomendadas para ataque químico dos detectores plásticos. ....	55
Tabela 15 - Limites de energias, de partículas alfa detectáveis, para alguns detectores plásticos. ....	56

Tabela 16 - Dados de ventilação, nível e potencia dos ventiladores, das minas de fluorita, para as duas campanhas. ....	69
Tabela 17 - Valores da concentração de Rn-222, densidade de traços, número do detector e localização dos detectores das minas de carvão. ....	85
Tabela 18 - Valores da concentração de Rn-222, densidade de traços, número do detector e localização dos detectores da mina de fluorita RB. ....	90
Tabela 19 - Valores da concentração de Rn-222, densidade de traços, número do detector e localização dos detectores da mina de fluorita NF. ....	93
Tabela 20 - Valores da concentração de Rn-222, densidade de traços, número do detector e localização dos detectores da mina de fluorita MF. ....	96
Tabela 21 - Pontos e horários que houve explosões na mina RB. Os pontos negrito correspondem às detonações feitas no Bloco 3 - Nível 152. ....	99
Tabela 22 - Valores da concentração de Ra- 226, da capa (teto), do carvão (produto) e da lapa (piso), em Bq/kg, para cada mina de carvão. ....	102
Tabela 23 - Valores da concentração de Rádio, do granito normal e alterado, e da fluorita verde e roxa, em Bq/kg, para cada mina de fluorita. ....	104
Tabela 24 - Valores da concentração de Rádio das águas, em Bq/L, para cada mina de fluorita. ....	106
Tabela 25 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar e das concentrações de Ra-226, em Bq/kg, para cada tipo de rocha, das minas de carvão. ....	107
Tabela 26 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222, no ar, e as concentrações de Ra-226, para cada tipo de rocha, das minas de fluorita, para a campanha 1. ....	111
Tabela 27 - Valores da concentração de Rn-222 no ar, dose efetiva anual e risco radiológico, a que os trabalhadores estão expostos, para as minas de carvão. ....	116
Tabela 28 - Valores da concentração de Rn-222 no ar, das campanhas 1 e 2, dose efetiva anual e risco radiológico, a que os trabalhadores estão expostos, para as minas de fluorita. ....	117
Tabela 29 - Avaliação de Custos Anuais de Operação do Sistema de Ventilação e do Correspondente Detrimento. ....	120
Tabela 30 - Avaliação Custo Benefício. ....	121
Tabela 31 - Resultados obtidos com o detector Doseman-Pro, na Sala de Café da Mina RB. ....	131

Tabela 32 - Resultados obtidos com o detector Doseman-Pro, na frente de Lavra da Mina RB. ....	132
--	-----

## 1 INTRODUÇÃO

No ambiente em que vive, o homem está constantemente exposto à radioatividade natural, proveniente tanto da interação da radiação cósmica com a atmosfera como da crosta terrestre, que possui em sua constituição elementos químicos radioativos como potássio (K-40) e rubídio (Rb-87) e aqueles pertencentes às famílias radioativas do urânio (U-235 e U-238) e do tório (Th-232). A presença de tais materiais nas paredes das galerias de minas subterrâneas constitui-se numa importante forma de exposição dos trabalhadores mineiros às radiações ionizantes, em particular ao gás nobre radioativo radônio, Rn-222, produto de decaimento do Ra-226, que por sua vez pertence à cadeia de decaimento do U-238.

No Brasil, atualmente, existem dezenas de minas subterrâneas em atividade, isto sem levar em conta os garimpos que eventualmente escapam ao controle dos órgãos regulatórios. No entanto, trabalhos relacionados à avaliação das concentrações de radônio nessas minas e sua implicação em relação à saúde dos trabalhadores ainda não foram realizados de forma sistemática.

Quando há inalação de Rn-222 ou de Rn-220 (este possuindo o nome histórico torônio, produto de decaimento do Tório-232), seus descendentes de meia vida curta podem ser retidos nos pulmões. As partículas  $\alpha$  emitidas por esses radionuclídeos depositados nos pulmões são totalmente absorvidas pelos tecidos pulmonares. Estudos epidemiológicos internacionais envolvendo trabalhadores de minas subterrâneas de urânio e de outros bens minerais detectaram um aumento considerável de casos de câncer de pulmão em relação ao número de casos de câncer de pulmão observados na população em geral (UNSCEAR, 2000).

De acordo com a Comissão Nacional de Proteção Radiológica dos Estados Unidos da América (Publicação NCRP 87), 55% da exposição total do homem à radioatividade natural são devidas à inalação do radônio e de seus filhos. Ademais, a inalação sistêmica do radônio é freqüentemente associada ao surgimento de neoplasias pulmonares. Desta forma, é extremamente relevante a determinação dos níveis de concentração desses elementos radioativos tanto em ambientes de trabalho, como em residências, locais esses com elevado nível de ocupação pelos seres humanos.

Levantamentos realizados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear nas minas subterrâneas de carvão de Figueira, PR, mostraram que, devido à presença de urânio em veios de quartzo que cortam os sedimentos e a ausência ou deficiência de ventilação propiciam altos níveis de concentração de radônio, algumas vezes muito acima do intervalo de níveis de ação proposto internacionalmente (na faixa de 500 a 1.500 Bq/m<sup>3</sup>), embora, de maneira geral, não se deva esperar altas concentrações de urânio diretamente associadas ao carvão. Sabe-se, também, que os depósitos cupríferos da região de Carajás, PA, estão associados indiretamente com minerações de urânio e que, naquela área, galerias subterrâneas abandonadas e sem ventilação acumularam altas concentrações desse gás (Tolentino Junior, 1994).

O presente trabalho tem como objetivo a determinação dos processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas de fluorita e de carvão, visando ao estabelecimento de correlações entre os teores de radônio e as características geológicas das minas estudadas. Tomando-se por base esses dados, é realizada uma avaliação da dose e do risco radiológico a que os trabalhadores dessas minas estão submetidos, de modo a nortear a implantação de ações mitigadoras. Para realizar este trabalho, foram eleitas seis minas subterrâneas do Estado de Santa Catarina (três minas de carvão e três de fluorita).

## **1.1 Justificativa**

A inalação sistêmica do radônio é freqüentemente associada ao surgimento de neoplasias pulmonares e, de acordo com dados da Comissão Nacional de Proteção Radiológica dos Estados Unidos da América, em sua publicação de nº 87, 55% da exposição total do homem à radioatividade natural é devida à inalação do radônio e de seus filhos. Desta forma, é extremamente relevante compreender o processo de liberação do radônio pelas rochas e sua distribuição no ambiente, bem como determinar os níveis de concentração desses elementos radioativos e avaliar o risco radiológico a eles associados em ambientes de trabalho.

## **1.2 Problema**

Ainda não foram realizados de forma sistemática no Brasil trabalhos relacionados à avaliação das concentrações de radônio em todas as minas subterrâneas. A inalação sistêmica do radônio pode ser freqüentemente associada ao surgimento de neoplasias pulmonares. A partir da determinação da concentração de radônio no ar e de rádio em rochas, procura-se saber se é possível compreender os processos de enriquecimento desses elementos radioativos em ambientes de trabalho, locais esses com elevado nível de ocupação e estimar a dose de radiação a que estão submetidos os trabalhadores mineiros.

## **1.3 Hipótese**

Acredita-se que, a partir da determinação da concentração de radônio no ar e de rádio em rochas, minerais e águas subterrâneas, é possível correlacionar essas duas variáveis e compreender os processos de enriquecimento de radônio em minas subterrâneas de carvão e fluorita do Sul do Brasil.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é a determinação dos processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas de fluorita e de carvão, visando ao estabelecimento de correlações entre os teores de radônio e as características geológicas das minas estudadas. Além disso, pretende-se avaliar a dose e o risco radiológico a que estão submetidos trabalhadores da área de mineração, tomando-se por base o levantamento das concentrações de gás radônio.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar as concentrações de radônio no ar;
- Estabelecer correlações entre os teores de radônio e as características geológicas das minas estudadas;
- Determinar teores de rádio nas rochas;
- Estimar as doses de radiação nessas minas e propor a adoção de medidas mitigadoras e de proteção à saúde dos trabalhadores da área de mineração, quando necessário e;
- Avaliar o risco radiológico a que estão submetidos trabalhadores da área de mineração, tomando-se por base as concentrações de gás radônio em todas as minas subterrâneas estudadas.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 O Radônio como Fonte de Radiação Natural

No fim do século XIX, Antoine Henri Becquerel descobriu acidentalmente uma nova propriedade da matéria que, posteriormente, foi denominada radiatividade. Ao colocar sais de urânio sobre uma placa fotográfica em local escuro, verificou que a placa enegrecia. Os sais de urânio emitiam uma radiação capaz de atravessar papéis negros e outras substâncias opacas à luz.

Em 1896, Becquerel incentivou Marie Curie a estudar as radiações, por ele descobertas, emitidas pelos sais de urânio. Após vários anos de trabalho constante, através de processos de concentração de várias classes de *pechblenda*, o casal Marie e Pierre Curie isolaram dois novos elementos químicos, o polônio, nomeado em referência ao país nativo de Marie, e o rádio, nomeado devido à sua intensa radiação. Os termos, radioativo e radioatividade foram criados pelo casal para caracterizar a energia liberada espontaneamente por este novo elemento químico.

Cinco anos decorridos foram suficientes para que a radioatividade não apenas do potássio e do urânio, mas, também, do tório, do polônio, do rádio e do radônio tivessem sido descobertas (Lowder, 1989). Com Pierre Curie e Antoine Henri Becquerel, Marie Curie recebeu o prêmio Nobel de física, em 1903, "em reconhecimento pelos extraordinários serviços obtidos em suas investigações conjuntas sobre os fenômenos da radiação, descoberta por Henri Becquerel".

A presença de radiação ionizante em ambientes foi notada em 1899, como decorrente da radioatividade dos materiais presentes neste ambiente. Entre os anos de 1910 e 1912, Victor Hess e outros, através de uma série de vôos de balão, descobriram que a ionização registrada nas câmaras de ionização inicialmente diminuía com a altura e depois voltava a crescer a altas altitudes. Na época da primeira guerra mundial, já haviam sido descobertas as radiações cósmicas e terrestres e identificados os mais importantes radionuclídeos de ocorrência natural.

O período entre as duas grandes guerras foi a era clássica dos estudos da radiação cósmica e foi também o início da propagação de idéias a respeito do poder curativo das radiações do rádio e radônio. Com o desenvolvimento de armas nucleares após a segunda guerra mundial, o interesse na prospecção de urânio e tório aumentou, gerando com isso um aumento de nosso conhecimento sobre níveis de radiação gama ambiental e concentrações de radionuclídeos em materiais geológicos.

Desde o século XVI, certo adoecimento de trabalhadores de minas vinha sido observado e somente depois de quase 200 anos foi diagnosticado como câncer de pulmão. Por volta de 1950, finalmente, houve o reconhecimento que as altas taxas de câncer em mineiros estavam relacionadas à exposição aos produtos de decaimento do radônio. A partir de então, uma preocupação crescente se estabeleceu com as doses, tanto ocupacionais como em residências, deste tipo de radiação a que as pessoas estão sujeitas.

A contaminação ambiental por radônio e filhos tem sido bastante estudada em todo o mundo a partir do início da década de 80 (Nazaroff, 1988; NCRP, 1988; Neuberger, 1991; Cohen, 1992). Em particular, uma forte motivação para isso decorreu de estimativas feitas que da ordem de 10.000 casos de câncer das vias respiratórias por ano, nos Estados Unidos, seriam decorrência da dose tomada pela população em residências e locais de trabalho (Cohen, 1980).

Por outro lado, Marx (1993) comenta que a primeira indicação de que baixas doses de radiação poderiam ter efeitos benéficos para a saúde veio da indústria nuclear britânica: a freqüência de leucemia e câncer em geral, em

trabalhadores que recebiam taxas de dose modestas ( $10 - 50 \text{ mSv a}^{-1}$ ), era menor que a da média da população inglesa, e comenta ainda que estudos feitos em sobreviventes às bombas de Hiroshima e Nagasaki mostram que a incidência de vários tipos de câncer apresenta um mínimo na faixa de dose de  $20 - 50 \text{ mSv}$ , havendo uma subida linear apenas acima de  $100 \text{ mSv}$ . Ainda segundo Marx, pessoas que sobreviveram, depois de ter recebido doses modestas em Hiroshima e Nagasaki, viveram, em média, 4 anos a mais que a população controle.

Cohen (1993), estudando a relação entre 33 tipos de câncer e exposição a radônio, concluiu que a anti-correlação radônio versus câncer de pulmão é 2,7 vezes maior que outras correlações. Posteriormente, Cohen (1995) cita 12 referências da área de ciências biológicas, onde se mostra que pequenas doses de radiação ativam mecanismos de defesa dos seres vivos, o que, segundo ele poderia explicar a correlação negativa, entre radônio e câncer de pulmão, que ele observou.

Ainda no campo das baixas doses de radiação, Henshaw (1993) comenta que não se tem certeza da correlação radônio e câncer de pulmão, citando 4 estudos de casos onde os resultados são conflitantes.

Mesmo com a possibilidade de efeitos benéficos relacionados a baixas doses de radiação, a filosofia de proteção radiológica se desenvolveu a partir de um sistema de limitação de doses, por meio do qual seriam evitados efeitos determinísticos das radiações ionizantes, ou seja, efeitos para os quais existe um limiar de dose absorvida necessário para sua ocorrência e cuja gravidade aumenta com o aumento da dose.

Mais tarde, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiation Protection*, ICRP), reconheceu a existência de efeitos estocásticos, ou seja, efeitos (câncer) para os quais não existe um limiar de dose para sua ocorrência e cuja probabilidade de ocorrência é uma função da dose. Posteriormente, foi adotada pela ICRP a hipótese de ausência de limiar de dose para efeitos estocásticos, expressando uma atitude de precaução face à incerteza científica e com a finalidade de minimizar a culpa em caso de erro de apreciação. Assim, desconhecida a relação entre doses baixas a moderadamente baixas e efeitos à saúde e mantendo uma postura de prudência, a ICRP optou pelo

modelo da linearidade entre a dose e o efeito, ou seja, qualquer dose, por mais baixa que seja, está associada a uma probabilidade de indução de câncer.

A relevância qualitativa da exposição do ser humano ao radônio pode ser observada quando se leva em conta a dose de radiação oriunda de todas as fontes de radiação natural presentes tanto dentro quanto fora do seu corpo. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam dados do *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR, 1988). Os valores apresentados nas citadas tabelas referem-se à dose efetiva e são doses individuais médias anuais, expressas em microsievert ( $\mu\text{Sv}$ ).

Tabela 1 - Exposição a radiação em seres humanos devido a radionuclídeos internamente depositados.  
Fonte: UNSCEAR, 1988.

<b>FONTE</b>	<b>DOSE (<math>\mu\text{Sv}</math>)</b>
Cosmogênica	15
K-40	180
Rb-87	6
U-238 → Ra-226	19
Rn-222 → Po-214	1100
Pb-210 → Po-210	120
Rn-220 → Tl-208	160
Total	1600

A Tabela 1 mostra que a dose estimada devido a radônio e filhos é a dominante entre os demais radionuclídeos internamente depositados, correspondendo a aproximadamente 70% da dose interna total.

A Tabela 2 mostra que o radônio e seus produtos de decaimento produzem cerca de 2/3 da dose efetiva oriunda das fontes naturais e mais da metade das fontes de radiação consideradas como um todo.

Tabela 2 - Exposição da população norte-americana a todas as fontes de radiação.  
Fonte: UNSCEAR, 1988.

FONTE	DOSE ( $\mu\text{Sv}$ )
Radônio	2000
Outras naturais	1000
Ocupacional	9
Ciclo do combustível nuclear	0.5
Produtos de consumo	100
Fontes ambientais	0.6
Raios-X médico	390
Precipitação radioativa (fall out)	10
Total	3600

## 2.2 Comportamento do Radônio

O radônio é um gás nobre presente na natureza, gás assim chamado por ser relativamente inerte. O radônio é o mais pesado e o único que não possui isótopos estáveis. Sua concentração típica no ar é de  $6 \times 10^{-14}$  ppm. Todos os isótopos naturais do radônio são filhos de isótopos de rádio e são emissores alfa. Por sua vez, os descendentes do radônio (Po, Pb, Bi) são sólidos. Na Tabela 3 e na Tabela 4, são apresentadas as propriedades dos descendentes do Rn-222 e do Rn-220 (ICRP, 1993).

Tabela 3 - Propriedades do Rn-222 e seus descendentes.

Radionuclídeo	Meia vida	Energia Alfa (MeV)	Energia Beta (MeV)	Energia Gama (MeV)
<sup>222</sup> Rn	3,824 d	5,49	-	-
<sup>218</sup> Po (Ra A)	3,05 min	6,00	-	-
<sup>214</sup> Pb (Ra B)	26,8 min	-	1,02; 0,70; 0,65	0,35; 0,30; 0,24
<sup>214</sup> Bi (Ra C)	19,9 min	-	3,27; 1,54; 1,51	0,61; 1,77; 1,12
<sup>214</sup> Po (Ra C')	164 s	7,69	-	-
<sup>210</sup> Pb (Ra D)	22 a	-	0,016; 0,061	0,047
<sup>210</sup> Bi (Ra E)	5,02 d	-	1,16	-
<sup>210</sup> Po (Ra F)	138,3 d	5,30	-	-
<sup>206</sup> Pb (Ra G)	estável			

Tabela 4 - Propriedades de decaimento do Rn-220 (torônio) e descendentes.

Radionuclídeo	Meia Vida	Energia Alfa (MeV)	Energia Beta (MeV)	Energia Gama (MeV)
220 Rn (Th)	55 s	6,29	-	-
216Po (Th A)	0,16 s	6,78	-	-
212Pb (Th B)	10,64 h	-	0,35; 0,59	0,239
212Bi (Th C)	1,0 h	6,05; 6,09	1,55; 2,26	-
212Po (Th C')	0,3 s	8,95	-	-
208Pb (Th D)	estável			
208Tl (Th C)	3,1 m	-	1,80; 1,28; 1,52	2,61; 0,58; 0,51; 0,86
208Pb (Th D)	estável			

Nas Figuras 1 e 2 são apresentadas as séries de decaimento do U-238, isótopo de maior abundância do urânio natural, e a do Tório-232.

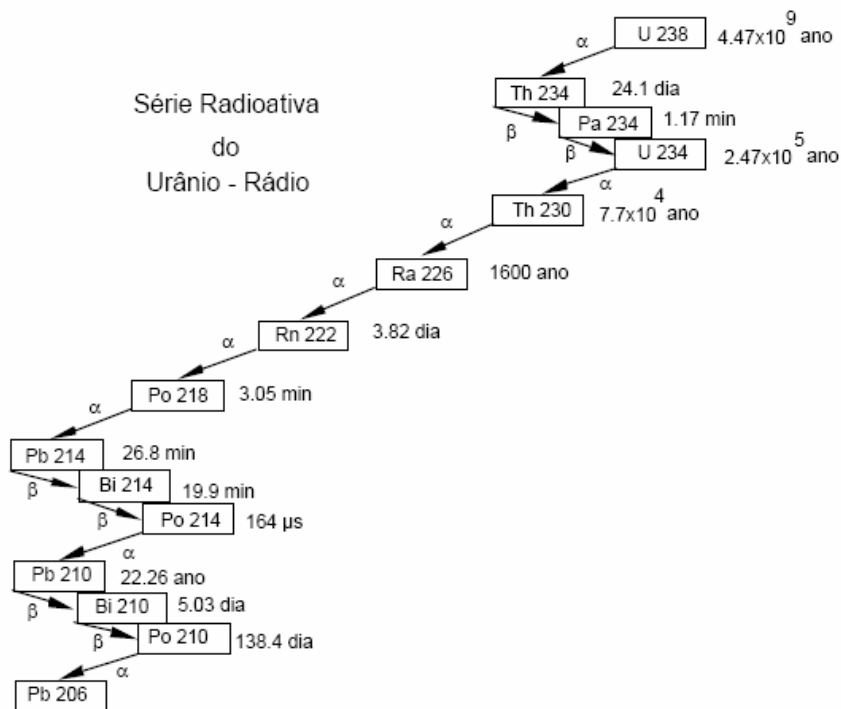


Figura 1 - Série de decaimento do U-238.

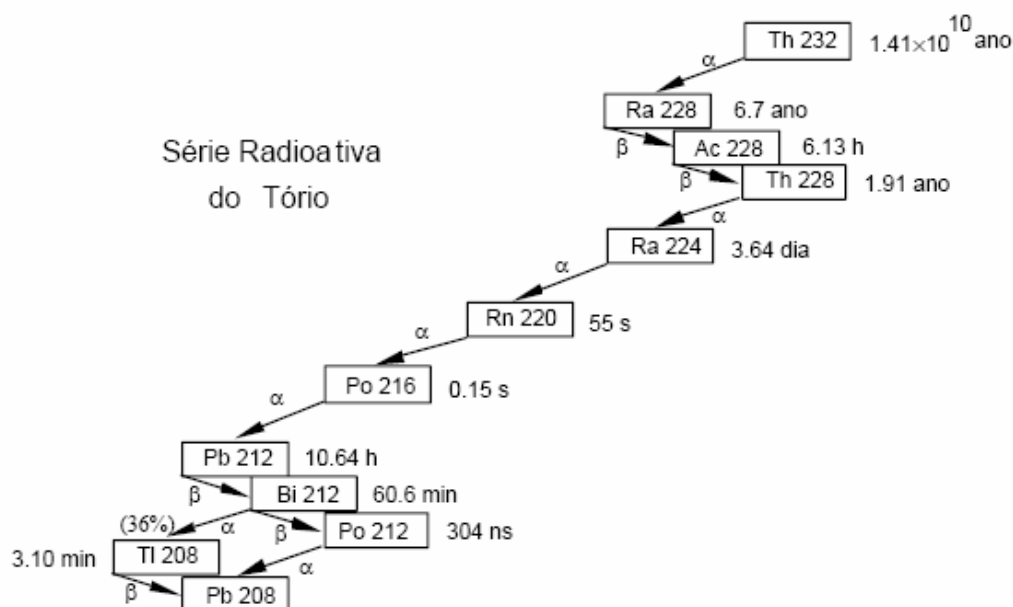


Figura 2 - Séries de decaimento do Th-232.

O radônio pode propagar-se através de material poroso e mover-se no ar. A distância de propagação é limitada pela sua meia vida, isto é, ele será mais facilmente transportado enquanto não decair. Este é o motivo pelo qual o Rn-222 (meia vida: 3,8 dias) pode mover-se em distâncias maiores que o Rn-220 (meia vida: 55 segundos).

O radônio é solúvel em água e em muitos líquidos. A sua solubilidade na água pode explicar a presença de concentrações consideráveis de radônio em cavernas de calcário, rocha que normalmente não contém urânio e ou tório. Como a concentração de radônio no ar é relativamente muito baixa, seus átomos se comportam como átomos individuais e não se depositam como um gás pesado o faria. Esta é a razão pela qual as variações e os gradientes de concentração são influenciados por fatores tais como o movimento do ar e a distância que um átomo de radônio pode ser transportado antes de decair (ICRP, 1993).

Como o primeiro produto do decaimento do radônio é originado de átomos singulares, as suas características químicas não são levadas em consideração. A carga eletrostática no átomo, sua radioatividade e sua mobilidade

são parâmetros mais importantes. Em qualquer ambiente atmosférico contendo filhos de radônio, uma fração dos descendentes irá aderir às partículas de aerossol suspensas no ar e uma parte ficará livre. Quanto maior a quantidade de partículas, maior a probabilidade dos descendentes aderirem a elas e seguirem o caminho delas através do ar. Como essas partículas têm muito mais massa que um único átomo, elas são menos móveis e flutuam no ar, carregando consigo o átomo de Po-218, por exemplo, podendo depositar-se no sistema respiratório, bombardeando os tecidos com emissão alfa e dando seqüência ao decaimento (Pb-214  $\rightarrow\beta$ , Bi-214  $\rightarrow\beta$ , Po-214  $\rightarrow\alpha$ , Pb-210). No caso do Rn-222, o processo de decaimento mais prejudicial à saúde humana ocorre até a formação do átomo de Pb-210, que tem meia vida relativamente longa (20,4 anos) e, no caso do Rn-220, ocorre até o átomo de Pb-208, que é estável.

### 2.2.1 Fontes de Radônio

O radônio é produzido no interior de rochas e solos que contenham urânio e seus produtos de decaimento radioativo em equilíbrio secular ou que contenham rádio, isoladamente. O radônio, Rn-222, é produzido por meio da emissão de partículas alfa pelo seu progenitor, o Ra-226 e o torônio, Rn-220, pela emissão de partículas alfa pelo Th-224. Para uma dada concentração de rádio em diferentes minerais e partículas do solo, a quantidade de radônio que escapa depende de vários parâmetros, tais como, o tamanho da partícula, a concentração de seu progenitor, o poder de emanção, ou seja, a fração de radônio liberado do material, a porosidade, a pressão atmosférica e o grau de saturação da água.

Existem várias fontes de liberação de radônio e torônio para a atmosfera, como solos, rochas, minerais, águas de serviço (água doméstica potável) e águas subterrâneas. As águas de superfície contribuem muito pouco e normalmente não são consideradas.

Após serem formados, os átomos de radônio (Rn-222) e de torônio (Rn-220) possuem uma mobilidade grande e estão livres para difundirem-se entre os interstícios dos minerais e partículas do solo. O radônio e o torônio, geralmente



ocorrem juntos e a razão da quantidade relativa dos dois isótopos variará de acordo com a quantidade de urânio e tório presentes no solo. As concentrações de radônio, para vários metros abaixo da superfície, estão na faixa de 30 à 100 kBq/m<sup>3</sup>, quando comparadas com as encontradas no ar, da ordem de 8 Bq/m<sup>3</sup> (NCRP, 1988).

A taxa de liberação do radônio e do torônio, do solo para a atmosfera, pode variar significativamente do local de interesse da medida e também em função dos parâmetros vistos anteriormente. As variações se encontram na faixa de 2 a 50 mBq/m<sup>2</sup>.s (0,5 a 1,4 pCi/m<sup>2</sup>.s) para diferentes tipos de solos e minerais (NCRP, 1988).

As concentrações típicas de radônio no ar variam de 4 a 15 Bq/m<sup>3</sup> (0,1 a 0,4 pCi/l). No entanto, esses valores sofrem influência pelas variações atmosféricas e dos parâmetros meteorológicos como, velocidade e direção do vento, temperatura e umidade.

As concentrações de radônio e torônio na atmosfera são também influenciadas pelas variações diurnas, ocorrendo principalmente à noite e pela manhã, quando atingem valores máximos de concentração e, atingem valores mínimos à tarde, quando a mistura vertical devido à difusão turbulenta é máxima. Os valores máximos e mínimos sofrem influências de temperatura, ventos e propriedades da mistura (NCRP, 1988).

O radônio, torônio e seus produtos de decaimento radioativo contribuem para o comportamento elétrico da atmosfera. O choque entre as partículas devido ao movimento *browniano* ocasiona a ionização do ar. Além disso, os íons gerados pelo decaimento do radônio e do torônio contribuem com uma parcela importante na ionização da atmosfera. Quase 50% da ionização do ar provem dos emissores alfa desses radionuclídeos, independente do ambiente ser aberto ou fechado (IAEA, 1989).

Uma fonte freqüente de radônio é a água. O rádio, embora em quantidade pequena, está contido nas águas subterrâneas e de superfícies que estão normalmente em contato com rochas e solos. As concentrações típicas de radônio em águas de superfície, normalmente menores que as concentrações

encontradas em águas subterrâneas, são de cerca de  $10 \text{ Bq/m}^3$  e estão em torno dos valores das concentrações encontradas para o rádio na água, o qual não tem contribuição relevante para a radioatividade na atmosfera (IAEA, 1989).

A taxa de emissão de rádio, assim como do radônio nos oceanos são estimadas como sendo de aproximadamente  $4 \text{ Bq/m}^3$  ( $0,1 \text{ pCi/l}$ ) (Wilkening, 1975).

As concentrações de radônio em água potável alcançam valores de até alguns milhares de  $\text{Bq/m}^3$ . Diversos estudos foram realizados em áreas que possuíam altas concentrações de radônio e mostraram que cerca de  $37 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$  de radônio em águas de serviço pode gerar uma concentração de  $37 \text{ Bq/m}^3$  no interior de residências (Hess, 1985).

Atenção especial deve ser dada à presença de radônio em materiais de construção. O radônio, liberado por esses materiais, pode penetrar no ambiente pelo processo de difusão e contribuir razoavelmente para a concentração do radônio no interior de residências e prédios. Em diversos países, têm sido realizados estudos relacionados aos materiais de construção, pois mesmo que essa contribuição seja pequena, pode ser significativa para um aumento na dose da população.

No trabalho de Inceöz (2006) foi mostrado que existem anomalias da concentração de radônio no solo mais próximo a zonas de falhas. Além disso, essas anomalias diminuem drasticamente à medida que se distânciam dessas zonas. Já Walia (2003) mostra que, em geral, existe uma correlação positiva entre a emissão total de radônio e a microsismicidade na área noroeste do Himalaia, Índia, região onde realizou seus estudos.

### 2.2.2 Características da Exalação do Radônio

Alguns átomos dos isótopos de radônio são liberados da matriz sólida por “recuo” (recoil), quando o rádio decai por emissão alfa. A localização do átomo de rádio no grão mineral, a densidade do meio e a direção que o átomo de radônio assume no momento da sua emissão são os principais fatores determinantes para

a saída do meio em que se encontra. Se o átomo de rádio encontra-se localizado em uma região muito interna na estrutura mineral, dificilmente o radônio é exalado (liberado para a atmosfera), mesmo que a direção assumida pelo átomo seja no sentido da superfície do grão.

Por outro lado, se o radônio gerado estiver localizado próximo à superfície e se sua direção for neste sentido, ele poderá se libertar e se difundir para o espaço de poro entre os grãos, ou para planos de fraturas nas rochas. Para a maioria dos solos, somente 10% a 50% do radônio produzido consegue se libertar do grão mineral em que se encontra e entrar nos poros (Tanner, 1978). Para que um átomo de radônio escape do grão mineral para o espaço intersticial (poros) o decaimento deve ocorrer dentro do intervalo de recuo na superfície do grão, este sendo da ordem de 20 -70 nm em minerais comuns. Os átomos de radônio que entram nos interstícios são transportados por difusão e advecção através desses espaços intersticiais até que decaiam ou sejam liberados para a atmosfera (exalação).

O torônio (Rn-220) pelo fato de ter uma meia vida muito curta (55 segundos), quando comparada com a do radônio (Rn-222) tem probabilidade muito pequena de ser exalado e, portanto, somente o Rn-222 será objeto deste estudo.

A Figura 3 ilustra o fenômeno da emanção quando dois grãos esféricos, de cor cinza, com diâmetro de 2  $\mu\text{m}$  estão em contato. A presença de água no espaço do poro é representada pela zona azul e a zona branca representa a presença de ar. Átomo de Ra-226 ( $\bullet$ ) decai no grão superior, emitindo uma partícula alfa,  $\alpha$ , (como mostrado em (A) e transmuta-se em um átomo de Rn-222 (o). O átomo em (A) situa-se dentro do grão a uma profundidade maior que o intervalo de recuo, R; o átomo de Rn-222 retrocedido (representado por A') permanece contido no grão superior. O átomo de Rn-222 (representado por B') escapa do grão superior, mas entra no grão inferior. Após escapar do grão superior, o átomo de Rn-222 (representado por C') perde o resto de sua energia de recuo na água e está livre para se difundir através dos poros. O átomo de Rn-222 (representado por D') perde pouco de sua energia no ar e entra no grão inferior.

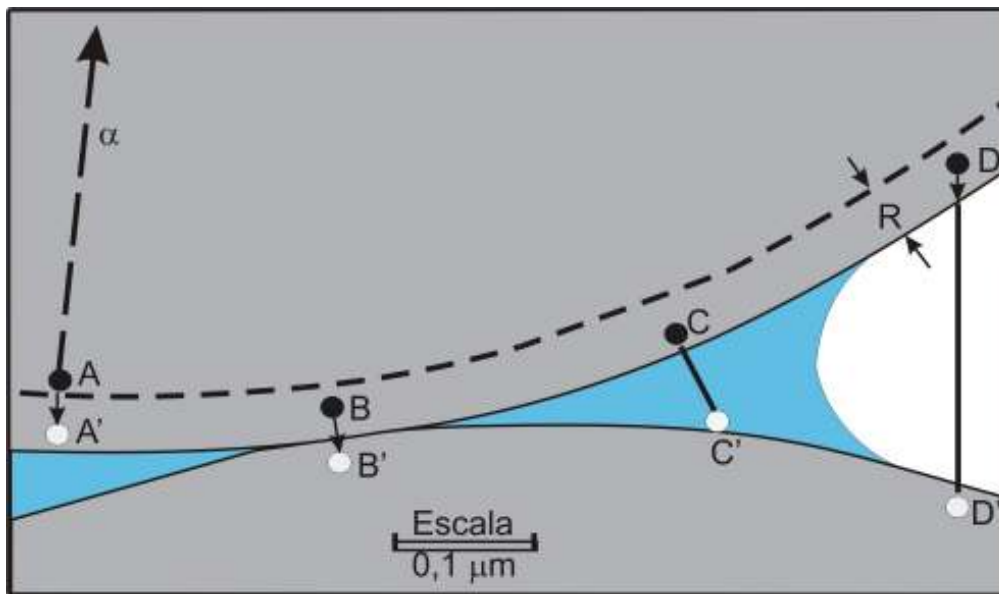


Figura 3 - Diagrama esquemático dos processos de emanação do radônio.

Dois grãos esféricos, de cor cinza, estão em contato; a água no espaço do poro é representada pela zona azul e a zona branca representa a presença de ar. O átomo de Ra-226 (círculo cheio - ●) decai emitindo uma partícula alfa e transmuta-se em um átomo de Rn-222 (círculo vazio - ○).

Fonte: Tanner, 1978.

O coeficiente de emanação, fator de emanação ou poder de emanação é a fração de átomos de radônio liberada por um grão contendo rádio no espaço intersticial das rochas ou solo. Valores típicos do coeficiente de emanação para rochas e solo variam entre 0,05 e 0,7.

A velocidade com a qual o radônio se desloca no solo é controlada, principalmente, pela quantidade de água presente nos interstícios dos grãos (umidade), pela porcentagem de poros existentes (porosidade) e pela distância entre os grãos (permeabilidade). Desta forma, minas localizadas em áreas de solos porosos e permeáveis poderão conter elevadas concentrações de radônio em seus interiores, mesmo que a concentração de Ra-226 do solo seja considerada normal ou baixa (e.g. 20 Bq/kg). O mesmo não se verifica em regiões que possuam solos úmidos e impermeáveis (Aldenkamp, 1994).

O Rn-222 pode exalar da crosta terrestre e de materiais de construção por difusão molecular ou por diferença de pressão e difundir-se na atmosfera, sendo

exalado continuamente a uma taxa determinada pelas diferentes conformações geológicas (estruturas minerais), geoquímicas (teor de Ra-226) e ambientais (umidade, gradiente térmico, pressão do ar, velocidade do vento). A Figura 4 apresenta os processos de exalação do radônio a partir do material de construção ou do solo.

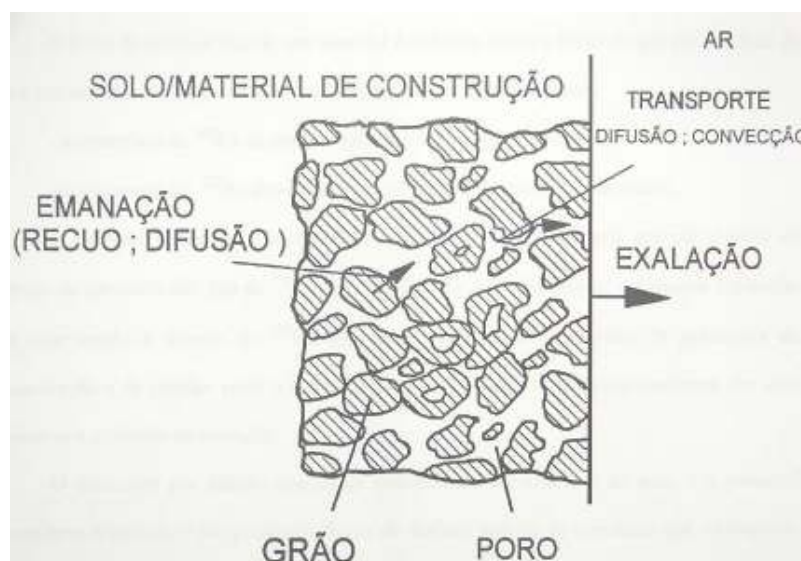


Figura 4 - Exalação do radônio a partir do material de construção ou do solo.

Fonte: Pörsendorfer, 1993.

O radônio exalado da superfície terrestre ou de materiais de construção é rapidamente dispersado e diluído na atmosfera através de convecção vertical e das turbulências (Liu, 1984). Entretanto, níveis elevados desse gás podem ser observados se o radônio exalado ficar confinado em ambientes fechados. Nestes ambientes fechados ou pouco ventilados, como minas subterrâneas, poderão atingir níveis de concentração muito elevados.

O aumento da concentração de radônio no ar implica também no imediato aumento da concentração de seus filhos de meia vida curta, que são adsorvidos nos particulados presentes no ar, dando origem a um aerossol radioativo. Entretanto, devido à deposição desta poeira e à variação na taxa de ventilação e na pressão atmosférica, o equilíbrio secular entre o gás radônio e seus filhos, de meia vida curta, não é estabelecido (Pörsendorfer, 1993).

O fluxo de radônio de um material é definido como o fluxo do gás por unidade de área e por unidade de tempo ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e é função de dois fenômenos: (a) o transporte de Rn-222 da matriz sólida para o interstício do poro e; (b) o transporte de Rn-222 dos interstícios do poro até a superfície da matriz.

O primeiro fenômeno é chamado de *emanação* e é causado pela energia cinética da emissão da partícula alfa ( $\alpha$ ) do Ra-226 no momento de seu decaimento e o conseqüente recuo do átomo de Rn-222 recém formado. O segundo fenômeno está relacionado à difusão do Rn-222 provocada por forças decorrentes de gradientes de concentração e de pressão entre o material e o meio externo. O processo resultante dos dois fenômenos é chamado *exalação*.

### 2.3 Exposição por Inalação de Filhos do Radônio de Meia Vida Curta

Os filhos do radônio 222 de meia vida curta são: polônio 218, chumbo 214, bismuto 214 e polônio 214. O esquema de decaimento dos filhos do radônio de meia vida curta é mostrado na Figura 5.

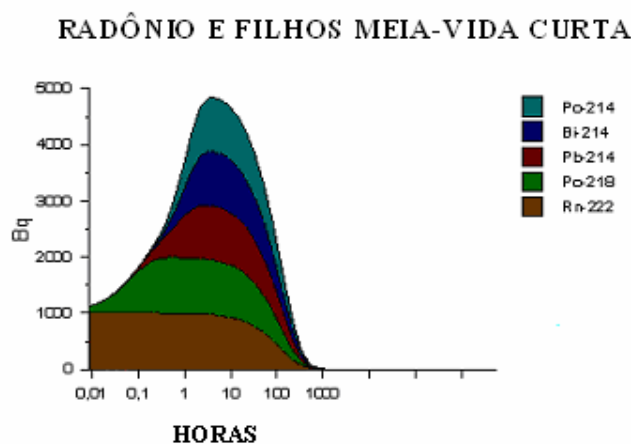


Figura 5 - Esquema de decaimento dos filhos de meia vida curta do radônio (diagrama empilhado ou cumulativo).

Como esses elementos não estão presentes no meio ambiente em quantidades que permitam análise química, são caracterizados por suas propriedades radiométricas, com base em sua cadeia de decaimento.

Durante a abertura de galerias subterrâneas, o Rn-222 que se encontra nos interstícios das rochas e nas fraturas pode ser liberado para o interior das galerias e inalado.

Os filhos do Rn-222, que decaem por emissão de partículas alfa no interior do organismo, podem causar sérios danos aos tecidos atingidos, podendo levar ao câncer de pulmão.

## **2.4 Nível de Trabalho (*Working Level – WL*)**

Muitos artigos científicos na área de radônio expressam seus resultados em termos de Nível de Trabalho (*Working Level*) e Nível de Trabalho Mensal (*Working Level Month*).

Um Nível de Trabalho (*Working Level – WL*) é definido com qualquer combinação dos descendentes de meia vida curta do radônio em um litro de ar que resultarão na emissão de  $1,3 \times 10^{-5}$  MeV de energia pelas partículas alfa. 1 WL corresponde a uma concentração de atividade de  $3700 \text{ Bq/m}^3$  para o Rn-222. No Sistema Internacional, um nível de trabalho (1WL) equivale a  $2,08 \times 10^{-5} \text{ J/m}^3$ .

Um Nível de Trabalho Mensal (*Working Level Month - WLM*) representa a exposição a uma concentração de atividade de 1 WL durante 170 h (um mês de trabalho). Para o Rn-222,  $1\text{WLM} = 3,54 \times 10^{-3} \text{ J.h/m}^3$ .

## 2.5 Concentração de Energia Alfa Potencial (CEAP) Fator de Equilíbrio (F) e Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC)

A Concentração de Energia Alfa Potencial (CEAP) é definida para o Rn-222 como a soma das energias alfa emitidas durante seu decaimento até o Pb-210 por volume de ar.

Para o Rn-222, a energia alfa potencial é igual a 19,2 MeV (5,5 MeV + 6 MeV + 7,7 MeV) sendo equivalente a  $1,3 \times 10^5$  MeV/L durante o decaimento até o Pb-210 ( $101,3$  pCi/L =  $3,748$  Bq/L =  $3748$  Bq/cm<sup>3</sup>).

A Tabela 5 apresenta os valores de energia alfa potencial para os filhos do radônio, por átomo e por unidade de atividade (Bq) até o completo decaimento de seus átomos ( $A = \int N dt = N_0 / \lambda$ ).

Tabela 5 - Energia alfa potencial dos filhos do Rn-222 de meia-vida curta

Radionuclídeo	MeV/átomo	$10^{-12}$ J/átomo	MeV/Bq	$10^{-10}$ J/Bq
Po-218 (*)	13,69	2,19	3.615	5,79
Pb-214 (*)	7,69	1,23	17.840	28,6
Bi-214 (*)	7,69	1,23	13.250	21,2
Po-214	7,69	1,23	0,002	$3 \times 10^{-6}$
<b>TOTAL</b>			34.710	55,6

1 MeV =  $1,6 \times 10^{-13}$  J.

(\*) devido ao decaimento até o Po-214.

Pode ser observado na Tabela 5 que a concentração de energia alfa potencial do radônio em equilíbrio com os filhos é igual à soma das energias alfa potencial, ou seja,  $5,56 \times 10^{-9}$  J/Bq.

A obtenção dos valores de energia alfa potencial em unidade de MeV/Bq ou J/Bq se explica por meio da relação que existe entre atividade, A, e número de átomos radioativos, N. Assim, para um átomo, a atividade é dada por  $A = \lambda \cdot 1$ , ou seja, 1 átomo corresponde a  $(\ln 2 / t_{1/2})$  Bq, bastando dividir os valores dados em MeV/átomo ou J/átomo pela constante de decaimento de cada radionuclídeo.



Com base na Tabela 5, a concentração de energia alfa potencial (CEAP) para qualquer mistura dos filhos do radônio de meia vida curta pode ser calculada de acordo com a equação abaixo (ICRP, 1993), uma vez conhecida as concentrações de Po-218, Pb-214 e de Bi-214 (dadas em átomos/L).

$$\text{CEAP (J/m}^3\text{)} = \frac{[13,69 * C_{\text{Po}} + 7,69 * C_{\text{Pb}} + 7,69 * C_{\text{Bi}}] * 20,8 \times 10^{-6} \text{ J/m}^3}{1,3 \times 10^5 \text{ MeV/L}}$$

Quando as concentrações dos filhos do radônio forem dadas em Bq, a seguinte equação é aplicável (ICRP, 1993):

$$\text{CEAP(J/m}^3\text{)} = \frac{[3.615 * C_{\text{Po}} + 17.840 * C_{\text{Pb}} + 13.250 * C_{\text{Bi}}] * 20,8 \times 10^{-6} \text{ J/m}^3}{1,3 \times 10^5 \text{ MeV/L}}$$

Tanto os filhos do radônio como os do torônio raramente são encontrados em equilíbrio na natureza, dificultando a determinação da dose no pulmão.

Para contornar essa dificuldade, define-se uma quantidade chamada Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC) (ICRP, 1993), que corresponde à concentração de radônio em equilíbrio com seus filhos de meia vida curta, que liberaria no ar a mesma energia potencial alfa por unidade de volume que a concentração real de radônio e filhos presentes e não em equilíbrio.

$$\text{EEC} = (3.615/34.710)C_{\text{Po-218}} + (17.840/34.710) C_{\text{Pb-214}} + (13.250/34.710) C_{\text{Bi-214}}$$

O fator de equilíbrio (F) descreve a fração potencial de decaimento alfa dos filhos de meia-vida curta do radônio comparado com o equilíbrio secular conforme equação abaixo:

$$F = \text{EEC} / C_{\text{Rn-222}}$$

$$F = (0,105 C_{\text{Po-218}} + 0,515 C_{\text{Pb-214}} + 0,380 C_{\text{Bi-214}}) / C_{\text{Rn-222}}$$

Onde  $C$  representa a concentração do radionuclídeo subscrito e as constantes representam as frações relativas de contribuição de cada produto de decaimento para o potencial total  $E_\alpha$  (energia relativa da radiação alfa) relativo a uma atividade unitária de decaimento do gás.

Observe que  $F = 1$  significa equilíbrio secular entre o Rn-222 e seus filhos de meia vida curta, Po-218, Pb-214 e Bi-214.

Em locais fechados o fator de equilíbrio depende da taxa de ventilação e em locais externos (exteriores) da distância da fonte, velocidade do vento, entre outros fatores.

O fator de equilíbrio é geralmente adotado na literatura internacional como igual a 0,8 em áreas externas e 0,4 em áreas internas.

## 2.6 Outras Definições Relevantes

Para facilitar a compreensão de alguns aspectos relacionados à proteção radiológica abordados neste trabalho, algumas definições e conceitos constantes na Norma CNEN-NN-3.01 (2005) são apresentados a seguir.

Detrimento - dano total esperado, devido a efeito estocástico, em um grupo de indivíduos e seus descendentes, como resultado da exposição deste grupo à radiação ionizante. É determinado pela combinação das probabilidades condicionais de indução de câncer letal, câncer não letal, danos hereditários e redução da expectativa de vida

Dose absorvida -  $D$  - grandeza dosimétrica fundamental expressa por  $D = d_\varepsilon / dm$ , onde  $d_\varepsilon$  é a energia média depositada pela radiação em um volume elementar de matéria de massa  $dm$ . A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma (J/kg), denominada gray (Gy).

Dose absorvida comprometida -  $D(\tau)$  - grandeza expressa por  $D(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{D}(t) dt$ , onde  $t_0$  é o instante em que ocorre a incorporação,  $\dot{D}(t)$  é a taxa

de dose absorvida em um tempo  $t$ , e  $\tau$  é o tempo transcorrido após a incorporação das substâncias radioativas. Quando não especificado de outra forma,  $\tau$  tem o valor de 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para a incorporação por crianças.

Dose coletiva - expressão da dose efetiva total recebida por uma população ou um grupo de pessoas, definida como o produto do número de indivíduos expostos a uma fonte de radiação ionizante, pelo valor médio da distribuição de dose efetiva desses indivíduos. A dose coletiva é expressa em pessoa-sievert (pessoa.Sv).

Dose efetiva -  $E$  - é a soma das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos,  $E = \sum_T w_T \cdot H_T$ , onde  $H_T$  é a dose equivalente no tecido ou órgão e  $w_T$  é o *fator de ponderação de órgão ou tecido*. A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma (J/kg), denominada sievert (Sv).

Dose efetiva comprometida -  $E(\tau)$  - grandeza expressa por  $E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau)$ , onde  $H_T(\tau)$  é a dose equivalente comprometida no tecido T no período de integração  $\tau$  e  $w_T$  é o fator de ponderação de órgão ou tecido. Quando não especificado de outra forma,  $\tau$  tem o valor de 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para a incorporação por crianças

Dose equivalente -  $H_T$  - grandeza expressa por  $H_T = D_T w_R$ , onde  $D_T$  é dose absorvida média no órgão ou tecido e  $w_R$  é o fator de ponderação da radiação. A unidade no sistema internacional é o joule por quilograma (J/kg), denominada sievert (Sv).

Dose equivalente comprometida -  $H_T(\tau)$  - grandeza expressa por  $H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt$ , onde  $t_0$  é o instante em que ocorre a incorporação,  $\dot{H}_T(t)$  é a taxa de dose equivalente no órgão ou tecido no tempo  $t$  e  $\tau$  é o período de tempo transcorrido após a incorporação das substâncias radioativas. Quando não especificado de outra forma,  $\tau$  tem o valor de 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para a incorporação por crianças.

Exposição é o ato ou efeito de estar submetido à radiação ionizante.

Níveis de Ação são os valores de taxa de dose ou de concentração de atividade acima dos quais devem ser adotadas ações protetoras ou remediadoras em situações de emergência ou de exposição crônica. Cabe observar que a Agência Internacional de Energia Atômica recomenda o valor médio de  $1000 \text{ Bq/m}^3$  para a tomada de ações remediadoras relacionadas à exposição crônica envolvendo radônio em ambientes de trabalho (IAEA, 1996).

Otimização da proteção radiológica é um processo aplicável a exposições causadas por uma determinada fonte, salvo no caso das exposições médicas, no qual a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições mantenham-se tão baixas quanto possa ser razoavelmente exequível, tendo em conta os fatores econômicos e sociais. Nas avaliações quantitativas de otimização, o valor do coeficiente monetário por unidade de dose coletiva não deve ser inferior, em moeda nacional corrente, ao valor equivalente a US\$ 10.000/pessoa.sievert.

## 2.7 Cálculo da Dose Efetiva e do Risco devido à Inalação de Radônio

A dose efetiva, E, correspondente aos filhos do radônio de meia-vida curta durante um ano pode ser calculada com base na equação abaixo (ICRP, 1993):

$$E \text{ (Sv/ano)} = K_1 \times R \times t \times F \times K_2 \times C$$

Onde:

- $K_1$  = Dose efetiva relativa a uma energia absorvida de 1 J ou seja igual a 2 Sv/J;
- R = Taxa de respiração em  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

Alguns países recomendam utilizar um valor de  $0,75 \text{ m}^3/\text{h}$  para áreas internas e interiores de residências e  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  para áreas externas;

- t = Tempo de duração da exposição em h/ano;

Geralmente considera-se que o indivíduo permanece 80% de seu tempo em local fechado e 20% do tempo em área externa.

- F = fator de equilíbrio, igual a 0,4 para áreas internas;

-  $K_2$  = Energia alfa potencial ( $J/m^3$ ) por ( $1 Bq/m^3$  de Rn-222 em equilíbrio com seus filhos);

$$K_2 = 5,54 \times 10^{-9} J/Bq = ([2,1 \times 10^{-5} J/m^3]/[3746 Bq/m^3]);$$

- C = Concentração de radônio no ar em equilíbrio em  $Bq/m^3$ ;

$$\text{Lembrando que: } 1 \text{ WL} = 21 \mu\text{J}/m^3 = 3746 Bq/m^3 \text{ ECC};$$

$$1 \text{ WLM} = 1 \text{ WL} \times 170 \text{ h} = 3,57 \times 10^{-3} \text{ Jh}/m^3 = 3,57 \text{ mJh}/m^3;$$

$$1 \text{ WLM/ano} = 4,0 \text{ mSv/ano para público ou}$$

1 WLM/ano = 5,0 mSv/ano para o indivíduo ocupacionalmente exposto, IOE;

Fator de risco para câncer mortal e não mortal será igual a:

$$0,000283/WLM [8 \times 10^{-5}/(\text{mJ.h}/m^3)] \text{ (ICRP, 1993)}.$$

## 2.8 Exposição por Inalação de Filhos do Radônio de Meia Vida Longa

São considerados filhos do radônio com meia vida mais longa: o Po-210, o Bi-210 e o Pb-210. O esquema de decaimento dos filhos do radônio de meia vida mais longa é mostrado na Figura 6.

A escala de tempo, no entanto, é tal que eles parecem ter uma existência separada do isótopo pai (radônio). Esse longo tempo de meia vida faz com que,

quando presentes na atmosfera, sempre apareçam agregados a partículas do aerossol ambiental, que são responsáveis pelo seu comportamento na atmosfera.

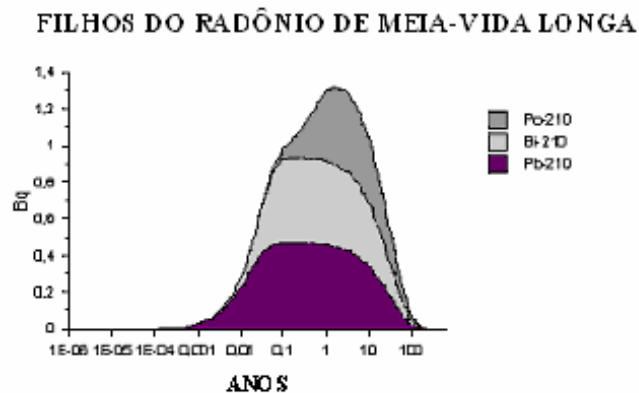


Figura 6 - Esquema de decaimento dos filhos do radônio com meia vida longa (diagrama empilhado ou cumulativo)

A dose efetiva  $E_i$  em Sv/ano, em um indivíduo para cada um dos radionuclídeos  $i$  de meia-vida longa, pode ser calculada (ICRP, 1993) utilizando-se:

$$E_i = C_i \times TI \times TP \times FD$$

Onde:

- $C_i$  = Concentração do radionuclídeo  $i$ , em Bq/m<sup>3</sup>;
- $TI$  = Taxa de Inalação em m<sup>3</sup>/h, normalmente considerada igual a 0,83 m<sup>3</sup>/h;
- $TP$  = Tempo de Permanência no local em h/ano, normalmente considerado igual a 2000 h/ano; e
- $FD$  = fator de conversão de dose efetiva para adultos em Sv/Bq estabelecido para cada radionuclídeo na Norma CNEN-NN-3.01 (2005)

Assim para a concentração de 1Bq/m<sup>3</sup> desses radionuclídeos no ar, temos:

$$E_{Po-210} = [1 \times 0,4/1000] \text{ Bq/m}^3 \times 0,83 \text{ m}^3/\text{h} \times 2000 \text{ h/ano} \times 4,3 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq} = 2,9 \times 10^{-6} \text{ Sv/ano}$$

$$E_{Bi-210} = [1 \times 0,4/1000] \text{ Bq/m}^3 \times 0,83 \text{ m}^3/\text{h} \times 2000 \text{ h/ano} \times 9,3 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq} = 6,2 \times 10^{-8} \text{ Sv/ano}$$

$$E_{Pb210} = [1 \times 0,4/1000] \text{ Bq/m}^3 \times 0,83 \text{ m}^3/\text{h} \times 2000 \text{ h/ano} \times 5,6 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq} = 3,7 \times 10^{-6} \text{ Sv/ano}$$

Sendo a Dose Efetiva igual à soma das doses efetivas calculadas individualmente para cada radionuclídeo, totalizando  $6,7 \times 10^{-6}$  Sv/ano para uma concentração de  $1 \text{ Bq/m}^3$  de cada um desses três radionuclídeos considerados.

## 2.9 Otimização

A metodologia de otimização requer a identificação das opções de proteção radiológica e dos seus fatores relevantes. O custo e desempenho das opções devem ser quantificados.

O custo de proteção inclui todos os esforços financeiros necessários para se obter o nível de proteção desejado, podendo incluir aspectos de proteção difíceis de serem quantificados tais como programas de treinamento e supervisão gerencial.

Será considerada ótima a opção que minimizar a seguinte expressão:

$$X + \alpha S$$

Onde, X é o custo da proteção radiológica, S é o compromisso de dose coletiva, em pessoa-sievert, e  $\alpha$  é o coeficiente monetário, em moeda corrente/pessoa-sievert.

Como saber se uma atividade está otimizada, conforme preconiza o Princípio da Otimização?

Primeiramente, é necessário converter risco (dose) em detrimento, este expresso em termos monetários.

Vários trabalhos relacionados com a estimativa monetária do detrimento foram publicados, resultando em valores entre 1.000 e 25.000 US\$/pessoa-Sv.

No Brasil, para as avaliações quantitativas de otimização, o valor do coeficiente monetário por unidade de dose coletiva não deve ser inferior, em moeda nacional corrente, ao valor equivalente a US\$ 10.000/pessoa-sievert.

As principais ferramentas de otimização são: (a) análise Custo Benefício; (b) análise Custo-Benefício Expandida; e (c) análise por Atributos Múltiplos.

A Norma CNEN-NN-3.01 (2005) determina que seja empregada a análise custo-benefício. A análise Custo-Benefício tem por objetivo escolher, entre duas ou mais opções, aquela que maximize o benefício líquido e se aplique à maioria das atividades, estando baseada na equação a seguir:

$$B = V - (P + X + Y)$$

Onde, B é o Benefício Líquido de uma atividade; V é o Benefício Bruto dessa atividade; P é o Custo Básico da Produção; X é o Custo para alcançar um nível de segurança adequado, incluindo o custo social; e Y é o Detrimento (associado à dose de radiação), sendo igual à Dose Coletiva, S, multiplicada pelo valor da constante alfa.

Considerando que a atividade com radiação ionizante esteja justificada, V e P são fixos; Assim, o benefício líquido é máximo quando o valor de X + Y for mínimo.

## **2.10 O Radônio em Minas Subterrâneas**

A emissão de radônio em trabalhos mineiros ocorre devido à presença de urânio, tório e/ou rádio nas rochas das frentes de mineração e paredes das galerias. Nas Tabelas 6, 7 e 8, podem ser comparados os teores de urânio em diferentes tipos de rochas cujo decaimento dará origem aos teores de rádio (IAEA, 2003).



Tabela 6 - Teores de urânio em diferentes rochas magmáticas.

Fonte: IAEA, 2003.

Tipos Petrológicos	Rochas Plutônicas		Tipos Petrológicos	Rochas Vulcânicas	
	Teores Médios (ppm de U)	Faixa de Teores (ppm de U)		Teores Médios (ppm de U)	Faixa de Teores (ppm de U)
<b>Ultrabásicas</b>	0,02	---	---	---	---
<b>Dunito, peridotito</b>	0,02	0,003 - 0,05	---	---	---
<b>Piroxenito</b>	0,7	---	---	---	---
<b>Básicas</b>	0,9	0,2 - 3,4	---	---	---
<b>Gabro</b>	0,84	0,6 - 1,07	<b>Basalto</b>	---	0,1 - 2,3
	---	---	<b>Basalto toleítico</b>	0,15	---
	---	---	<b>Basalto alcalino</b>	0,5	---
<b>Intermediárias</b>	2	1,4 - 3,03	---	---	---
<b>Diorito</b>	2	0,5 - 11,5	<b>Andesito</b>	0,9	0,8 - 3
<b>Granodiorito</b>	2,6	1 - 9	---	---	---
<b>Félsicas</b>	4,6	2,2 - 21	---	---	---
<b>Granito</b>	3,5	2,2 - 15	<b>Dacito</b>	4	0,9 - 7,5
<b>Leucogranito</b>	8	6 - 21	<b>Riolito</b>	8	3 - 25
<b>Pegmatito</b>	---	10 - 1000	---	---	---
<b>Granito alcalino</b>	---	10 - 200	<b>Traquito</b>	---	10 - 50
<b>Sienito alcalino</b>	---	2 - 20	<b>Fonolito</b>	---	3 - 18
<b>Sienito nefelínico</b>	---	3 - 60	---	---	---
<b>Carbonatito</b>	---	50 - 500	---	---	---

Tabela 7 - Teores de urânio das principais rochas metamórficas.

Fonte: IAEA, 2003.

Tipos Petrológicos	Teores Médios (ppm de U)	Faixa de Teores (ppm de U)
<b>Quartzito, metagrauvaca</b>	1,5	---
<b>Xisto</b>	2	0,1 - 10
<b>Xisto grafitoso</b>	3,5	1 - 100
<b>Anfibolito</b>	0,5	0,3 - 3,5
<b>Gnais</b>	3	0,1 - 10
<b>Granulito</b>	1	0,2 - 2,5
<b>Eclogito</b>	0,2	0,01 - 0,8

Tabela 8 - Teores de urânio das principais rochas sedimentares.

Fonte: IAEA, 2003.

Tipos Petrológicos	Teores Médios (ppm de U)	Faixa de Teores (ppm de U)
<i>Rochas detríticas</i>	3	0,45 - 5,9
Arenito		0,45 - 3,21
Grauvaca		0,5 - 2,1
Quartzito	0,45	0,2 - 0,6
Argilito	3,7	1 - 13
Folhelhos pretos continentais		2 - 4,8
Folhelhos pretos marinhos		10 - 1244
<i>Rochas carbonáticas</i>	2,2	0,01 - 9
Calcário	2	0,5 - 6
Dolomito		0,03 - 2
<i>Evaporitos</i>	0,1	0,01 - 0,43
Anidrita, gipsita	0,1	
Halita, silvita	0,1	
<i>Rochas fosfáticas</i>		8,5 - 300
<i>Outras rochas</i>		
Laterita ferruginosa		10 - 100
Bauxita	11,4	3 - 27
Bentonita	5	1 - 21

Na Tabela 9 são mostradas as concentrações em atividade do rádio-226 encontradas em alguns tipos de rochas.

Tabela 9 - Concentrações de atividade do Ra-226 nas grandes famílias de rochas

Fonte: IAEA, 2003.

Tipos Petrológicos	Concentração de Atividade Média do Ra-226 (Bq/kg)	Faixa de Concentrações de Atividade (Bq/kg)
Granitóides	78	1 - 500
Basaltos	11	0,4 - 41
Ortognaisses	50	1 - 1800
Metasedimentos	40	1 - 660
Carbonatos	45	0,4 - 340
Rochas sedimentares detríticas	60	1 - 990
Xistos aluminosos	---	120 - 4500

Dependendo da magnitude da superfície interna dos minerais, uma pequena parte do radônio penetra em capilares, microfaturas e poros dessa rocha. Apesar do processo físico da liberação não ser perfeitamente conhecido, sabe-se que só uma parte dos átomos de radônio produzidos pelo decaimento é liberada para o meio circundante (ar e água).

Dois mecanismos diferentes são responsáveis pela migração do radônio (IAEA, 2003). O primeiro é a difusão, pelo qual esse gás se move em relação ao fluido ou ao ar que preenche os poros do meio; o segundo é o movimento do próprio líquido ou ar através do meio poroso, carreando o radônio, como, por exemplo, o movimento de convecção do ar.

A velocidade de difusão é controlada pela: (a) porosidade ou grau de compactação do material; (b) grau de umidade; e (c) temperatura.

O transporte do radônio em rochas ou solos é, também, influenciado por forças mecânicas, tais como compressão, compactação e operações com explosivos.

A taxa de exalação é a taxa com que o radônio é emitido da superfície de materiais como rochas, solos, lamas, materiais de construção, etc. Às vezes é utilizado também o termo fluxo como taxa de exalação. A exalação em afloramentos ou amostras de rochas pode ser menor do que a proveniente das rochas das paredes da mina ou de blocos de minério devido ao seu maior número de fraturas e à presença de rachaduras causadas pelas explosões. A taxa de exalação também cresce com o aumento do tamanho dos blocos ou partículas das rochas ou minérios contendo urânio e ou tório associados. De acordo com a literatura, os erros envolvidos na medição da exposição ao radônio em ambientes subterrâneos podem ser de  $\pm 50\%$  a  $\pm 100\%$  (Tolentino Junior 1994; Magalhães, 1999).

A Tabela 10 apresenta as concentrações típicas de radônio em minas subterrâneas de alguns países.

Tabela 10 - Concentrações típicas de Radônio em minas subterrâneas de alguns países.

Tipo de Mina	País	Concentração média potencial de energia alfa (WL)	Concentração de Radônio (Bq/m <sup>3</sup> )
Urânio	França	0,11 - 0,18	2.035 - 3.330
	Estados Unidos	0,51 - 0,71	9.435 - 13.335
	Itália	< 1	< 18.500
Outros Minérios Metálicos	Finlândia	0,2 - 0,4	3.700 - 7.400
	Itália	0,01 - 0,6	185 - 11.100
	Noruega	0,05 - 0,07	925 - 1.295
	Polônia	0,1 - 4	1.850 - 74.000
	Inglaterra	0,01	185
	Estados Unidos	0,12 - 0,31	2.220 - 5.550
	África do Sul	0,01 - 0,1	< 200 - 1.200
Carvão	Reino Unido	0,001 - 0,28	22 - 518
	Índia (Godavarikhani)	0,002 - 0,02	46 - 354
	Iran	0,008 - 0,28	146 - 520
	Polônia	0 - 0,38	0 - 7000
	Turquia	0,001 - 0,004	31 - 85
	Paquistão	0,006 - 0,02	121 - 408

Nos Estados Unidos, a taxa máxima de exalação admitida em minas subterrâneas é 0,74 Bq/m<sup>2</sup> (Lubin, 1994). Na África do Sul, não há limite definido, pois considerações dosimétricas determinarão tais limites. Sabe-se que poços/galerias (*shaft*) de algumas minas estão sendo fechadas porque, após 4 anos de tentativas, não foi possível manter as doses em níveis inferiores ao valor de 20 mSv/a preconizado pela Agência Internacional de Energia Atômica.

No caso de indivíduos ocupacionalmente expostos aos produtos do decaimento do radônio, os requisitos da Comissão Nacional de Energia Nuclear para os limites de doses podem ser vistos na Tabela 11. O limite de dose efetiva anual, E, para indivíduos do público é 1 mSv (CNEN, 2005).

Tabela 11 - Limites de dose efetiva ocupacional, estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Fonte: CNEN, 2005

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

A partir de estudos realizados com sobreviventes das bombas atômicas lançadas no Japão em 1945, foram estimados os riscos de câncer durante toda a vida para indivíduos ocupacionalmente expostos e para a população como um todo. Os valores obtidos para esses dois grupos diferem devido à maior sensibilidade dos jovens à indução de câncer. Estimativas adicionais relativas ao risco de câncer não fatal bem como ao de surgimento de efeitos hereditários também foram realizadas, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Estimativa dos riscos de câncer, durante toda a vida, para indivíduos ocupacionalmente expostos e para a população inteira.

Fonte: CNEN, 2005.

População exposta	DETRIMENTO ( $10^{-2}$ /SV)			
	Câncer fatal	Câncer não fatal	Efeitos hereditários graves	Total
<b>Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOE)</b>	4,0	0,8	0,8	5,6
<b>População Inteira</b>	5,0	1,0	1,3	7,3

Assim, a partir da estimativa de doses anuais recebidas por trabalhadores em minas subterrâneas, será possível estimar os respectivos riscos de câncer fatal para os trabalhadores mineiros (dose efetiva anual x 50 anos x 0,056/Sv) que, no Brasil, em sua maioria, não são considerados indivíduos ocupacionalmente expostos podendo, assim, relacionar esses riscos aos riscos não radiológicos associados à atividade mineira (IAEA, 2003; CNEN, 2005).

O controle da exposição ao radônio em minas subterrâneas pode ser feito de duas maneiras: (a) avaliação e classificação das áreas de trabalho; e (b) monitoração dos trabalhadores.

A diminuição das concentrações de radônio num ambiente de trabalho subterrâneo pode ser obtida por: (a) redução do escape de radônio de áreas já lavradas e não ventiladas para as áreas ativas da mina; (b) melhoria da distribuição de ar fresco para as áreas ativas da mina; (c) redução do tempo dos trabalhadores em áreas com altas concentrações de radônio; (d) remoção do radônio e seus descendentes; e (e) utilização de equipamentos de mineração robotizados, como em minas de urânio de alto teor.

Medidas de proteção radiológica em minas com concentrações altas de radônio levam normalmente à otimização do sistema de ventilação. Quando ar é disponibilizado nas frentes de trabalho com velocidade baixa, seu tempo de residência nos aerodutos ou nas galerias aumenta, permitindo o aumento da concentração de radônio e seus descendentes. Por outro lado, uma ventilação excessiva pode causar desconforto para o trabalhador, além de aumento da quantidade de poeira, com todas as suas desvantagens para o ambiente, e aumento do percentual de aderência dos radionuclídeos aos particulados. Sistemas de ventilação que empregam motores a diesel podem gerar problemas adicionais decorrentes das partículas contidas nos gases de escapamento (IAEA, 2003; Lubin, 1994).

Os seguintes fatores são essenciais para obter velocidades adequadas e diminuir o tempo de residência do ar e, conseqüentemente, otimizar o sistema de ventilação: (a) sistema de poços (*shafts*) adequado; (b) dimensionamento adequado dos aerodutos de entrada e de saída do ar; (c) sistemas de ventiladores/exaustores com potência suficiente; (d) divisão e distribuição correta da ventilação disponível; (e) controle efetivo do ar, da sua utilização e da redução das perdas por vazamento (*leakage*) e; (f) controle das diferenças de pressão atmosférica na mina.

## 2.11 Técnicas de Medição de Concentrações de Radônio

Existem muitas técnicas para medições de radônio e algumas para torônio. Amostras instantâneas de ar podem ser coletadas e analisadas em células cintiladoras. Entretanto, concentrações médias usualmente são de maior interesse. Técnicas ativas baseiam-se na coleta de uma amostra de ar filtrado e subsequente contagem da radiação alfa do radônio e seus descendentes. Detectores ativos podem ser conectados a contadores e registradores de maneira a criar monitores contínuos, que são úteis quando é necessário monitorar a dependência ao fator tempo dos produtos de decaimento do radônio. Os descendentes do radônio podem ser medidos pela análise das partículas coletadas em filtros de ar ou com monitores contínuos de produtos de decaimento (Pereira, 1983).

Para estimativas rápidas, pequenos recipientes metálicos (*canisters*) contendo carvão ativado expostos ao ar por alguns dias coletam uma fração do radônio que entra no recipiente, conforme ilustrado na Figura 7. A atividade coletada no carvão ativado é avaliada por espectroscopia gama ou por cintilação líquida. Equipamentos tipo eletrodo também podem ser utilizados para medições rápidas. Este equipamento é constituído de pequena câmara de ionização na qual a voltagem coletora é fornecida por um eletrodo, que se descarrega à medida que íons criados pela radiação são coletados. A diferença de potencial antes e depois da exposição ao radônio é relacionada ao produto da concentração média do gás e ao tempo de coleta por um fator de calibração empírico. É necessária também a aplicação de um coeficiente de correção devido à radiação gama de fundo (BG).



Figura 7 - Detector para estimativas rápidas, pequenos recipientes metálicos (*canisters*) contendo carvão ativado.

Medidas de longa duração de concentrações médias de radônio podem ser realizadas utilizando-se os detectores tipo traços (*track etch*), que consistem, essencialmente, numa pequena câmara circular, contendo um ou mais pedaços de plástico, conforme ilustrado na Figura 8. O gás penetra naturalmente na câmara e o decaimento do radônio e de seus descendentes resulta em traços sub-microscópicos (*tracks*) das partículas alfa no plástico. Esses rastros são acentuados, realçando-os (*etching*) por meio de uma solução de hidróxido de sódio para que possam ser contados em microscópio. Esta contagem, que deve ser feita em laboratório, pode ser automatizada, ligando-se o microscópio a um conjunto de *scanner* e microcomputador. A obtenção destes dados, dependendo das concentrações a serem determinadas, exige tempos de exposição que variam de algumas semanas a três meses ou até um ano (Pereira, 1983).





Figura 8 - Detectores tipo traços (*track etch*), que consistem, essencialmente, numa pequena câmara circular, contendo um pedaço de plástico.

A janela da câmara pode ser revestida com filtro para evitar a entrada de descendentes do radônio. Também para esse método é necessário estabelecer um fator de calibração empírico. Entretanto, sabe-se que esta técnica apresenta problemas devido à umidade do ambiente em que é feita a medição. Evidentemente, qualquer dos métodos citados deve obedecer a rígidos controles de qualidade, testes e calibrações com padrões internacionais.

### 2.11.1 A Monitoração do Radônio

As técnicas mais largamente utilizadas para a medição da contaminação ambiental por radônio e filhos, a do carvão ativado (Cohen, 1983) e as que utilizam plásticos que são detectores de traços de partículas carregadas (partículas alfa, principalmente) (Tommasino, 1986; Abu-Jarad, 1988), têm uma limitação em comum: funcionam com base na detecção do radônio ambiental.

O radônio ambiental por ser um gás nobre, não fica retido nas vias respiratórias durante o processo de respiração e, conseqüentemente, não causa danos de radiação. A periculosidade potencial desta contaminação reside nos filhos do radônio (Po-218, Pb-214, Bi-214 e Po-214), que devido às suas propriedades químicas, ficam retidos nas vias respiratórias. Embora esteja em curso um esforço

para melhorar a metodologia relacionada com detectores de traços (Dorschel, 1993; Hashemi-Nezhad, 1993; Islam, 1996), a transformação da atividade, no ar, do radônio em atividade dos seus filhos requer a realização de calibrações que estão sujeitas a erros grosseiros (Paulo, 1991; Barroso, 1993).

Isto mostra que a detecção da atividade dos filhos do Rn-222 presentes em ambientes de convívio humano apresenta dificuldades de ordem metodológica, que a tornam bastante problemática. Tais dificuldades se devem principalmente ao conhecimento limitado que os pesquisadores da área ainda têm, com relação ao comportamento desses radionuclídeos no ar. Isso se constitui num dos principais motivos de não se haver obtido, até hoje, dados experimentais confiáveis (com erro suficientemente pequeno) com relação ao risco de aparecimento de câncer no aparelho respiratório devido à inalação dos filhos do Rn-222.

A taxa de deposição dos átomos filhos do Rn-222 sobre uma superfície qualquer depende, essencialmente, da mobilidade que esses radionuclídeos têm no ar. A mobilidade, por sua vez, depende criticamente do coeficiente de difusão desses átomos, da ventilação (principalmente) e da presença de campos eletrostáticos. A influência desses dois últimos deve ser significativa, mesmo no caso de convecções de baixa intensidade (1 mm por segundo) (Paulo, 1991) e campos eletrostáticos extremamente fracos.

Os problemas referentes à detecção dos filhos do Rn-222 são ainda mais agravados devido a dois outros fatores. Primeiro, da mesma forma que os átomos dos filhos do Rn-222 se depositam, a mobilidade dos filhos do Rn-222 ligados a aerossóis passa a ser igual à mobilidade dos aerossóis. Como os aerossóis estão distribuídos segundo uma larga faixa de tamanhos (normalmente aerossóis com tamanhos variando entre 0.01 e 1  $\mu\text{m}$  estão presentes no ar), tem-se que os filhos do Rn-222 ligados a aerossóis, que representam de 90 a 95% do total, possuem um largo espectro de mobilidades. Ou seja, nem todos os filhos do Rn-222 apresentam a mesma mobilidade no ar.

Segundo, os filhos do Rn-222 se depositam também sobre os próprios detectores, no caso de detectores de traços nucleares. Como efeito, tem-se alterações na distribuição espacial dos filhos do Rn-222 (falta de homogeneidade),

então, os próprios detectores interferem naquilo que lhes foi designado a medir. Dependendo das condições ambientais e do tipo de detector utilizado, tais influências podem assumir valores que variam de 1% a algumas ordens de grandeza (Paulo, 1991).

## 2.12 Os Detectores Plásticos de Traços Nucleares

A utilização de plásticos como detectores de partículas radioativas foi consequência de diversos estudos com material sólido, visando a detecção de radiações ionizantes.

Poucos anos após as primeiras observações de traços de fragmento de fissão em cristais de fluoreto de lítio, LiF, e mica, obtidas no final da década de 50, descobriu-se que danos provocados por partículas ionizantes podem ser transformadas em traços visíveis, não somente em sólidos inorgânicos (cristais de minerais e vidros), como também em sólidos orgânicos (polímeros). Além disso, verificaram-se no início da década de 60, que, enquanto vidros e minerais detectam apenas fragmentos de fissão, outros materiais, como certos plásticos (nitrate de celulose e policarbonatos), possuem a capacidade de registrar partículas mais leves, como prótons e partículas alfa (Enge, 1980).

As primeiras aplicações de detectores plásticos para a medida de atividade alfa devido aos átomos de radônio foram realizadas no laboratório de pesquisa da *General Electric* através dos estudos realizados por Fleishcher, Price e Walker (1974), que se tornaram os pioneiros no desenvolvimento de pesquisas com estes detectores.

Atualmente, a detecção de partículas carregadas através de detectores plásticos constitui-se na técnica mais utilizada para a medida da atividade alfa em ambientes de convívio humano (Frank, 1977).

As características dos detectores plásticos comercialmente disponíveis e largamente utilizados são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Característica dos detectores plásticos.

Fonte: Frank (1977)

MATERIAL	COMPOSIÇÃO	NOME COMERCIAL	DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> )	ÍNDICE DE REFRAÇÃO
Nitrato de Celulose	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>9</sub> N <sub>2</sub>	CN-85 <sup>1</sup>	1,52	
		CA-8015 <sup>1</sup>		1,51
		LR-115		
		Daicel <sup>2</sup>	1,52	
	Gost <sup>3</sup>	1,42 – 1,45	1,50	
	72% C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>9</sub> N <sub>2</sub> 26% C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O		1,40	1,50
Policarbonato	C <sub>16</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	Makrofol <sup>4</sup>	1,29	
		Lexan 8010 MC 010 <sup>5</sup>		
Carbonato Diglicol Alílico	C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	CR-39 <sup>6</sup>	1,32	1,45
		MA-ND <sup>7</sup>		
		TASTRAK <sup>8</sup>		

1) Kodak Pathé, França; 2) Nippon Co, Japão; 3) URSS; 4) Bayer, Alemanha; 5) General Electric Co, EUA; 6) Acrylics, EUA; Homalite, EUA; Baryotrack, Japão; Pershore, Reino Unido; 7) MOM, Hungria; 8) Track Analysis Sys Ltd, Reino Unido.

Os detectores plásticos possuem uma série de vantagens sobre os outros detectores: baixo custo, insensibilidade à luz e às radiações gama, registro definitivo dos traços revelados, boa eficiência de detecção e estabilidade da eficiência com o tempo, possibilidade de diferenciar traços revelados devido à prótons, partícula alfa e fragmentos de fissão e diferenciar também, traços revelados devido ao mesmo tipo de partícula, mas com energias diferentes (Rio Doce, 1997).

### 2.12.1 Formação dos Traços em Detectores Plásticos

Os detectores de traços nucleares, também conhecidos por SSNTD (*Solid State Nuclear Tracks Detectors*), têm a propriedade de registrar danos sub-microscópicos que são produzidos em sua estrutura quando partículas nucleares os atravessam. Esses danos são os resultados de interações das partículas carregadas com a estrutura molecular do plástico.

Este fenômeno não é muito bem caracterizado, entretanto, acredita-se que o dano seja causado por uma explosão iônica, onde uma partícula carregada positivamente desloca os elétrons dos átomos constituintes do plástico, deixando um rastro de íons positivos. Estes íons se repelem, perturbando o seu arranjo molecular regular, dando origem ao que é denominado traço latente.

A radiação ionizante altera profundamente a estrutura molecular dos materiais poliméricos. Quando são irradiados tanto pode ocorrer a cisão da cadeia polimérica principal, levando a uma diminuição da massa molecular, como a reticulação (*crosslinking*), causando o aumento de massa molecular (Enge, 1980).

Nos polímeros, as cadeias poliméricas são destruídas não só pelo processo primário de ionização, mas também pelos elétrons secundários (elétrons que recuam a partir da colisão com a partícula incidente).

A grande sensibilidade dos detectores plásticos quanto ao registro de traços se deve ao mecanismo secundário de desestruturação das cadeias poliméricas, pois a energia necessária para provocar o rompimento das ligações químicas é menor do que aquela necessária à ionização de átomos. Uma quebra de cadeia polimérica pode ser criada por um elétron secundário.

O rompimento das moléculas de cadeias longas produz moléculas menores com radicais livres. A região central do traço é rodeada por uma região periférica, com propriedades químicas modificadas, denominada halo, onde ocorrem quebras da cadeia por mecanismos secundários.

Processo semelhante se dá na passagem da radiação ionizante através de sólidos cristalinos como vidros e cristais. Por outro lado, sabe-se que nenhum metal ou um bom condutor registra tais traços. Isto porque nesses materiais os elétrons movem-se com grande rapidez neutralizando os átomos, assim não permite a formação do traço. (Enge, 1980).

### 2.12.2 Visualização dos Traços Latentes

Os traços latentes formados no detector plástico têm cerca de 10 nanômetros de diâmetro. Esses traços, que são inicialmente visíveis somente ao microscópio eletrônico, podem se tornar visível ao microscópio ótico, ou até mesmo por leitoras de microfichas, com aumento de apenas 20 vezes. Isto por que sendo esta região quimicamente mais reativa que a parte não danificada, é possível, através de um processo de ataque químico, alargar milhões de vezes o diâmetro dos traços latentes.

A transformação do traço latente em um traço visível é realizada através do ataque químico, do ataque eletroquímico, ou da combinação de ambos. Como efeito dessas técnicas, os traços passam a ter diâmetros em torno de 3  $\mu\text{m}$ , quando aplicado o ataque químico, e em torno de 150  $\mu\text{m}$ , quando aplicado o ataque eletroquímico.

Para obter a visualização dos traços latentes são necessárias as execuções das seguintes etapas: (a) Irradiação do detector (formação do traço); (b) ampliação (revelação) do traço latente e; (c) observação do traço ampliado (contagem do traço).

### 2.12.3 Ataque Químico

Quando um detector plástico é submetido ao ataque químico sua superfície é dissolvida por uma solução básica. As bases mais utilizadas são o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH). A velocidade com que a solução dissolve o plástico ao longo do traço é maior que a velocidade na região não danificada (Tommasino, 1980).

A visualização do traço formado após o ataque químico só é possível através de um microscópio ótico, e seu formato é uma função direta do ângulo de incidência da partícula no detector e do ângulo de observação. Quando observado sobre a superfície do detector, o traço assemelha-se a uma elipse ou círculo, e se

for observado transversalmente à superfície do detector, o traço formado assemelha-se a um cone.

Como cada tipo de detector plástico (policarbonatos, nitratos e acetatos de celulose, etc.) possui características físicas e químicas diferentes, tais como sensibilidade para o registro de partículas alfa e formato do traço, é fundamental que seja realizado um estudo para determinar a forma e o tipo de ataque químico mais adequado.

Os parâmetros envolvidos em um ataque químico são: tipo de solução de ataque a ser utilizada (NaOH ou KOH), concentração da solução, temperatura e tempo de ataque. Esses parâmetros necessitam serem otimizados para cada tipo de detector.

Diversos trabalhos têm sido publicados apresentando a resposta de detectores plásticos para vários parâmetros envolvidos. Um trabalho foi feito por Ilié (1989) recomendando condições de ataque químico para vários tipos de detectores plásticos, e são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Condições recomendadas para ataque químico dos detectores plásticos.

Fonte: Ilié (1989).

DETECTOR	SOLUÇÃO	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (h)	VELOCIDADE DE ATAQUE (µm/h)
LR-115	2,5 M NaOH	60	1,5	4
Cn-85	2,5 M NaOH	60	0,5	12
CR-39	6,25 M NaOH	70	6,5	1,4
Makrofol E ou Lexan	6,0 M KOH	70	7,5	1,2
	8,0 M KOH (80%) e C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OH (20%)	70	7,5	1,2

#### 2.12.4 Eficiência dos Detectores Plásticos

Um detector plástico exposto a partículas com energias diferentes e/ou com ângulos de incidência diferentes, ao ser atacado quimicamente, uma única vez,

não revelará todos os traços. Isso significa que a eficiência dos detectores plásticos não é igual a 100% (Zamani, 1981).

A eficiência de um detector plástico pode ser definida como a razão entre o número de traços revelados e o número de partículas incidentes. Para qualquer que seja o tipo de detector plástico, a eficiência de detecção é função de dois parâmetros: limite de energia crítica de detecção e ângulo crítico de detecção.

a) Limite de Energia Crítica de Detecção.

O desarranjo na estrutura molecular dos plásticos causado pela passagem de uma partícula carregada é uma função da energia **E** da partícula. Dependendo do valor da energia da partícula incidente, o desarranjo na estrutura molecular do plástico pode não ser tão intenso que o ataque químico não consiga revelá-lo. Isso significa que os detectores plásticos são ineficientes para registrar partículas cujas energias se situam em certa faixa específica.

Na Tabela 15 são mostrados os limites de energias de partículas alfa detectáveis para alguns detectores plásticos, limites estes que devem ser interpretados como um guia, pois dependem das condições de ataque químico (Rio Doce, 1997).

Tabela 15 - Limites de energias, de partículas alfa detectáveis, para alguns detectores plásticos.

Fonte: Rio Doce (1997)

<b>Tipo de Detector Plástico</b>	<b>E<sub>mínima</sub> (MeV)</b>	<b>E<sub>máxima</sub> (MeV)</b>
Nitrato de Celulose	0,1	4 – 6
Polycarbonato (Lexan)	0,2	3
Carbonato de Diglicol Alílico	0,1	> 20

A taxa de perda de energia  $de/dx$  (quantidade de energia que a partícula transfere ao detector plástico, por unidade de comprimento), é inversamente proporcional à energia da partícula. Isso significa que os danos na estrutura dos plásticos, de modo geral, são mais intensos quanto menor for a energia das



partículas. Assim, uma partícula de alta energia transfere pouca energia ao plástico, por unidade de comprimento (Rio Doce, 1997).

#### b) Ângulo Crítico de Detecção.

A partícula ao atingir o detector plástico pode penetrar com qualquer direção. Sabendo que o ataque ocorre preferencialmente na região danificada (traço latente) é certo que a velocidade de ataque ao longo do traço,  $V_T$ , será maior que a velocidade geral,  $V_G$ , ao longo de qualquer outra direção no meio. A Figura 9 mostra a evolução do ataque químico, no detector plástico, com o decorrer do tempo.

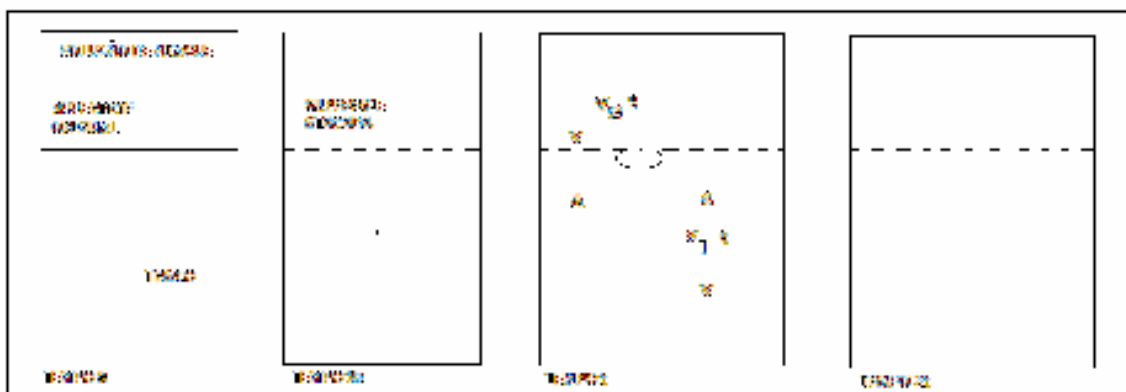


Figura 9 - Evolução do ataque químico, no detector plástico, com o decorrer do tempo

Fonte: Enge (1980).

Mesmo que a energia de uma partícula seja suficiente para causar danos reveláveis ao detector, a detecção pode não se dar, dependendo do ângulo de incidência da partícula. Isso se deve ao fato de que, se o ângulo de incidência  $\theta$  em relação à superfície do detector plástico for muito pequeno,  $V_T.t$  estará totalmente contida no interior da camada  $V_G.t$  removida durante o ataque químico. Desse modo mesmo que o dano na estrutura do plástico seja considerável, o traço também será removido pelo ataque químico (Enge, 1980; Frank, 1977).

Portanto, o ângulo mínimo que um traço deve formar com a superfície do detector plástico para poder ser revelado é:

$$V_G/V_T = \text{sen } \theta_C$$

Assim, partículas que incidirem no detector com ângulos menores que  $\theta_c$  (ângulo crítico) não serão registrados pelo plástico.

A eficiência de detecção é totalmente dependente do ângulo crítico de detecção e do limite de energia crítica de detecção, além de depender também, das características do plástico, e das condições de ataque químico utilizado.

### **3 ÁREA DE ESTUDO**

O trabalho tem como objetivo determinar a influencia das litologias sobre as concentrações de radônio no ar. Para tanto, foram selecionadas seis minas subterrâneas do Estado de Santa Catarina, na região de Criciúma, sendo três de fluorita e três de carvão e, que para tal serão apresentadas as características geológicas, das minas estudadas, e litológicas, dos materiais estudados. A Figura 10 apresenta a localização das minas estudadas.

#### **3.1 Geologia dos Depósitos de Carvão Sul-Catarinenses**

As três minas de carvão monitoradas neste trabalho localizam-se nos depósitos de carvão Sul-catarinenses. A mina MBI pertence ao município de Lauro Muller/SC e explora o carvão da camada Bonito. As minas MM e MI pertencem ao município de Treviso/SC e exploram o carvão das camadas Barro Branco e Irapuá, respectivamente.

Os depósitos de carvão Sul-catarinenses são mais intensamente explorados, devido às propriedades coqueificantes do carvão da Camada Barro Branco (fração para indústria de coque) e o consumo nas plantas termoelétricas de Tubarão, SC (DNPM, 1985).

Morfologicamente estas jazidas possuem a forma de um arco com convexidade apontando para leste, mostrada na Figura 10. Seus limites sul-sudeste estão indeterminados, sendo que sondagens sob lâmina d'água na plataforma continental certamente constatarão a continuidade das camadas em sub-superfície. A porção norte do arco é aquela que tem sido intensamente pesquisada e

explotada, sendo o que usualmente é conhecido como a Jazida Sul-Catarinense. Tem um comprimento que ultrapassa os 85 km e uma largura variável entre 5 e 20 km. Dez camadas de carvão ocorrem neste depósito, mas apenas duas têm importância econômica: Barro Branco e Bonito, conforme ilustrado na Figura 11. Muito localizadamente, a Camada Irapuá tem sido objeto de lavra. A Camada Barro Branco possui espessuras médias nas áreas mineradas, em torno de 1,60 m. A Camada Bonito, mais espessa, mas com *grade* inferior à Barro Branco, tem sido lavrada em sub-superfície na parte norte da jazida. As coberturas vão desde camadas aflorantes até mais de 800 m de profundidade. Os setores lavráveis a céu aberto estão quase esgotados para a Camada Barro Branco.



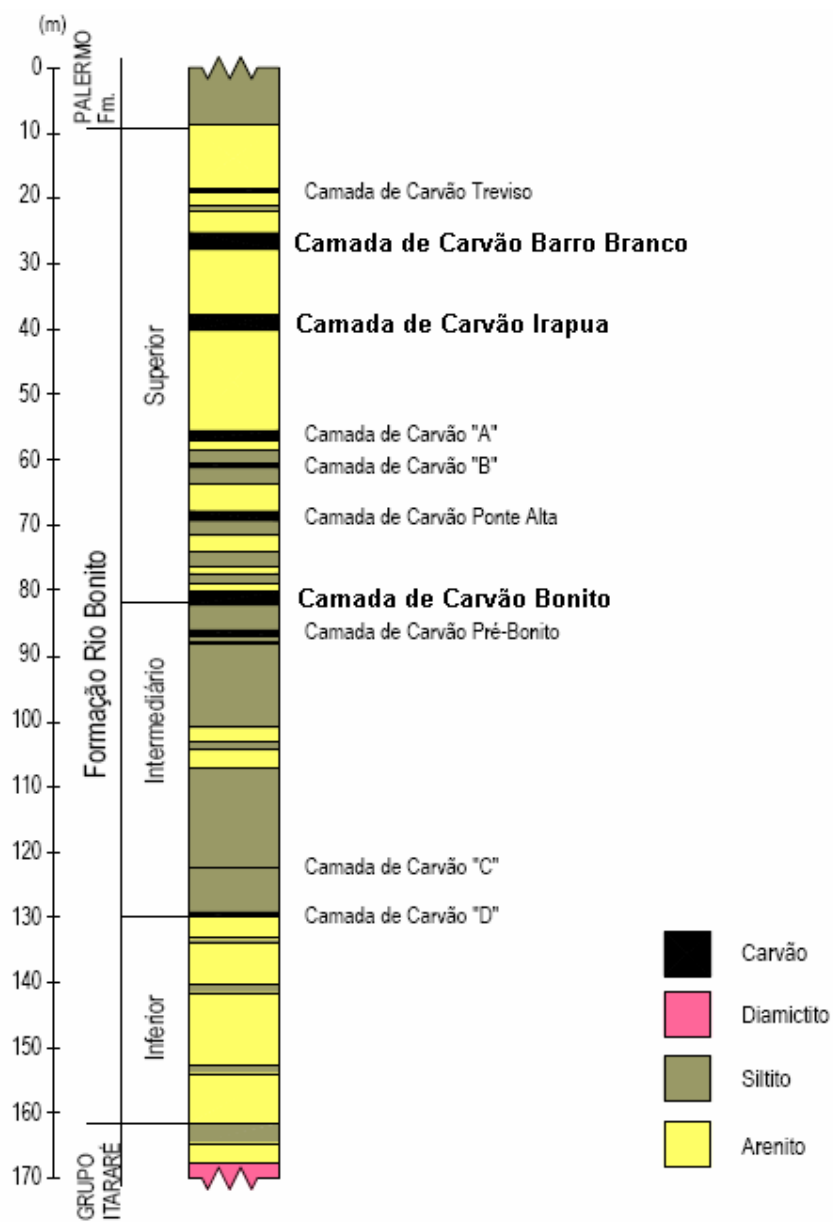


Figura 11 - Coluna estratigráfica do depósito de carvão Sul-Catarinense.

Fonte: IBGE, 1996

O carvão das camadas Barro Branco, Irapuá e Bonito são classificados pelo *rank* como Betuminoso Alto Volátil A. Na região da Jazida Sul-Catarinense existem muitas intrusões de diabásio, diques e soleiras, que afetam as camadas de carvão, estas podendo chegar ao grau de antracito.

A camada Barro Branco contém teores expressivos de macerais do grupo da exinita, podendo-se considerar que seu carvão é transicional ao fácies sapropélico. Isto, além de sua posição no *rank*, explica seus altos índices de capacidade de coqueificação. Os teores de enxofre não são altos (1 a 3%) nos produtos beneficiados, e maiores ao norte da jazida (DNPM, 1985).

A camada Irapuá situa-se, em média, a 9 metros estratigraficamente abaixo da camada Barro Branco, sendo constituída por níveis de carvão interestratificados com folhelhos e siltitos. Esta camada apresenta espessuras economicamente exploráveis (maior que 0,5 m), atingindo 1,90 m de espessura total.

A camada Bonito é aquela que apresenta as maiores percentagens de carvão contido na camada total. É representada, normalmente, por dois leitos de carvão de espessuras variáveis e separados por um nível estéril, composto por arenitos finos e subordinariamente, siltitos e folhelhos (IBGE, 1996).

### 3.1.1 Características das Minas de Carvão Estudadas

As minas de carvão selecionadas, para este trabalho, são das camadas Irapuá, mina MI, Bonito, mina MBI, e Barro Branco, mina MM. A capa (teto) e a lapa (piso), das minas de carvão, são formadas principalmente de arenitos e siltito. As escavações são feitas pelo método de câmaras e pilares, conforme ilustrado na Figura 12. As áreas já exploradas e desativadas são lacradas, com paredes de alvenaria, para melhorar a circulação de ar limpo na frente de lavra.

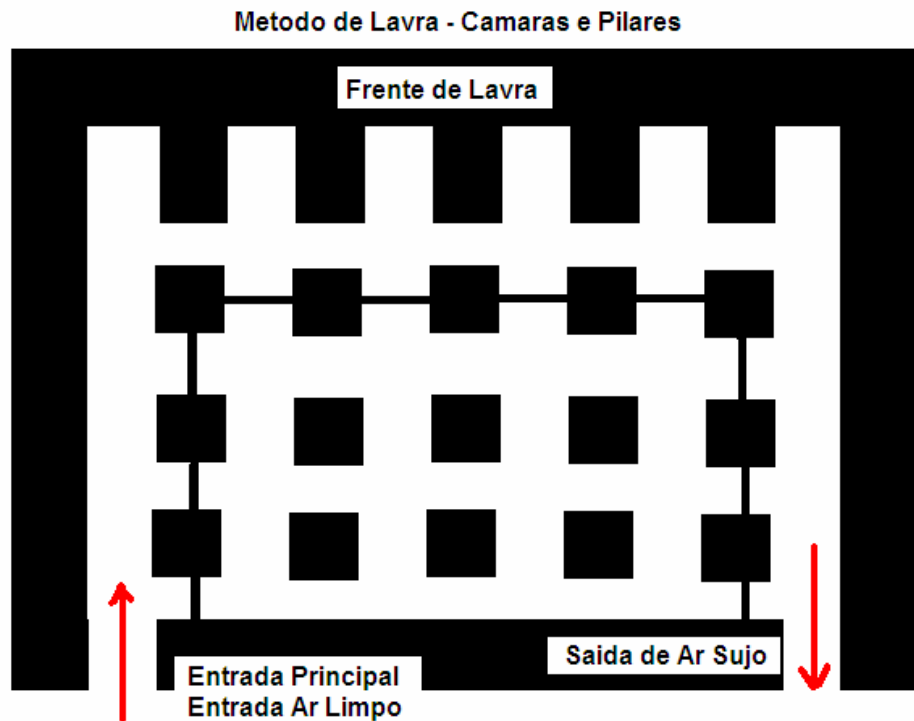


Figura 12 - Esquema do método de lavra por câmaras e pilares

As minas de carvão são geralmente bem ventiladas para reduzir o risco associado ao gás metano, implicando em baixas exposições ao radônio.

Na mina MI, a ventilação é feita por dois exaustores em paralelo, de 60 Hp e vazão de 1600 m<sup>3</sup>/min. É uma mina molhada, com pontos alagados e surgência do aquífero do arenito com escoamento visível. Possui 115 trabalhadores com jornada de trabalho de 36 h semanais. Na ocasião da instalação dos detectores, a mina MI apresentava uma área de escavação, área já escavada, de 500 m x 1000 m, considerada uma mina pequena.

Na mina MM, a ventilação é feita por dois exaustores em paralelo, de 60 Hp e vazão de 1600 m<sup>3</sup>/min. É uma mina molhada, com pontos alagados e surgência do aquífero do arenito com escoamento visível. Possui 140 trabalhadores com jornada de trabalho de 36 h semanais. Na ocasião da instalação dos detectores, a mina MM apresentava uma área de escavação de 1800 m x 1200 m,



considerada uma mina mediana. As minas MM e MI pertencem à mesma companhia carbonífera.

Na mina MBI, a ventilação é feita por um exaustor de 150 Hp e vazão de 1700 m<sup>3</sup>/min, auxiliados por três exaustores de 25 Hp, na frente de lavra, chamado de boca de saco. É uma mina molhada, com pontos alagados e surgência do aquífero do arenito com escoamento visível. Possui 10 trabalhadores com jornada de trabalho de 30 h semanais. Na ocasião da instalação dos detectores, a mina MBI apresentava uma área de escavação de 2800 m x 1800 m, considerada uma mina grande.

Na Figura 13, é mostrado uma típica mina de carvão, (A) com a entrada principal, a esteira para retirada do carvão e (B) a saída do ar sujo, os exaustores.



Figura 13 - (A) Ilustração de uma típica mina de carvão, com entrada principal, saída do carvão por esteiras e, (B) saída do ar viciado (sujo), por exaustão.

### 3.2 Geologia das Jazidas de Fluorita

As três minas de fluorita monitoradas neste trabalho localizam-se no distrito de fluorita de Santa Catarina. A mina MF pertence ao município de Morro da Fumaça/SC, a mina NF pertence ao município de Santa Rosa de Lima/SC e a mina RB pertence ao município de Rio Fortuna/SC.

O embasamento do distrito de fluorita de Santa Catarina é constituído predominantemente pelo granito Pedras Grandes (Sallet, 1988). As rochas da Bacia do Paraná presentes no distrito pertencem às formações Rio do Sul e Rio Bonito, ambas do Permiano Inferior, e Serra Geral representada por diques e soleiras de diabásio do Juro-Cretácio. Os filões de fluorita encaixam-se preferencialmente nos granitos, desaparecendo, por estreitamento, ao penetrarem as rochas sedimentares e soleiras de diabásio. As mineralizações distribuem-se numa faixa de 100 km de comprimento por 30 km de largura, conforme ilustrado na Figura 10.

A mineralização de fluorita é filoneana hidrotermal, sendo controlada por falhas e fraturas N-S e ENE-SSW. A paragênese é composta por fluorita, quartzo, barita, pirita e siderita, ocorrendo uma zonação vertical marcada pelo enriquecimento em sílica nas porções inferiores e em barita nas superiores dos filões (Savi, 1980).

Os estudos sobre as mineralizações de fluorita de Santa Catarina, salientam o caráter hidrotermal da formação dos depósitos, caracterizados pelas estruturas internas do filão e pela alteração das encaixantes e consideram que as condições de percolação dos fluidos mineralizantes foram geradas entre o neocretáceo e eoterciário, quando da fase final de rifteamento que presidiu o início da separação continental (América - África). Devido à formação dos depósitos por hidrotermalismo, pode existir o enriquecimento do radônio. A fonte do flúor seria resultado das emanações residuais tardias de manifestações básicas e alcalinas ocorridas durante o evento (DNPM, 1997).

Na porção sul do distrito de fluorita de Santa Catarina, a fluorita depositou-se ao longo de quatro fases de abertura e preenchimento das aberturas

filoneanas. Nas fases 1 e 3, predominam fluorita maciça e brechas tectônicas. Nas fases 2 e 4, predominam texturas bandadas, brechas de colapso *cocardes*. Já na parte norte do distrito de fluorita de Santa Catarina, a fluorita depositou-se segundo duas fases de abertura e preenchimento (Jelinek *et al*, 2006). O minério da fase 1 depositou-se durante reativação transtensiva dextral da zona de cisalhamento Rio dos Bugres, já o minério da fase 2 foi depositado durante fase distensiva, na qual a abertura da caixa filoneana foi relacionada a movimentação normal da estrutura. O minério da fase 1 tem textura maciça e bandamento espesso, enquanto o da fase 2 é bandado, comumente com brechas de colapso e *cocardes*. Pelas datações disponíveis, as fases de mineralização da parte norte são mais jovens que as do sul (Jelinek *et al*, 2006).

Onde a fluorita maciça e/ou bandada não preencheu totalmente a caixa filoneana, restaram espaços residuais lenticulares (*vugs*) que podem ser interligados. Este sistema pode chegar até as raízes do filão, assim com até muito próximo à superfície ou à cobertura sedimentar. Os *vugs* podem ser parcialmente ou totalmente preenchidos por uma paragênese tardia, composta por cristais cúbicos de fluorita, lamelas de barita, quartzo piramidado, pirita euédrica, ilita/esmectita e, por fim argila vermelha rica em óxido de ferro e manganês, de origem atribuída a processos intempéricos.

### 3.2.1 Características das Minas de Fluorita Estudadas

As minas de fluorita selecionadas, são da mesma empresa e utilizam o método de lavra *Shrinkage stopping*, conforme ilustrado na Figura 14. Na Figura 15, é apresentado o perfil de uma típica mina de fluorita. As rochas encaixantes da fluorita são principalmente granitos e alguns diques de diabásio. As fluoritas apresentam coloração verde, amarela e roxa.

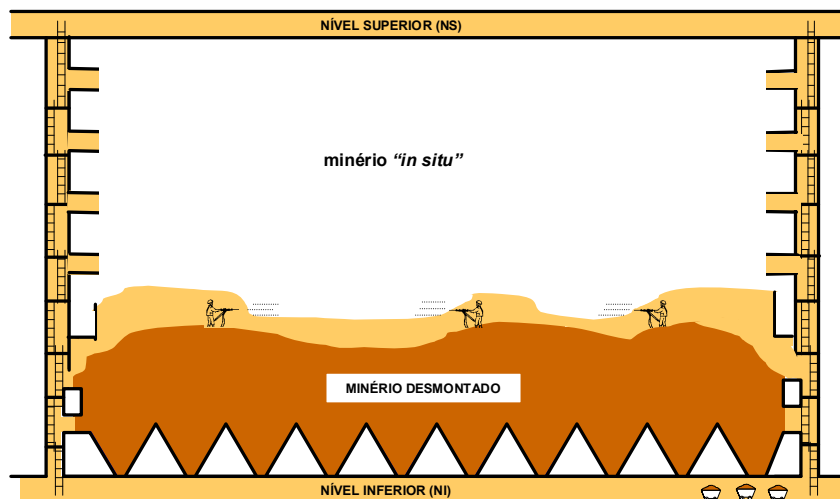


Figura 14 - Método de lavra *Shrinkage stopping*. Desmonte (realce) do bloco de lavra.

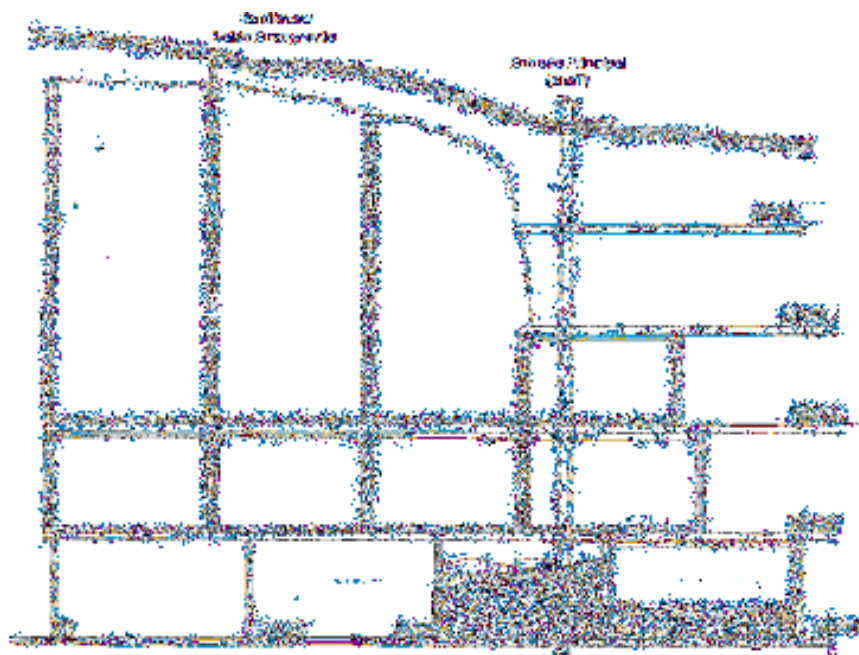


Figura 15 - Perfil longitudinal de uma mina de fluorita

As minas de fluorita são molhadas, apresentam pontos alagados e com escoamento visível (água de surgência). As áreas já exploradas e desativadas são lacradas, com paredes de alvenaria ou com tapumes de madeira, para melhorar a circulação de ar limpo na frente de lavra. Possuem 160 trabalhadores, 46 da mina

MF, 56 da mina RB e 58 da mina NF, com jornada de trabalho de 36 horas semanais.

Na Tabela 16, são apresentados os dados de ventilação, nível e potência dos ventiladores, das minas de fluorita, para as duas campanhas. Os ventiladores da superfície empurram ar limpo para dentro da mina, enquanto os ventiladores dos níveis levam o ar limpo para as áreas ativas da mina e para as frentes de lavra.

Foi sugerido pela DIMAP/CNEN que a empresa operadora, das minas de fluorita, fizesse modificações na ventilação, tendo em vista que os valores da concentração de radônio no ar eram elevados, na primeira campanha. Após as modificações feitas foi feito um novo monitoramento da concentração de radônio no ar, segunda campanha.

Tabela 16 - Dados de ventilação, nível e potencia dos ventiladores, das minas de fluorita, para as duas campanhas.

Mina	Campanha 1		Campanha 2	
	Nível	Potência do Ventilador (cv)	Nível	Potência do Ventilador (cv)
MF	Superfície	25 (lado Norte) 25 (lado Sul)	Superfície	25 (lado Norte) 25 (lado Sul)
	N 200	15	N 200	25 15
RB	Superfície	25	Superfície	25
	N 18	15	N 18	25
	N 102	25 15	N 102	12
	N 152	12	N 152	40 25 15
NF	Superfície	25 25	Superfície	25 25
	N 90	15	N 90	25
	N 140	20	N 140	20 12
	N 196	15	N 196	15 15

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Existem muitas técnicas para medições de Rn-222 e algumas para Rn-220. Neste trabalho foram realizadas medidas de longa duração de concentrações médias de radônio (Rn-222), que é o objeto de interesse para esse estudo, com os detectores tipo traços nucleares, que consistem, essencialmente, numa pequena câmara circular, contendo um pedaço de plástico. O gás penetra naturalmente na câmara e, o decaimento do radônio e de seus descendentes resulta em traços das partículas alfa no plástico. Esses traços são acentuados por meio de ataque químico com solução de hidróxido de potássio (KOH), para que possam ser contados em microscópio óptico. A obtenção destes dados, dependendo das concentrações a serem determinadas, exige tempos de exposição que variam de algumas semanas a três meses ou até um ano.

De modo a alcançar os objetivos deste plano de trabalho em prazos razoáveis, foi necessário o apoio da CNEN e de seus Institutos, em particular o Instituto de Estudos Nucleares (IEN/CNEN) e do Laboratório de Poços de Caldas (LAPOC/CNEN).

Os detectores de radônio empregados para realização deste trabalho de levantamento das concentrações de radônio no ar em minas subterrâneas foram do tipo SSNTD (Detectores de Traços Nucleares), denominados de CR 39 (*Columbia Resin 1939*) e LEXAN, montados e fornecidos pela LAPOC/CNEN e pelo IEN/CNEN, respectivamente. Também foi utilizado um detector de radiação, Victoreen Thyac III, probe GM, modelo 489-4, do Escritório da CNEN de Porto Alegre, para determinar os valores de maior radiação gama, no interior de minas, e o valor da radiação gama de fundo (*Background*), fora das minas.

Foi utilizado um detector ativo ou instantâneo, o dosímetro eletrônico de radônio, *Doseman-Pro*, que determina a concentração de radônio e seus filhos no ar ambiente, pertencente ao DIMAP/CNEN. Esse detector foi utilizado para verificar a contribuição das explosões no aumento da concentração de radônio no ar no ambiente mineiro.

Inicialmente, as minas subterrâneas foram relacionadas e classificadas geograficamente. Em seguida, foram estabelecidas prioridades em função das características geológicas e dos bens minerais em lavra. Posteriormente, juntamente com técnicos da operadora, foram instalados detectores de traços em locais diversificados e previamente selecionados da mina, incluindo os detectores necessários para o controle da qualidade das medições. Em função das dimensões e características das minas, foram instalados entre 10 e 20 detectores em cada mina, do tipo CR-39, que foram enviados parte para a LAPOC/CNEN e parte para o IG/UFRGS, e em torno de 10 detectores, da marca LEXAN, que foram enviados para o IEN/CNEN, para revelação e interpretação dos traços.

Os locais previamente selecionados foram: galerias principais ou *shafts*, proximidades de frentes de lavra, pontos com maior radioatividade gama, pontos de retorno das correntes de ar da ventilação, *Background* da superfície, para comparação, locais abandonados da mina, selados ou não, e Sala do café. Os detectores foram instalados a partir da frente de lavra em direção a saída da mina. Logo os detectores instalados primeiro são os mais próximos da frente de lavra e os mais distantes da entrada das minas.

Em pelo menos dois pontos, foram instalados dois detectores lado a lado. Um deles foi retirado num prazo de aproximadamente 20 dias, para uma avaliação do tempo mais adequado para a retirada dos demais, denominado de detector temporizador. Esse detector temporizador, do tipo traço da marca LEXAN, foi revelado e interpretado pelo IEN/CNEN.

Decorrido o prazo estabelecido como tempo de medição, estimado entre semanas e meses, juntamente com técnicos da operadora, foram retirados os detectores das minas e enviados para os laboratórios que fizeram a revelação e interpretação dos detectores. Os detectores da marca LEXAN foram revelados e

interpretados pelo IEN/CNEN. Os detectores CR-39 foram revelados e interpretados pelo LAPOC/CNEN e pelo IG/UFRGS.

Para realização deste trabalho, foram selecionadas seis minas subterrâneas do Estado de Santa Catarina, na região de Criciúma, sendo três de fluorita e três de carvão. Nestas minas foram instalados os detectores de traços nucleares e coletado amostras de rochas das frentes de lavra. Das minas de carvão foram coletadas amostras do teto (capa), do carvão (produto) e do piso (lapa). Das minas de fluorita foram coletadas amostras de granitos (normal e alterado) e de fluoritas (verde e roxa). Esses materiais foram enviados para o LAPOC/CNEN e para o Laboratório de Radioanálise/UFRGS. Também foram coletadas amostras de água, das minas de fluorita, e enviadas para o LAPOC/CNEN. Nesses laboratórios, foram determinadas as concentrações de Radio, Urânio e Tório.

#### **4.1 População e Amostra**

Foram selecionadas seis minas subterrâneas do Estado de Santa Catarina, na região de Criciúma, sendo três de fluorita e três de carvão (uma da camada Itapuá, uma da camada Bonito e outra da camada Barro Branco). Nestas minas, foram instalados os detectores de traços nucleares e coletado amostras de rochas das frentes de lavra. Das minas de carvão, foram coletadas amostras do teto (capa), do carvão (produto) e do piso (lapa). Das minas de fluorita, foram coletadas amostras de granitos (normal e alterado) e de fluoritas (verde e roxa), bem como amostras de água.



## 4.2 Procedimento Experimental

### 4.2.1 Para as Análises de Concentração de Radônio

#### A) Montagem e Instalação dos Detectores tipo Traços Nucleares CR-39

Para que uma amostragem de radônio via detectores plásticos, resulte em dados significativos para o ambiente de interesse, devem-se tomar cuidados com relação aos procedimentos de instalação e disposição dos detectores. Assim, deve-se:

- Estabelecer pontos significativos de amostragem, ou seja, em consonância com o objetivo do experimento. Este ponto é altamente relevante, pois, a técnica exige longo período de exposição e demanda muito tempo até ter-se em mãos resultado da concentração de radônio e, portanto, perder um ponto de amostragem pode significar meses de atraso na efetivação do experimento.

- Levar em consideração que o local de amostragem será utilizado por alguns meses e portanto não deve interferir nas atividades dos trabalhadores, na prospecção e perspectiva de lavra da mina a curto prazo.

- Utilizar detectores temporizadores para avaliar o tempo de exposição dos demais. Este procedimento evita saturação do detector de traço e conseqüente perda do experimento ou amostragem.

- Nunca dispor o dosímetro diretamente sobre rocha ou solo, nem próximo à rede elétrica ou fontes de calor, como lâmpadas ou telhados.

- Ter muita atenção na disposição dos dosímetros, quanto a seus números e respectivos pontos de amostragem, bem como nos momentos de início e fim da mesma.

- Documentar o ponto de amostragem com fotos. Utilizar placa com o código do dosímetro em letras de tal tamanho que seu conteúdo seja registrado pelas fotos.

- Não embalar os dosímetros com restos de poeira, solo ou rocha ao final da amostragem.

- Utilizar sacos plásticos para embalar individualmente e o conjunto de dosímetros no final da amostragem.

- Não abrir os dosímetros após a amostragem, este procedimento deve ser realizado momentos antes da revelação.

Com relação aos cuidados relativos à montagem e manuseio dos dosímetros, os procedimentos abaixo são recomendáveis para se evitar perda de amostragens:

- O detector de traço jamais deve ser manipulado de forma a haver contato entre as mãos e sua área sensível, quando necessário segure-o pelas bordas.

- Lavar bem as mãos antes de tocar no detector e utilizar luvas cirúrgicas durante a montagem e desmontagem do dosímetro.

- Para limpeza do detector, antes de sua instalação no dosímetro ou após da retirada, utilizar lenço de papel embebido em álcool, tomando cuidado de efetuarla em movimentos do centro para as bordas do detector.

- Colar o detector com a face numerada virada para o fundo do dosímetro na montagem dos dosímetros.

Na Figura 16, é mostrado os detectores instalados, em pontos diferentes. Na foto da esquerda temos dois detectores CR 39 e um Lexan, e na foto da direita um detector CR 39 e dois LEXAN, onde um deles é o detector temporizador.



Figura 16 - Detectores instalados, em pontos diferentes. Na esquerda temos dois detectores CR 39 e um Lexan, e na direita um detector CR 39 e dois LEXAN, um é o detector temporizador.

### B) Preparo da solução reveladora e ataque químico dos detectores CR-39

Os parâmetros envolvidos em um ataque químico são: tipo de solução de ataque a ser utilizada (KOH), concentração da solução, temperatura e tempo de ataque. Os procedimentos de preparo da solução reveladora e as condições do ataque químico dos detectores CR-39 estão baseados nos trabalhos de Mishra (2005) e Tomasino (1980).

A solução de hidróxido de potássio (KOH), comercializado pela Merck S. A. possui 85% de pureza, foi preparada com concentração de 30%, conforme calculado a seguir:

Para 100% de pureza:

30% → 100 ml – 30 g  
 500 ml – x g  
 x = 150 g KOH (puro)

Para 85% de pureza:

100 g – 85 g KOH puro  
 x g – 150 g KOH puro  
 x = 176,47 g

A quantidade x (p.e., 176,47 g) de KOH é diluída em água destilada até atingir o volume de, por exemplo, de 500 ml. Esse volume é medido em um balão

volumétrico de 500 ml a 25<sup>0</sup> C. A quantidade de KOH é medida em uma balança digital, com precisão de centigramas.

O banho-térmico utilizado foi da marca Quimis, modelo Q-215-1. A temperatura e o tempo de ataque, utilizados para a revelação dos traços nucleares, foram, respectivamente, 80<sup>0</sup> C e 5,5 horas (Mishra, 2005).

### **C) Características do microscópio óptico, condições de contagem e transformação da contagem de traços.**

O microscópio óptico utilizado para determinação da densidade de traços nucleares, foi da marca Olympus, modelo BX 40, com ocular de 12,5 x, objetiva de 10 x (aumento de 125 x) e grade com área, A, de 0,01 cm<sup>2</sup>.

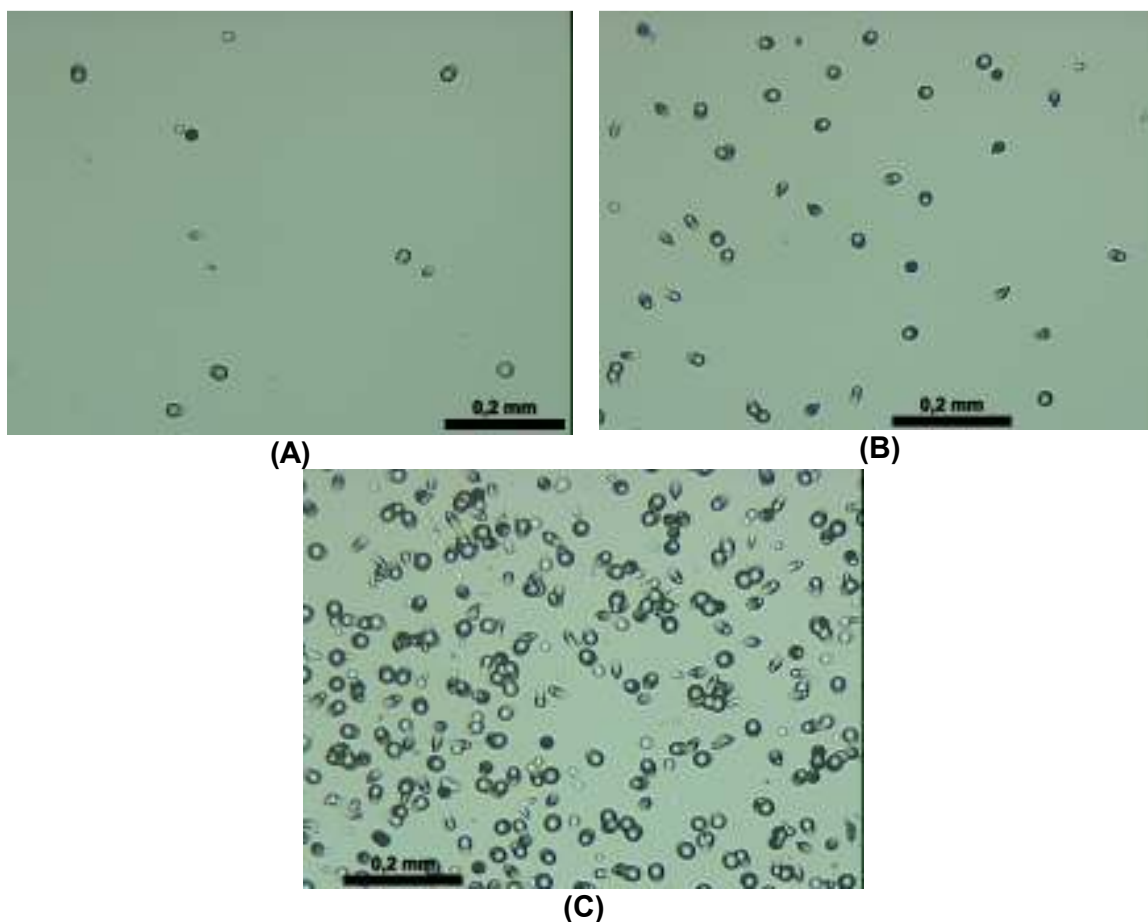


Figura 17 - Alguns campos dos detectores CR 39. Em (A) um campo de contagem de uma mina de carvão, em (B) um campo de contagem de uma mina de fluorita e, em (C) um campo de contagem de uma mina de fluorita de um detector saturado.

Após o ataque químico os traços revelados no detector CR 39 são contados e na Figura 17 é mostrado alguns campos dos detectores. Em 17.A é mostrado um campo de contagem típico de uma mina de carvão, em 17.B um campo de contagem de uma mina de fluorita e, em 17.C um campo de contagem de uma mina de fluorita de um detector saturado. No detector saturado não é possível separar os traços para que se possa fazer a contagem.

Os critérios de contagem foram: i) contar toda a grade e apenas os traços que estão dentro de grade; ii) iniciar a contagem da esquerda para a direita e de cima para baixo; iii) contar mais de 1200 traços nucleares; e iv) não contar traços abertos (não fechados), claros e/ou defeituosos.

Após a contagem dos traços nucleares, a densidade de traços foi calculada da seguinte maneira:

$$\bar{X} = \frac{\sum N}{\sum n}$$

onde,  $N$  é número de traços,  $n$  é número de campos e  $\bar{X}$  é a média de traços por campo.

$$d = \frac{\bar{X}}{A}$$

onde,  $\bar{X}$  é a média de traços por campo,  $A$  é a área total contada ( $A=0,01 \text{ cm}^2 \cdot n$ ) e  $d$  é a densidade de traços por  $\text{cm}^2$ .

A incerteza da densidade de traços,  $I_d$ , foi calculada da seguinte maneira:

$$I_d = \left( \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \cdot d$$

onde,  $N$  é o número de traços e  $d$  é a densidade de traços.

Conforme Mishra (2005) o valor médio da sensibilidade de resposta,  $S$ , do detector CR-39, obtido em diversos laboratórios, é:

$$S = (2,8 \pm 0,2) \frac{\text{traco.m}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{kBq.h}}$$

Assim, a concentração de radônio no ar é obtida por:

$$C_{Rn} = \frac{d}{S.t}$$

onde,  $d$  é a densidade de traços,  $S$  é a sensibilidade do detector CR-39,  $t$  é o tempo de amostragem, em horas, e  $C_{Rn}$  é a concentração de radônio no ar, em  $\text{Bq/m}^3$ .

Para transformar a unidade da concentração de radônio no ar,  $C_{Rn}$ , de  $\text{Bq/m}^3$  para  $\text{Bq/kg}$ , basta dividir a  $C_{Rn}$  pela densidade do ar ( $1,23 \text{ kg/m}^3$ ).

A incerteza da concentração de radônio no ar,  $I_{Rn}$ , foi calculada da seguinte maneira:

$$I_{Rn} = \frac{d}{2,8} \cdot \left( \sqrt{\left(\frac{I_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{0,2}{2,8}\right)^2} \right)$$

onde,  $d$  é a densidade de traços e  $I_d$  é a incerteza da densidade de traços.

De posse dos valores da concentração de radônio no ar, foram calculados os valores de dose efetiva,  $E$  em  $\text{mSv/a}$ , e risco radiológico,  $R$ , a que os trabalhadores estão expostos, da seguinte maneira, conforme ICRP 65:

$$E = C_{Rn} \cdot t \cdot f \cdot \left( \frac{9 \text{ nSv}}{\text{Bq.h.m}^3} \right) \cdot 10^{-6}$$

onde,  $C_{Rn}$  é a concentração de radônio no ar, em  $\text{Bq/m}^3$ ,  $t$  é o tempo de permanência no local, em  $\text{h/a}$ , ( $t = 2000 \text{ h/a}$ ),  $f$  é o fator de equilíbrio ( $f = 0,4$ ),  $E$  é a dose efetiva, em  $\text{mSv/a}$ , e os demais termos são fatores de correção.

A dose efetiva,  $E$ , em  $\text{mSv/a}$ , multiplicada por 50 anos e por  $0,05/\text{Sv}$ , resulta no risco radiológico,  $R$ , a que os trabalhadores da mineração estão sujeitos,

e será:

$$R = E.50a.\frac{0,05}{Sv}$$

#### D) Detector instantâneo da concentração de radônio no ar - *Doseman-Pro*

O dosímetro eletrônico de radônio, detector ativo ou instantâneo, *Doseman-Pro* determina a concentração de radônio e seus filhos no ar ambiente. O detector foi colocado, inicialmente, na sala de café, e posteriormente, próximo à frente de lavra ( $\pm 30$  m), para verificar a contribuição das explosões na concentração de radônio no ar do ambiente mineiro. Essas medidas foram realizadas somente em uma mina de fluorita, a mina RB, e na segunda campanha. A Figura 18 mostra o detector de radônio *Doseman-Pro* da marca Sarad GmbH.



Figura 18 - Detector de radônio modelo *Doseman-Pro* da marca Sarad GmbH.

O detector *Doseman-Pro* fornece, entre outros resultados, o valor da Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC), em um intervalo de tempo pré-definido, e permite armazenar esses valores e posteriormente gerar um gráfico da EEC, em  $Bq/m^3$ , em função do tempo.

#### 4.2.2 Para as Análises Qualitativas e Quantitativas de Radioatividade

As amostras de rochas foram coletadas da frente de lavra, das minas estudadas. Das minas de carvão foram coletadas amostras do teto (capa), do carvão (produto) e do piso (lapa). Das minas de fluorita foram coletadas amostras do granito, normal e alterado, e fluorita verde e roxa.

Para as análises quantitativas e qualitativas de radioatividade as rochas foram pulverizadas e com massa de 100 g, conforme orientações do Laboratório de Radioanálise/UFRGS.

Essas análises foram feitas através de um sistema de espectrometria gama utilizando um cristal cilíndrico de NaI(Tl) com 4,5 cm x 4,5 cm acoplado a um analisador multicanal *EG&G ORTEC*. As análises dos dados foram feitas com auxílio dos *softwares Maestro v. 2.03* e *Specon v. 1.52*. O tempo de aquisição das contagens foi estabelecido para obter um erro de 1% nas medidas. Foi determinada a radiação de fundo no início e no fim de cada grupo. Através de calibração prévia do equipamento, os valores encontrados para a resolução energética dos fotopicos foram: 20% para a energia 140,5 keV do  $Tc^{99m}$ , 14,1% para a energia 365,5 keV do  $I^{131}$  e 10,7% para a energia 661,6 keV do  $Cs^{137}$ . A eficiência do sistema para a energia de 661,6 keV do  $Cs^{137}$  é de 2,02%.

Além de amostras de rochas das minas de fluorita, também foram coletadas amostras de água subterrânea, para determinação da concentração de Ra-226. Foram coletados 4 litros de água subterrânea de cada mina, sendo 2 litros de água de cada nível. As amostras foram acondicionadas em garrafas plásticas, de 1 litro, limpas com ácido nítrico, conforme orientações do Laboratório de Radioquímica do LAPOC/CNEN. Para a determinação de Rádio foi utilizado o equipamento Modelo FHT 770 T Ultra Low Level Counter da marca Thermo Eberline.

As análises para determinação de concentração de Ra-226 em água foram realizadas pelo método de radioquímica. O método é baseado na separação radioquímica do Ra e Pb dos demais elementos da matriz. Rádio e chumbo são co-precipitados com Ba na forma de sulfato, em seguida redissolvidos com EDTA em



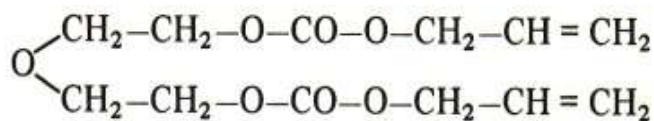
meio fortemente alcalino. O rádio é então precipitado na presença de sulfato em pH 4,5-5,0 e separado do chumbo por filtração. O precipitado contendo Ra-226 e Ra-228 é contado em contador proporcional de fluxo gasoso de ultra baixo background, Ra-226 contagem alfa e Ra-228 contagem beta após 30 dias quando ocorre o equilíbrio entre Ra-226 e Rn-222 e a contribuição de Ra-224 e Ra-223 são desprezíveis (Godoy, 1987).

### 4.3 Instrumentos de Medida

#### 4.3.1 CR-39 (*Columbia Resin 1939*), Detector de Radiação Gama e Detector ativo *Doseman-Pro*

Os detectores de radônio empregados para realização deste trabalho foram do tipo SSNTD (Detectores de Traços Nucleares), denominados de CR 39 (*Columbia Resin 1939*) e câmara de difusão são fabricados e fornecidos pela Track Analysis Systems Ltda., HH Wills Physics Laboratory, UK. Tem aspecto de plástico rígido incolor, densidade de 1,30 g/cm<sup>3</sup> e espessura de 1,0 mm, conforme ilustrado na Figura 8.

Sua denominação química Carbonato Diglicol Alílico (PADC), também conhecido como *Tastrak*, CR-39 e CR39. A fórmula e estrutura química é C<sub>12</sub> H<sub>18</sub> O<sub>7</sub>



O detector de radiação utilizado para determinar os valores de maior radiação gama no interior de minas, e o valor da radiação gama de fundo (*Background*) fora das minas, é da marca Victoreen Thyac III, probe GM, modelo 489-4, do Escritório da CNEN de Porto Alegre.

O dosímetro eletrônico de radônio modelo *Doseman-Pro* da marca Sarad GmbH (Alemanha) determina a concentração de radônio e seus filhos no ar ambiente e calcula a dose de radiação equivalente. Amostras de ar são sugadas através de um filtro que é analisado continuamente por um detector de Silício. Esse detector pertence à Divisão de Matérias Primas (DIMAP/CNEN).

#### 4.3.2 Microscópio Óptico e Demais Técnicas de Análises

O microscópio óptico utilizado para a contagem dos traços nucleares e determinação de densidade desses traços é da marca Olympus, modelo BX 40, com ocular de 12,5 x, objetiva de 10 x (aumento total de 125 x) e grade com área de 0,01 cm<sup>2</sup>.

As análises quantitativas e qualitativas de radioatividade as rochas foram feitas através de um sistema de espectrometria gama utilizando um cristal cilíndrico de NaI(Tl) com 4,5 cm x 4,5 cm acoplado a um analisador multicanal *EG&G ORTEC*. As análises dos dados foram feitas com auxílio dos *softwares Maestro v. 2.03* e *Specon v. 1.52*.

As análises para determinação de concentração de Ra<sup>226</sup> em água foram realizadas pelo método de radioquímica com o equipamento de Modelo FHT 770 T Ultra Low Level Counter da marca Thermo Eberline, contador proporcional de fluxo gasoso de ultra baixo background.

#### 4.4 Coleta de Dados

Para realização deste trabalho, foram utilizados, um total de 110 detectores do tipo CR 39 e 76 do tipo LEXAN, sendo 42 CR 39 e 24 LEXAN, nas minas de carvão e 68 CR 39 e 52 LEXAN, nas minas de fluorita. Os 76 detectores do tipo LEXAN foram enviados para o IEN/CNEN, para revelação e contagem dos traços. Dos 110 detectores do tipo CR-39, 43 foram enviados para o LAPOC/CNEN e 67 foram enviados para o IG/UFRGS, para revelação e contagem dos traços.

Também foram coletados dados de Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC), de dois pontos da mina RB, da sala de café e da frente de lavra, com o detector *Doseman-Pro*.

Foram coletadas, 17 amostras de rochas da frente de lavra, das minas estudadas. Das minas de carvão foram coletadas 9 amostras, sendo 3 do teto (capa), 3 do carvão (produto) e 3 do piso (lapa), uma amostra por mina. Das minas de fluorita foram coletadas 12 amostras, sendo 3 de granito normal, 3 de granito alterado, 3 de fluorita verde e 3 de fluorita roxa, uma amostra por mina. As amostras de rochas foram pulverizadas e com massa de 100 g.

Foram coletados 4 litros de água subterrânea de cada mina, sendo 2 litros de água de cada nível. As amostras foram acondicionadas em garrafas plásticas, de 1 litro, limpas com ácido nítrico.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando a determinação dos processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas de carvão e de fluorita, o estabelecimento de correlações entre os teores de radônio e as características geológicas das minas estudadas, e a avaliação da dose e do conseqüente risco radiológico a que os trabalhadores dessas minas estão expostos, tem-se como resultados: *i*) as concentrações de radônio no ar (determinadas pela densidade de traços nos detectores CR-39 e pelo detector ativo *Doseman-Pro*); *ii*) os teores de rádio em rochas e águas (determinados por radioanálise) e *iii*) as doses e os riscos radiológicos associados (calculados a partir dos valores de concentração de radônio no ar).

### 5.1 Concentrações de Radônio no Ar

#### 5.1.1 Concentrações de Radônio no Ar nas Minas de Carvão

Na Tabela 17, são identificados os pontos, os números dos detectores e sua localização, bem como os valores da densidade de traços, em traços/cm<sup>2</sup>, e a concentração de radônio, em Bq/m<sup>3</sup>, das minas subterrâneas de carvão. Também são apresentados os valores médios, da concentração de Rn-222, e os valores da radiação de fundo (BG). Os detectores foram instalados a partir da frente de lavra, em direção a saída das minas.

Nas Figuras 19, 20 e 21, são apresentados os gráficos dos valores da concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado e do detector, para cada mina de carvão. Na Figura 22, são apresentados os valores da concentração de radônio no ar das três minas de carvão estudadas.

Tabela 17 - Valores da concentração de Rn-222, densidade de traços, número do detector e localização dos detectores das minas de carvão.

<b>MI</b>					
<b>Ponto</b>	<b>No Detector</b>	<b>Localização</b>	<b>Densidade de Traços (traços/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Concentração Rn-222 (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Incerteza (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
1	186	Gal. 7/8 - T. 3 - Oficina - Refeitório	204,64	20,0	6,0
2	180	Gal. 2 - T. 2/3 - Saída ar viciado	222,25	21,0	6,0
3	192	Gal. 3 - T. 7 - Transporte	215,56	21,0	6,0
4	209	Gal. 6 - T 6 - Eixo principal	270,31	26,0	7,0
5	202	Gal. 6 - T. 6 - Saída da mina	202,48	20,0	6,0
			<b>Media</b>	21,0	
		Área Externa ( <i>out door</i> )	<b>BG</b>	53,0	
<b>MBI</b>					
1	46	T 8-G 0-E 2NW - Cauda correia mestre	1213,64	96,0	32,0
2	61	T 7-G 0-E 2NW - Cruzamento duas caudas	1238,18	98,0	32,0
3	58	T 5-G 11-E 2NW - Saída ar viciado	1510,91	119,0	40,0
4	67	T 7-G 7-E 2NW - Final da cauda	1520,91	120,0	40,0
5	59	T 7-G 10-E 2NW - Final da cauda	1437,27	113,0	37,0
6	142	T 5-G 2-E 2NW - Mesa café	1291,81	102,0	34,0
7	26	T 5-G 0-E 2NW - Britador	1246,36	99,0	32,0
8	64	Saída da mina - Próximo Segurança	773,64	61,00	21,0
			<b>Media</b>	101,0	
		Área Externa ( <i>out door</i> )	<b>BG</b>	82,0	
<b>MM</b>					
1	31	G 5 - T 13/14 - CT 7	535,45	128,0	14,0
2	35	G 6/7 - T 11 - Eixo SE 04	617,27	147,0	16,0
3	45	G 5/6 - T 15 - Eixo SE 03	980	234,0	26,0
4	32	G 6 - T 20 - Eixo SE 06	480	115,0	13,0
5	24	T 5 - Saída Ar Viciado	918,18	73,0	24,0
6	82	T 23 - G 4/5 - Eixo SE 01	536,36	42,0	14,0
7	141	T 12 - G 5 - CT 04	323,64	25,0	9,0
8	41	T 1 G 4/5 Eixo SE 06 – Saída da mina	317	25,0	9,0
			<b>Media</b>	99,0	
		Área Externa ( <i>out door</i> )	<b>BG</b>	49,0	

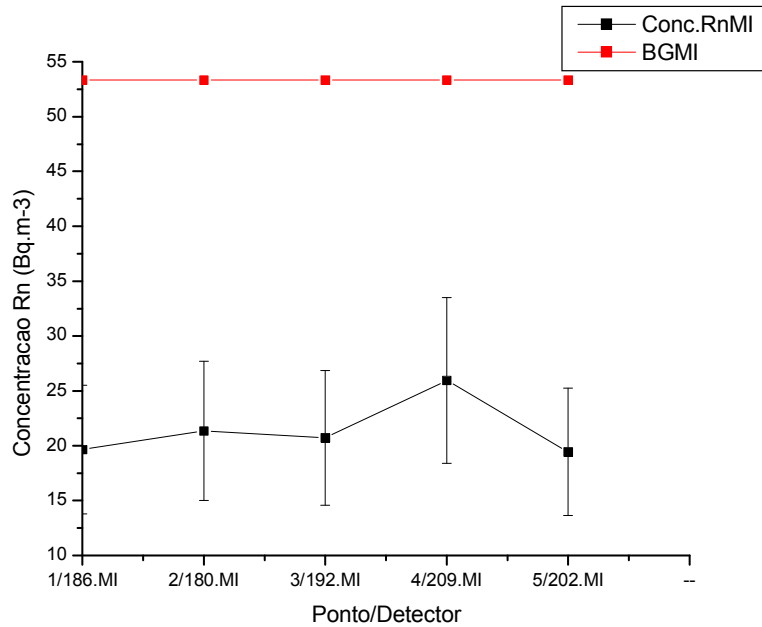


Figura 19 - Concentração de Rn-222 em função do ponto/detector da Mina MI. O valor da radiação natural de fundo (BG) está destacado em vermelho.

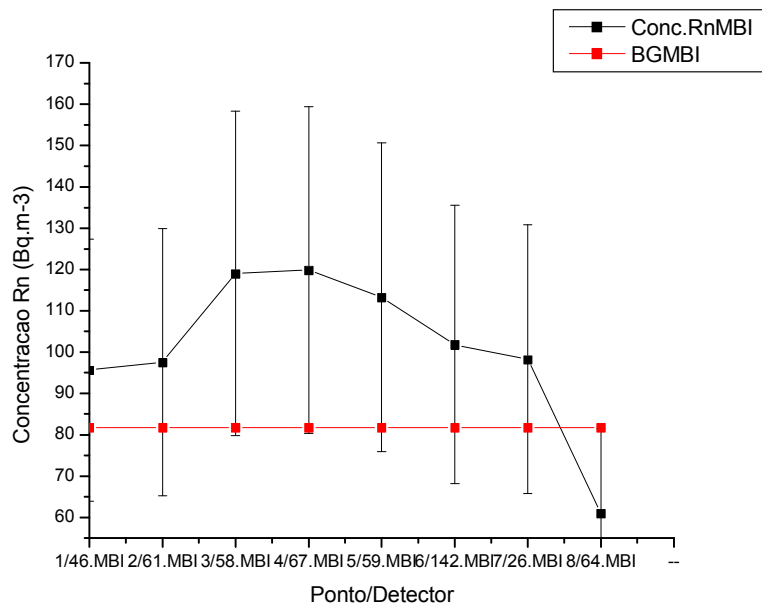


Figura 20 - Concentração de Rn-222 em função do ponto/detector da Mina MBI. O valor da radiação natural de fundo (BG) está destacado em vermelho.

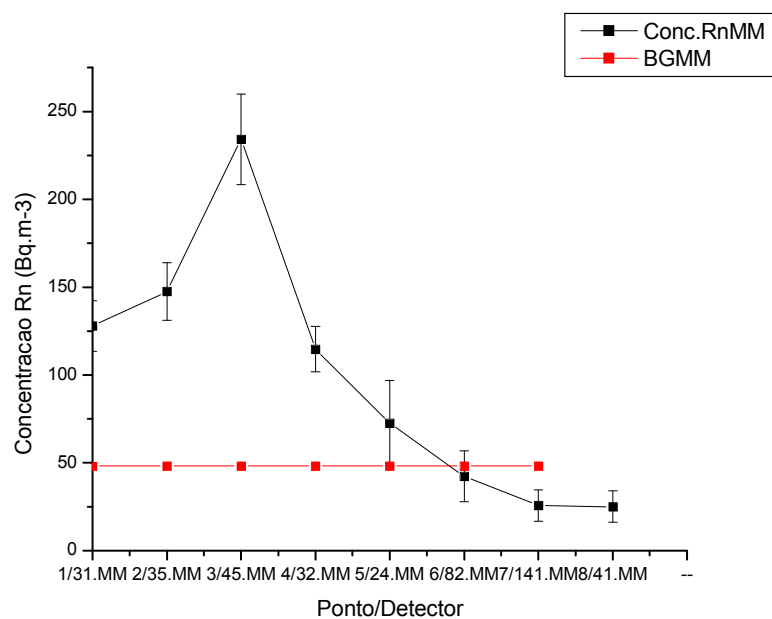


Figura 21 - Concentração de Rn-222 em função do ponto/detector da Mina MM. O valor da radiação natural de fundo (BG) está destacado em vermelho.

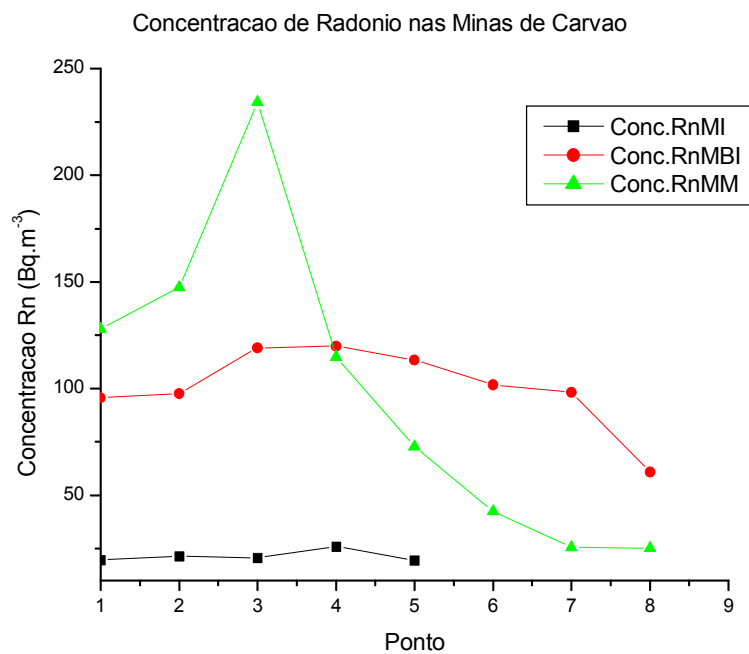


Figura 22 - Gráfico comparativo da concentração de Rn-222, das três minas de carvão, em função dos pontos amostrados.

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 17 e nas Figuras 19, 20, 21 e 22, que as minas de carvão apresentam valores de concentração de radônio no ar baixos, como esperado, uma vez que o urânio não tem associação geoquímica direta com o carvão. O intervalo de concentração de Rn-222 no ar, preconizado pelo ICRP 65 para níveis de ação, ou seja para a tomada de decisão em relação à implementação de ações protetoras é de 500 a 1500 Bq/m<sup>3</sup>. Valores inferiores a 500 Bq/m<sup>3</sup> não requerem ações protetoras e valores acima de 1500 Bq/m<sup>3</sup> sempre as requerem, como, por exemplo, aprimoramento do sistema de ventilação.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina MI, são de 21,0 Bq/m<sup>3</sup>, 26,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 209, ponto 4: Galeria 6 - Travessa 6 - Eixo principal) e 20,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 202, ponto 5: Galeria 6 - Travessa 6 - Saída da mina), respectivamente. O valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina MI é de 53,0 Bq/m<sup>3</sup>. Observa-se que para esta mina, o valor do BG é superior àqueles detectados em todos os pontos amostrados no interior da mina.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina MBI são de 100,8 Bq/m<sup>3</sup>, 120,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 67, ponto 4: Galeria 7- Travessa 7 - Eixo 2NW - Final da cauda) e 61,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 64, ponto 8: Saída da mina - Próximo Segurança), respectivamente. O valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina MBI é de 82,0 Bq/m<sup>3</sup>. Observa-se que para esta mina, o valor do BG é superior àquele detectado em somente um ponto amostrado no interior da mina.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 para a mina MM são de 99,0 Bq/m<sup>3</sup>, 234,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 45, ponto 3: entre Galeria 5 e 6 – Travessa 15 - Eixo SE 03) e 25,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 41, ponto 8, entre as Galerias 4 e 5 - Travessa 1 - Eixo SE 06 – Saída da mina), respectivamente. O valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina MM é de 49,0 Bq/m<sup>3</sup>. Observa-se que para esta mina, o valor do BG é superior àqueles detectados em três pontos amostrados no interior da mina.



Comparando-se as concentrações de Rn-222 no ar das três minas de carvão, observa-se que a mina MI apresenta valores menores que as outras (máximo de 26,0 Bq/m<sup>3</sup> e mínimo de 20,0 Bq/m<sup>3</sup>). Isso pode ser explicado pelo fato de a mina ser pequena e a ventilação ser suficiente para manter as concentrações de Rn-222 no ar baixas.

A mina MM apresenta valores de concentração de Rn-222 no ar nas proximidades da frente de lavra mais elevados que as outras minas de carvão. Isso pode ser explicado pelo fato de a mina MM ser de tamanho mediano e não possuir exaustores auxiliares na frente de lavra, o que não ocorre com a mina MBI. Na mina MBI, apesar de ser uma mina extensa, o valor máximo da concentração de Rn-222 no ar (120,0 Bq/m<sup>3</sup>) é menor que o da mina MM (234,0 Bq/m<sup>3</sup>). Isso pode ser explicado pelo fato de a mina MBI possuir exaustores auxiliares na frente de lavra, além dos exaustores de superfície, permitindo a retirada do ar sujo da frente de lavra.

Comparando o valor da concentração da radiação natural de fundo (53,0 Bq/m<sup>3</sup>) de Rn-222 no ar, encontrado para a mina MI, com o valor médio (21,0 Bq/m<sup>3</sup>), observou-se que este é cerca de duas vezes superior. Por outro lado, para as minas MBI e MM, o valor da radiação natural de fundo encontra-se entre os valores máximos e mínimos. Isso confirma a eficiência da ventilação da mina MI, onde as concentrações de radônio no ar dentro da mina são bem menores que as de fora dela.

### 5.1.2 Concentrações de Radônio no Ar nas Minas de Fluorita

Na Tabela 18, são identificados os pontos, os números dos detectores e sua localização, bem como os valores da densidade de traços, em traços/cm<sup>2</sup>, e a concentração de radônio no ar, em Bq/m<sup>3</sup>, da mina de fluorita RB, das duas campanhas. Também são apresentados os valores médios, da concentração de Rn-222, e os valores da radiação de fundo (BG). O detector n<sup>o</sup> 108, ponto 3, foi considerado saturado e seus valores foram retirados dos cálculos e das análises. Os detectores foram instalados a partir da frente de lavra, em direção a saída da mina.

Na Figura 23, são apresentados os gráficos dos valores da concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado, da mina RB, da primeira e da segunda campanha. Também é apresentado o valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina RB.

Tabela 18 - Valores da concentração de Rn-222, densidade de traços, número do detector e localização dos detectores da mina de fluorita RB.

<b>Mina RB – Campanha 1</b>					
<b>Ponto</b>	<b>No Detector</b>	<b>Localização</b>	<b>Densidade de Traços (traços/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Concentração Rn-222 (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Incerteza (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
1	184	N 152 - Frente de lavra	25164	5281,0	652,0
2	174	N 152 - Acesso Rampa 3/152	18824	3950,0	490,0
3	199	N 152 - Cruz. Estrutura 1	12304	2582,0	323,0
4	234	N152 - Of. Mecânica	13072	2744,0	343,0
5	181	N 152 - Sala café	9840	2066,0	261,0
6	195	N 102 - Acesso rampa 1/152	12532	2631,0	329,0
7	205	N 102 - Sala café	11296	2372,0	298,0
			Media	3090,0	
		Área Externa ( <i>out door</i> )	BG	43,0	
<b>Mina RB – Campanha 2</b>					
1	104	N 152 - Frente de Lavra	11723,33	3063,0	307,0
2	91	N 152 - Acesso Estrutura 4	11390	2977,0	298,0
3	108	N 152 - Início da Rampa	43636,67	11406,0 (saturado)	1121,0
4	107	N 152 - Ponto de Manutenção	6480	1694,0	173,0
5	182	N 152 - Sala Café	4446,67	1162,0	121,0
6	197	N 102 - Sala Café	4686,67	1225,64	127,62
7	184	N 102 - Paralela Bloco 2	15650	4094,0	407,0
8	196	N 102 - Estrutura 2	10240	2678,0	269,0
			Media	2414,0	
		Área Externa ( <i>out door</i> )	BG	43,0	

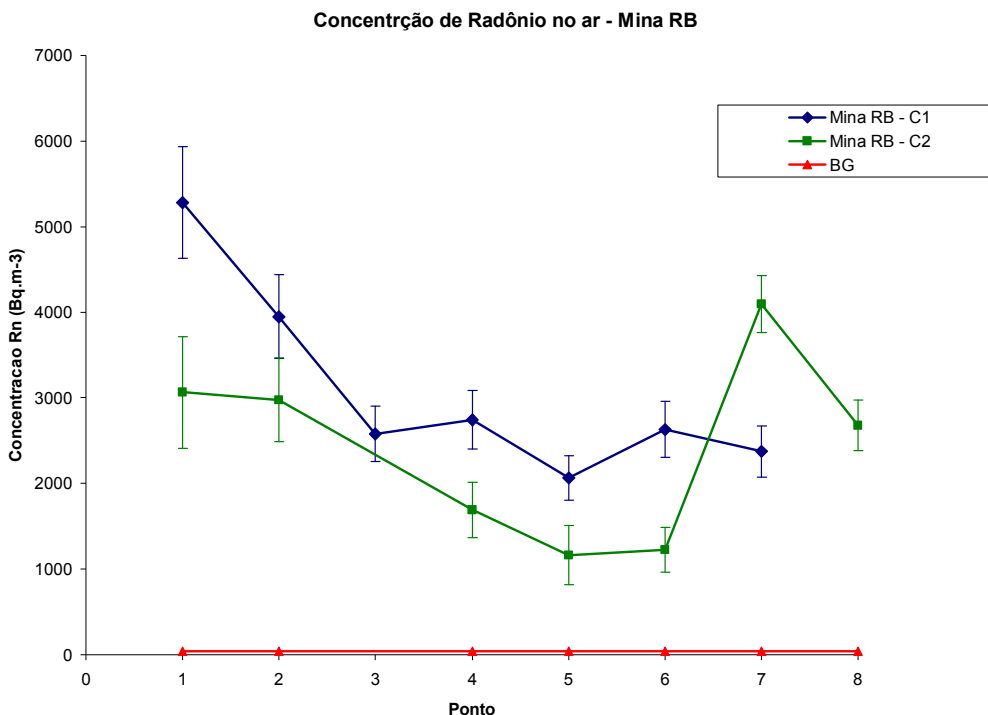


Figura 23 - Concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado da mina de fluorita RB para as duas campanhas (C1 e C2) e a radiação natural de fundo (BG).

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 18 e na Figura 23, que a mina RB apresenta valores de concentração de radônio no ar elevados e acima do intervalo de níveis de ação preconizado pelo ICRP 65, que é de 500 a 1500 Bq/m<sup>3</sup>, para as duas campanhas.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina RB, primeira campanha, são de 3090,0 Bq/m<sup>3</sup>, 5281,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 184, ponto 1: Nível 152 – Frente de Lavra) e 2066,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 181, ponto 5: Nível 152 – Sala Café), respectivamente. O valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina RB é de 43,0 Bq/m<sup>3</sup>. Todos os valores da concentração de Rn no ar são acima do valor da radiação natural de fundo.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina RB, segunda campanha, são de 2414,0 Bq/m<sup>3</sup>, 4094,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 184, ponto 7: Nível 102 – Paralela Bloco 2) e 1162,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 182,

ponto 5: Nível 152 – Sala Café), respectivamente. O valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina RB é de 43,0 Bq/m<sup>3</sup>. Todos os valores da concentração de Rn no ar são acima do BG.

Os menores valores da concentração de Rn-222 no ar, da mina RB para as duas campanhas, se localizam na Sala de Café, enquanto que os maiores valores da concentração de Rn-222 no ar se localizam próximo à frente de lavra.

Observou-se uma diminuição dos valores da concentração de Rn-222 no ar entre as duas campanhas. O valor médio passou de 3090,0 Bq/m<sup>3</sup> para 2414,0 Bq/m<sup>3</sup>. Na primeira campanha, todas as concentrações estavam acima do nível máximo de ação internacionalmente estabelecido, enquanto, na segunda campanha, houve pontos (dois) que apresentaram valores de concentração mais baixos, entre 1000 e 1500 Bq/m<sup>3</sup>, no entanto, ainda requerendo medidas remediadoras.

As modificações feitas na ventilação, causa da diferença entre as duas campanhas, não foram suficientes para reduzir a concentração de radônio no ar para valores aceitáveis internacionalmente e preconizados pela ICRP 65.

Na Tabela 19, são identificados os pontos, os números dos detectores e sua localização, bem como os valores da densidade de traços e a concentração de radônio da mina de fluorita NF, das duas campanhas. Também são apresentados os valores médios, da concentração de Rn-222, e os valores da radiação de fundo (BG).

Na Figura 24, são apresentados os gráficos dos valores da concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado, da mina NF, da primeira e da segunda campanha. Também é apresentado o valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina NF.

Tabela 19 - Valores da concentração de Rn-222, densidade de traços, número do detector e localização dos detectores da mina de fluorita NF.

<b>Mina NF – Campanha 1</b>					
<b>Ponto</b>	<b>Nº Detector</b>	<b>Localização</b>	<b>Densidade de Traços (traços/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Concentração Rn-222 (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Incerteza (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
1	178	N 196 - Saída da Ventilação	9516	1998,0	252,0
2	149	N 196 - Frente do acesso 1	9108	1912,0	242,0
3	208	N 196 - Sala café	7352	1544,0	197,0
4	196	N 140 - T. 3 - Bl. 4/140	9288	1950,0	246,0
5	221	N 140 - Frente acesso poço	10444	2193,0	276,0
6	182	N 140 - T. 9 - Bl. 1/140 - Área Desativada	15088	3169,0	394,0
7	198	N 140 - Sala café	7436	1562,0	199,0
			Media	2047,0	
		Área Externa ( <i>out door</i> )	BG	54,0	
<b>Mina NF – Campanha 2</b>					
1	106	N 196 - Frente de Lavra	10816,67	2826,0	284,0
2	183	N 196 - Saída Emergência	3710	969,0	98,0
3	112	N 196 - Frente do acesso 1	6076,67	1587,0	159,0
4	101	N 196 - Sala café	2283,33	596,0	62,0
5	140	N 140 - Acesso bloco 5	2630	687,0	71,0
6	195	N 140 - área Desativada	2610	682,0	70,0
7	95	N 140 - Sala café	1933,33	505,0	53,0
			Media	1122,0	
		Área Externa ( <i>out door</i> )	BG	54,0	

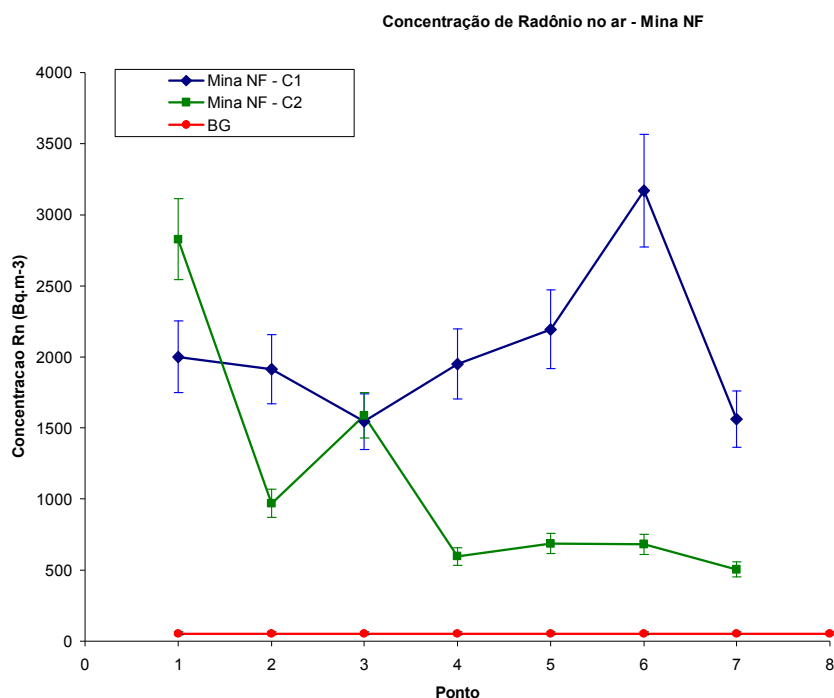


Figura 24 - Concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado da mina de fluorita NF para as duas campanhas (C1 e C2) e a radiação natural de fundo (BG).

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 19 e na Figura 24, que a mina NF, de fluorita, apresenta valores de concentração de radônio no ar, elevados e acima do intervalo de níveis de ação preconizado pelo ICRP 65, que é de 500 a 1500 Bq/m<sup>3</sup>, para as duas campanhas.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina NF, primeira campanha, são de 2047,0 Bq/m<sup>3</sup>, 3169,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 182, ponto 6: Nível 140 - Travessa 9 - Bloco 1/140 - Área Desativada) e 1544,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 208, ponto 3: Nível 196 - Sala café), respectivamente. O valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina NF é de 54,0 Bq/m<sup>3</sup>. Todos os valores da concentração de Rn no ar são acima do valor da radiação natural de fundo.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina NF, segunda campanha, são de 1122,0 Bq/m<sup>3</sup>, 2826,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 184, ponto 7: Nível 196 - Frente de Lavra) e 505,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 182, ponto

5: Nível 140 - Sala café), respectivamente. O valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina NF é de 54,0 Bq/m<sup>3</sup>. Todos os valores da concentração de Rn no ar são acima do valor do BG.

Os menores valores da concentração de Rn-222 no ar, da mina NF para as duas campanhas, localizam-se na Sala de Café, enquanto que os maiores valores da concentração de Rn-222 no ar, se localizam na área desativada, para a primeira campanha, e próxima à frente de lavra, para a segunda campanha.

Observou-se uma diminuição dos valores da concentração de Rn-222 no ar, entre as duas campanhas. O valor médio passou de 2047,0 Bq/m<sup>3</sup> para 1122,0 Bq/m<sup>3</sup>. Na primeira campanha, todos os pontos apresentaram valores acima do intervalo de níveis de ação internacionalmente preconizados, enquanto que na segunda campanha houve pontos (cinco) que apresentaram valores dentro desse intervalo, quais sejam, entre 1000 e 1500 Bq/m<sup>3</sup>.

A área desativada, que na primeira campanha apresentou o valor máximo de 3169,0 Bq/m<sup>3</sup>, na segunda campanha apresentou valor mais baixo (682,0 Bq/m<sup>3</sup>). Por outro lado, houve um aumento da concentração de radônio na frente de lavra, da primeira (1998,0 Bq/m<sup>3</sup>) para a segunda (2826,0 Bq/m<sup>3</sup>) campanha.

As modificações feitas na ventilação, motivo da diferença entre as concentrações de radônio das duas campanhas, não foram suficientes para reduzir essas concentrações para valores abaixo dos níveis de ação preconizados pela ICRP 65.

Na Tabela 20, são identificados os pontos, os números dos detectores e sua localização, bem como os valores da densidade de traços e a concentração de radônio da mina de fluorita MF, das duas campanhas. Também são apresentados os valores médios, da concentração de Rn-222, e os valores da radiação de fundo (BG).

Na Figura 25 são apresentados os gráficos dos valores da concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado, da mina MF, da primeira e da segunda campanha. Também é apresentado o valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina MF.

Tabela 20 - Valores da concentração de Rn-222, densidade de traços, número do detector e localização dos detectores da mina de fluorita MF.

<b>Mina MF – C1</b>					
<b>Ponto</b>	<b>No Detector</b>	<b>Localização</b>	<b>Densidade de Traços (traços/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Concentração Rn-222 (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Incerteza (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
1	170	N 200N - Bl. 3 - Frente de lavra	29826,67	6358,0	769,0
2	166	N 200N - Bl. 2/3	29213,33	6227,0	753,0
3	176	N 200N - Painel Ferramentas	4056,67	864,0	107,0
4	152	N 200N - Sala café	4100	874,0	108,0
5	163	N 250N - Bl. 3 - Chaminé 4	5793,33	1235,0	151,0
6	167	N 250N - Sala café	3540	754,0	94,0
7	173	N 250S Bl. 1 - Chaminé 5	2843	606,0	76,0
8	153	N 300 Praça de Manobras	2970	633,0	79,0
			Media	2194,0	
		Área Externa ( <i>out door</i> )	BG	34,0	
<b>Mina MF - C2</b>					
1	97	N 200N - Bl. 4 - T 3 - Frente de Lavra	2840	751,0	74,0
2	117	N 200N - Chaminé 5	2483,33	657,0	65,0
3	115	N 200N - Sala café	2456,67	650,0	64,0
4	131	N 200N - Oficina - Manutenção	2126,67	562,0	56,0
5	188	N 200N - Chaminé 4	2503,33	662,0	65,0
6	132	N 200N - Sala café	1820	481,0	48,0
7	198	N 250N - Sala café	1403,33	371,0	37,0
8	95	N 250N - Oficina Mecânica	1380	366,0	37,0
9	185	N 250N - Chaminé 4	2126,67	563,0	56,0
			Media	563,0	
		Área Externa ( <i>out door</i> )	BG	34,0	



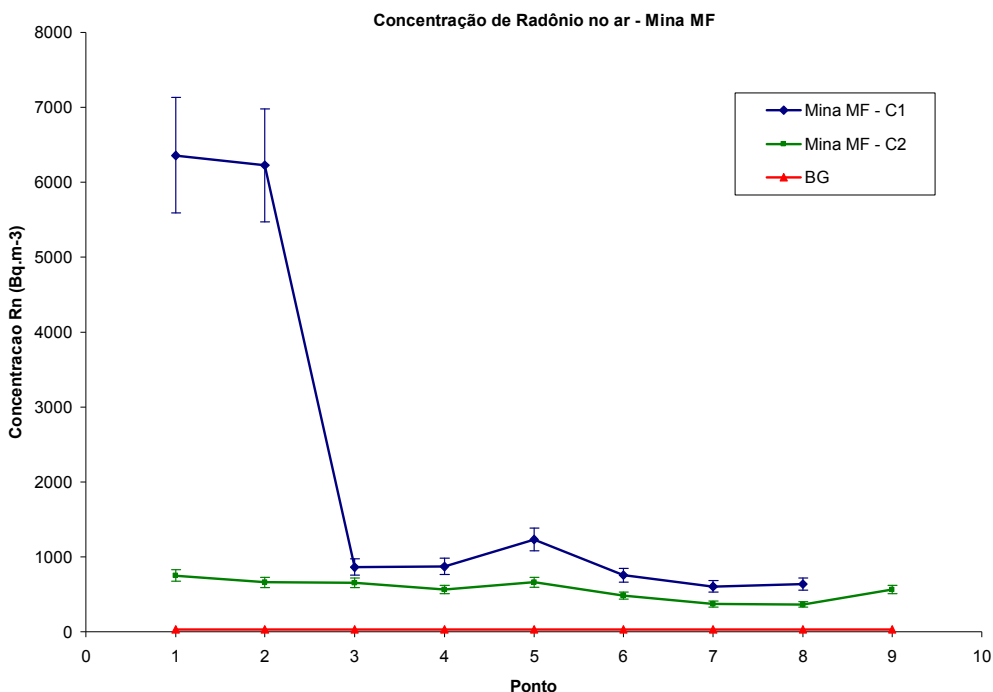


Figura 25 - Concentração de Rn-222 no ar em função do ponto amostrado da mina de fluorita MF para as duas campanhas (C1 e C2) e a radiação natural de fundo (BG).

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 20 e na Figura 25, que a mina MF, de fluorita, apresenta valores de concentração de radônio no ar baixos, exceto para frente de lavra, na primeira campanha. O intervalo de níveis de ação para a concentração de Rn-222 no ar preconizado pelo ICRP 65 é de 500 a 1500 Bq/m<sup>3</sup>.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina MF, primeira campanha, são de 2194,0 Bq/m<sup>3</sup>, 6358,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 170, ponto 1: Nível 200N - Bloco 3 - Frente de lavra) e 606,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 173, ponto 7: Nível 250S Bloco 1 - Chaminé 5), respectivamente. O valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina MF é de 34,0 Bq/m<sup>3</sup>. Todos os valores da concentração de Rn no ar são acima do valor do BG.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina MF, segunda campanha, são de 563,0 Bq/m<sup>3</sup>, 751,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 97, ponto 1: Nível 200N - Bloco 4 - Travessa 3 - Frente de Lavra) e 366,0 Bq/m<sup>3</sup> (detector n<sup>o</sup> 85, ponto 8: Nível 250N - Oficina Mecânica), respectivamente. O valor da radiação natural de fundo (BG) para a mina MF é de 34,0 Bq/m<sup>3</sup>. Todos os valores da concentração de Rn no ar são acima do valor do BG.

Os valores maiores da concentração de Rn-222 no ar, da mina MF para a primeira campanha, se localizam próximo à frente de lavra, enquanto que, os demais pontos apresentam valores baixos de concentração de Rn-222 no ar. Para a segunda campanha, todos os pontos apresentam valores baixos e aceitáveis.

Observou-se uma diminuição dos valores da concentração de Rn-222 no ar, entre as duas campanhas. O valor médio passou de 2194,0 Bq/m<sup>3</sup> para 563,0 Bq/m<sup>3</sup>. Na primeira campanha houve dois pontos acima do valor máximo do intervalo de níveis de ação, enquanto que na segunda campanha todos os pontos apresentaram valores dentro desse intervalo, ou seja, entre 500 e 1500 Bq/m<sup>3</sup>.

As modificações feitas na ventilação, motivo da diferença entre as concentrações de radônio das duas campanhas, foram suficientes para reduzir essas concentrações para valores aceitáveis internacionalmente.

### 5.1.3 Concentrações de Radônio no Ar nas Minas de Fluorita Obtidos com o *DOSEMAN*

O detector *Doseman-Pro* foi instalado primeiro na sala de café e depois próximo à frente de lavra (a  $\pm$  30 m), para verificar a contribuição das explosões na concentração de radônio no ar do ambiente mineiro. Essas medidas foram realizadas, somente na mina de fluorita RB.

No período em que o detector ficou instalado próximo a frente de lavra (Bloco 3 - Nível 152), houve 10 detonações em diversos pontos da mina, conforme mostrado na Tabela 21. O período de amostragem, na frente de lavra, teve início dia 03/10/2007 as 9:09 h e término dia 04/10/2007 as 8:49 h. Os pontos grifados, em

vermelho, correspondem às detonações feitas no bloco em que o detector estava instalado, próximo à frente de lavra (3/152).

Tabela 21 - Pontos e horários que houve explosões na mina RB. Os pontos negrito correspondem às detonações feitas no Bloco 3 - Nível 152.

PONTO DAS DETONAÇÕES (Bloco/Nível)	HORÁRIO DAS DETONAÇÕES
1/152	9:40
<b>3/152</b>	<b>9:50</b>
1/152	14:30
<b>3/152</b>	<b>20:30</b>
1/152	21:25
2/152	23:45
Acesso/60	23:47
Acesso/130	23:50
1/152	01:45
<b>3/152</b>	<b>02:30</b>

Na Figura 26 e na Figura 27, são apresentados os gráficos das concentrações equivalentes de equilíbrio (EEC) do Rn-222 no ar em função do tempo, para a sala de café e para frente de lavra da mina RB, respectivamente. Os valores encontrados da EEC, na sala de café e na frente de lavra, estão apresentados na Tabela 31 e na Tabela 32, respectivamente, no Anexo A.

O gráfico da Figura 26 foi obtido com 9 intervalos, com tempo de amostragem de 20 minutos e tempo total de exposição de 180 minutos, enquanto o gráfico da Figura 27 foi obtido com 145 intervalos, com tempo de amostragem de 10 minutos e tempo total de exposição de 1430 minutos (23,8 horas).

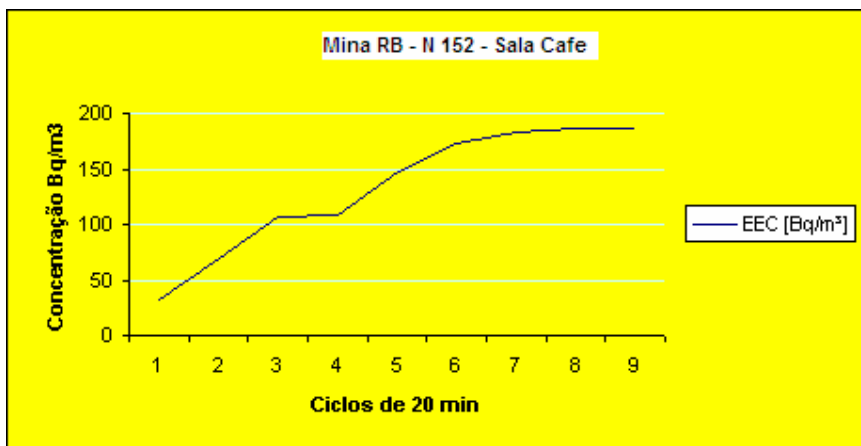


Figura 26 - Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC) em função do tempo na sala de café da mina RB.

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 30 do Anexo A, e na Figura 26, que a EEC do radônio no ar para a sala de café apresenta valor máximo de  $187 \text{ Bq/m}^3$ . A forma da curva relativamente suave é devida somente às variações diurnais e à saturação do detector. Observa-se que a sala de café é distante da frente de lavra.

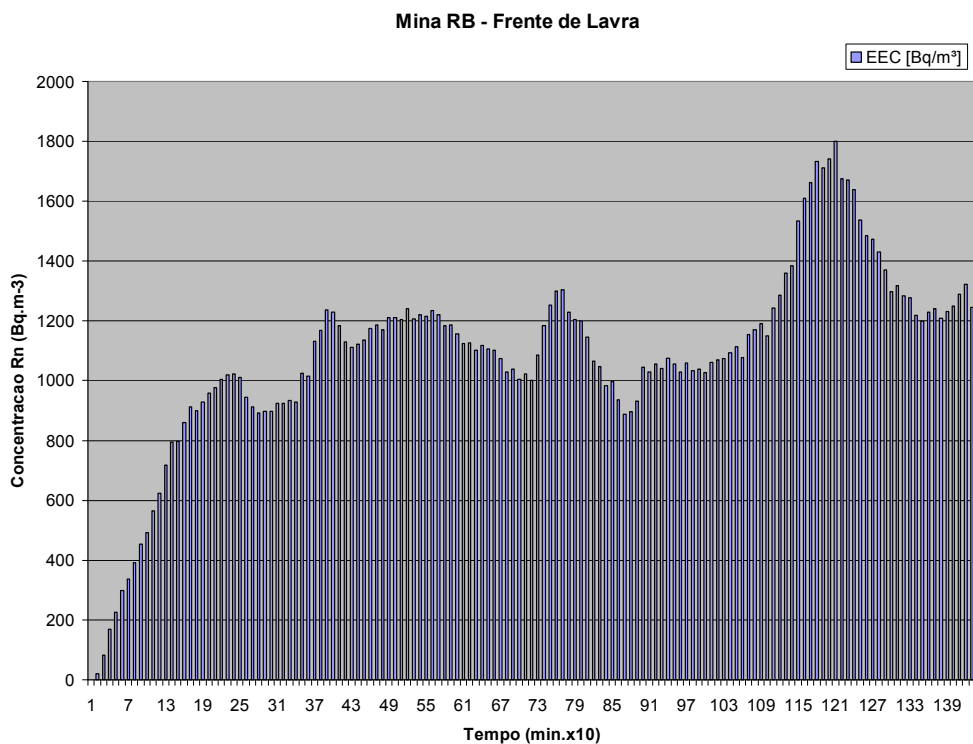


Figura 27 - Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC) em função do tempo na frente de lavra da mina RB

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 32 do Anexo A, na Tabela 21 e na Figura 27, que a EEC do radônio no ar na frente de lavra apresenta valor máximo de  $1800 \text{ Bq/m}^3$ . Além disso, houve o aparecimento de três picos. O primeiro pico aparece entre as 12:10 h e 13:10 h, que corresponde ao intervalo de amostragem 180 a 270 minutos. O segundo pico aparece entre 21:30 h e 22:00 h, que corresponde ao intervalo de amostragem de 770 a 830 minutos. O terceiro pico aparece entre 4:10 h e 5:10 h, que corresponde ao intervalo de amostragem de 1150 a 1260 minutos.

Os horários das explosões, no bloco 3 - nível 152, foram 9:50 h, 20:30 h e 2:30 h, e o primeiro pico aparece entre as 12:10 h e 13:10 h, o segundo pico aparece entre 21:30 h e 22:00 h e o terceiro pico aparece entre 4:10 h e 5:10 h. O intervalo de tempo decorrido entre a explosão e o aparecimento do pico foi em torno de, 2 horas para o primeiro, 1 hora para o segundo e 1,5 horas para o terceiro. Essa defasagem entre momento da explosão e surgimento do pico ocorre porque é necessário algum intervalo de tempo para que sejam geradas condições diferentes no ambiente que impliquem em mudanças perceptíveis pelo detector.

Pode-se considerar que o radônio presente no ar é proveniente da emanção e da exalação das rochas e dos minerais que compõe o ambiente mineiro, ou das rochas e dos minerais de regiões mais profundas da crosta, em ambos os casos, no momento da explosão o radônio exala do material (rocha ou mineral) e é liberado para o ar. No primeiro caso o radônio exala da rocha ou do mineral e é liberado diretamente no ambiente mineiro. No segundo caso o radônio exala da rocha ou do mineral, e através de falhas e fraturas, é liberado para o ambiente da mina. Qualquer que seja o motivo das variações da concentração de radônio no ar, estas necessitam de um intervalo de tempo para que sejam percebidas pelo detector.

#### 5.1.4 Teores de Rádio nas Rochas das Minas de Carvão

Na Tabela 22, são apresentados os valores da concentração de Ra-226, da capa (teto), do carvão (produto) e da lapa (pisso), em Bq/kg, para cada mina de carvão estudada.

Tabela 22 - Valores da concentração de Ra- 226, da capa (teto), do carvão (produto) e da lapa (pisso), em Bq/kg, para cada mina de carvão.

<b>Mina</b>	<b>Material</b>	<b>Concentração Ra-226 (Bq/kg)</b>
<b>MI</b>	<b>Capa (Teto)</b>	13,6
	<b>Carvão</b>	5,8
	<b>Lapa (pisso)</b>	5,5
<b>MBI</b>	<b>Capa (Teto)</b>	10,8
	<b>Carvão</b>	8,4
	<b>Lapa (pisso)</b>	10,4
<b>MM</b>	<b>Capa (Teto)</b>	7,8
	<b>Carvão</b>	5,6
	<b>Lapa (pisso)</b>	7,6

Na Figura 28, é apresentado o gráfico dos valores da concentração de Ra-226, em função do tipo de material (rocha), para cada mina de carvão estudada.

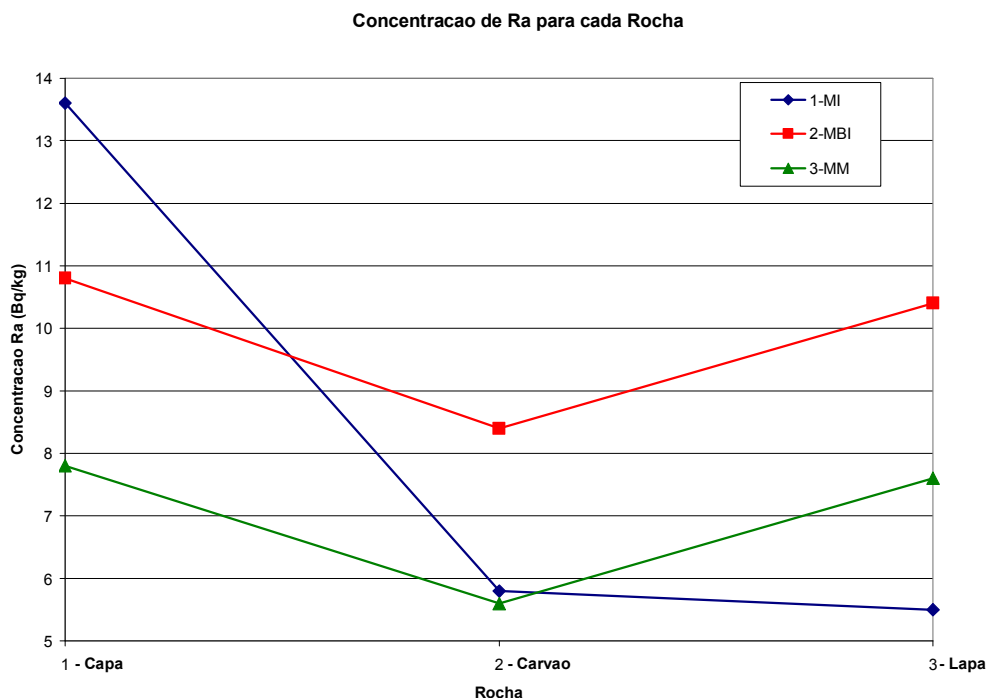


Figura 28 - Concentração de Rádio em função do tipo rocha (capa, carvão e lapa) das minas de carvão.

Observou-se, na análise dos resultados contidos na Tabela 22 e na Figura 28, que a concentração de Ra-226 nas rochas que compõem a capa e a lapa, normalmente arenitos e siltitos, é maior que a concentração de rádio no carvão (produto). A concentração de Ra-226 nas rochas da capa tem valor médio de 10,7 Bq/kg, do carvão 7,4 Bq/kg e do piso 7,8 Bq/kg.

### 5.1.5 Teores de Rádio nas Rochas das Minas de Fluorita

Na Tabela 23, são apresentados os valores da concentração de Ra- 226, do granito normal (Gran. Nor.) e alterado (Gran. Mod.), e da fluorita verde (Fluor. Vd.) e roxa(Fluor. Roxa.), em Bq/kg, para cada mina de fluorita estudada.

Tabela 23 - Valores da concentração de Rádío, do granito normal e alterado, e da fluorita verde e roxa, em Bq/kg, para cada mina de fluorita.

<b>Mina</b>	<b>Material</b>	<b>Concentração Ra-226 (Bq/kg)</b>
<b>MF</b>	Granito Alterado	0,9
	Granito Normal	11,2
	Fluorita Verde	0,09
	Fluorita Roxa	3,6
<b>NF</b>	Granito Alterado	14,6
	Granito Normal	21,2
	Fluorita Verde	2,2
	Fluorita Roxa	3,5
<b>RB</b>	Granito Alterado	76,1
	Granito Normal	19,3
	Fluorita Verde	1,5
	Fluorita Roxa	3,5

Na Figura 29, é apresentado o gráfico dos valores da concentração de Ra-226, em função do tipo rocha (granito alterado e normal, e fluorita verde e roxa) das minas de fluorita estudada.



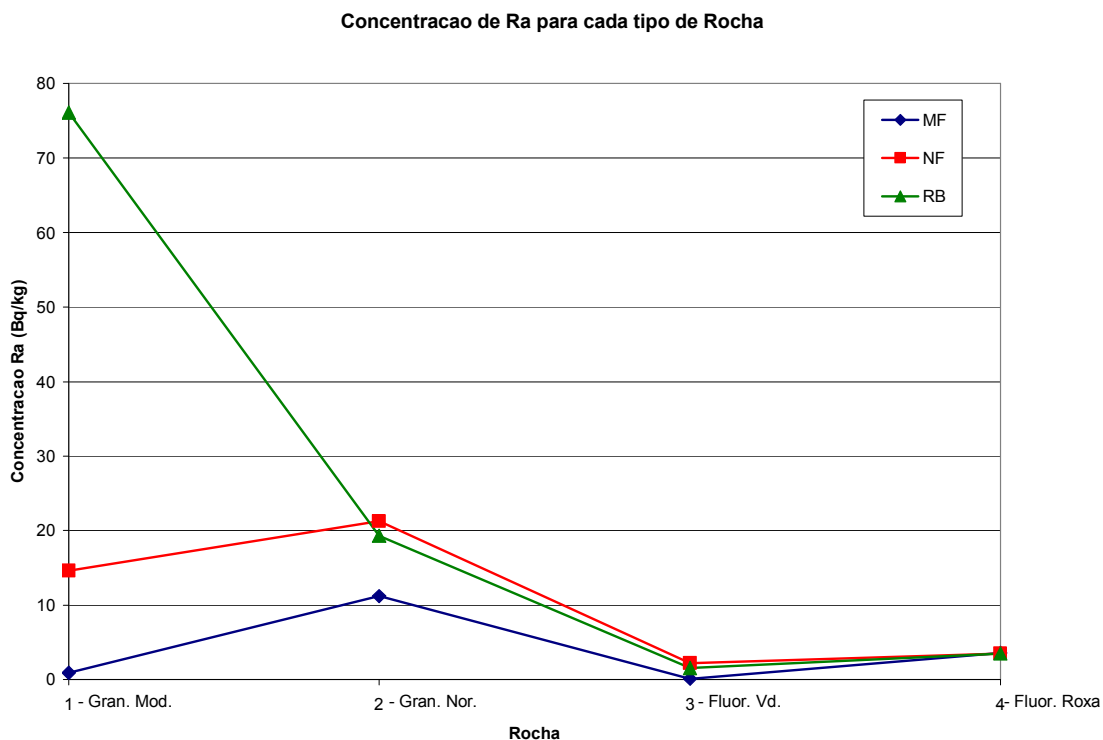


Figura 29 - Concentração de Rádío em função do tipo rocha (granito alterado e normal) e dos minerais (fluorita verde e roxa) das três minas de fluorita.

Observou-se, na análise dos resultados apresentados na Tabela 23 e na Figura 29, que a concentração de Ra-226 nos granitos, normal e alterado, é maior que a concentração nas fluoritas, verde e roxa, exceto para a mina MF onde a tendência foi oposta, ou seja, a menor concentração de Ra-226 foi encontrada no granito alterado.

A concentração de Ra-226 tem valor médio para o granito alterado de 30,5 Bq/kg e para o granito normal de 17,2 Bq/kg. O valor médio da concentração de Ra-226 nos granitos (normal e alterado) é de 24 Bq/kg.

A concentração de Ra-226 tem valor médio para a fluorita verde de 1,2 Bq/kg, para a fluorita roxa de 3,5 Bq/kg. O valor médio da concentração de Ra-226 nas fluoritas (verde e roxa) é de 2,4 Bq/kg. O valor médio da concentração de Ra-226 nos granitos é dez vezes maior que o valor médio das fluoritas.

A concentração de Ra-226, no granito alterado da mina RB, apresenta valores elevados (76,1 Bq/kg), em relação ao granito alterado das outras minas de fluorita.

### 5.1.6 Teores de Rádio nas Águas das Minas de Fluorita

Na Tabela 24, são apresentados os valores da concentração de Ra- 226, nas águas coletadas nas minas de fluorita, em Bq/L.

Tabela 24 - Valores da concentração de Rádio das águas, em Bq/L, para cada mina de fluorita.

<b>Mina</b>	<b>Nível</b>	<b>Concentração Ra-226 (Bq/L)</b>	<b>Incerteza (Bq/L)</b>
<b>MF</b>	200	< 0,02	-
	250	< 0,02	-
<b>NF</b>	196	0,021	± 0,007
	140	0,023	± 0,007
<b>RB</b>	102	< 0,02	-
	Potável	< 0,02	-

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 24 que a concentração de Ra-226 nas águas, coletadas das minas de fluorita, apresentam valores baixos ou abaixo do limite de detecção do equipamento (<0,02 Bq/L) utilizado para radioanálise. Com isso, pode-se inferir que as águas subterrâneas contribuem pouco ou quase nada para o aumento da concentração de radônio no ar, no ambiente subterrâneo das minas de fluorita.

É importante destacar que, conforme publicação da AIEA (1989) o rádio, embora em quantidade pequena, está contido nas águas subterrâneas que estão normalmente em contato com rochas e solos. As concentrações de radônio em águas subterrâneas esperadas são de cerca de 0,030 Bq/L, valor este superior aos valores das concentrações encontradas para o rádio nas amostras de água das

minas de fluorita aqui estudadas, o que leva à suposição que o rádio porventura presente nas águas não contribuir significativamente para a radioatividade detectada no ar do interior dessas minas.

## 5.2 Relação entre Concentração de Radônio no Ar e Concentração de Rádio nas Rochas

### 5.2.1 Relação entre Concentração de Radônio no Ar e Concentração de Rádio nas Rochas das Minas de Carvão

Na Tabela 25, são apresentados os valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar e as concentrações de Ra-226, em Bq/kg, para cada tipo de rocha, capa (teto), carvão (produto) e (piso), das minas de carvão.

Nas Figuras 30, 31 e 32, são apresentados os gráficos dos valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar, em função concentração de Rádio, das minas de carvão para a capa (teto), carvão (produto) e lapa (piso), respectivamente.

Tabela 25 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar e das concentrações de Ra-226, em Bq/kg, para cada tipo de rocha, das minas de carvão.

Mina	Concentração Rn-222 no Ar (Bq/kg)			Concentração Ra-226 na Rocha (Bq/kg)		
	Médio	Máximo	Mínimo	Capa (Teto)	Carvão	Lapa (Piso)
<b>MI</b>	17,0	21,0	16,0	13,6	5,8	5,5
<b>MBI</b>	82,0	97,0	50,0	10,8	8,4	10,4
<b>MM</b>	80,0	190,0	20,0	7,8	5,6	7,6

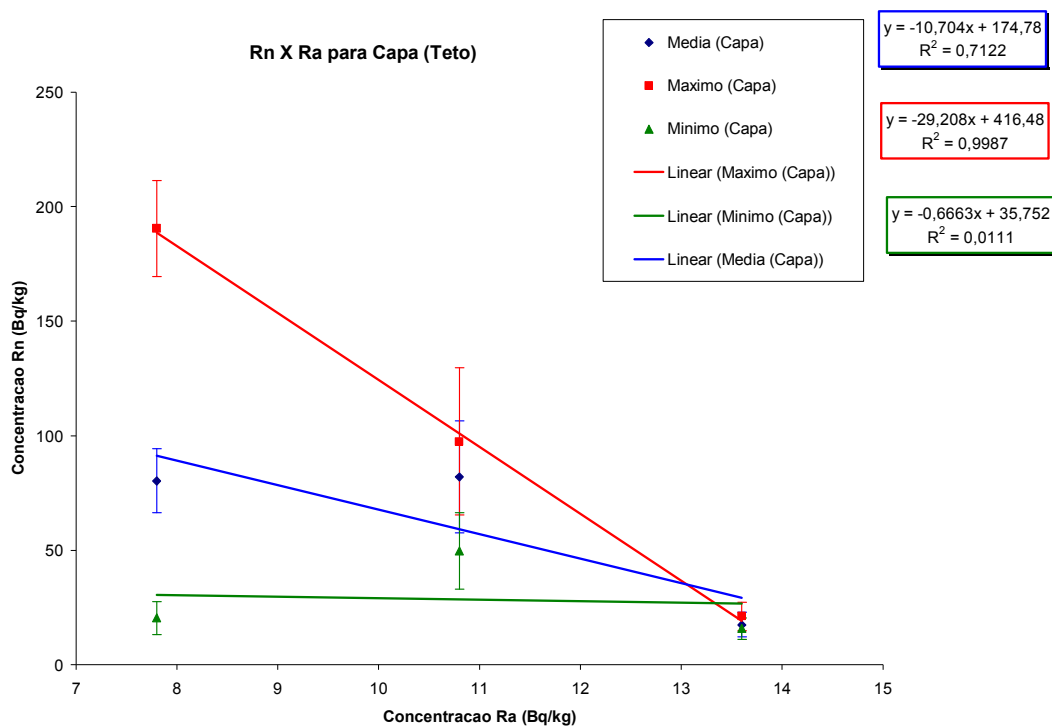


Figura 30 - Concentração de Rn-222 no ar em função da concentração de Ra-226 das minas de carvão para a capa (teto).

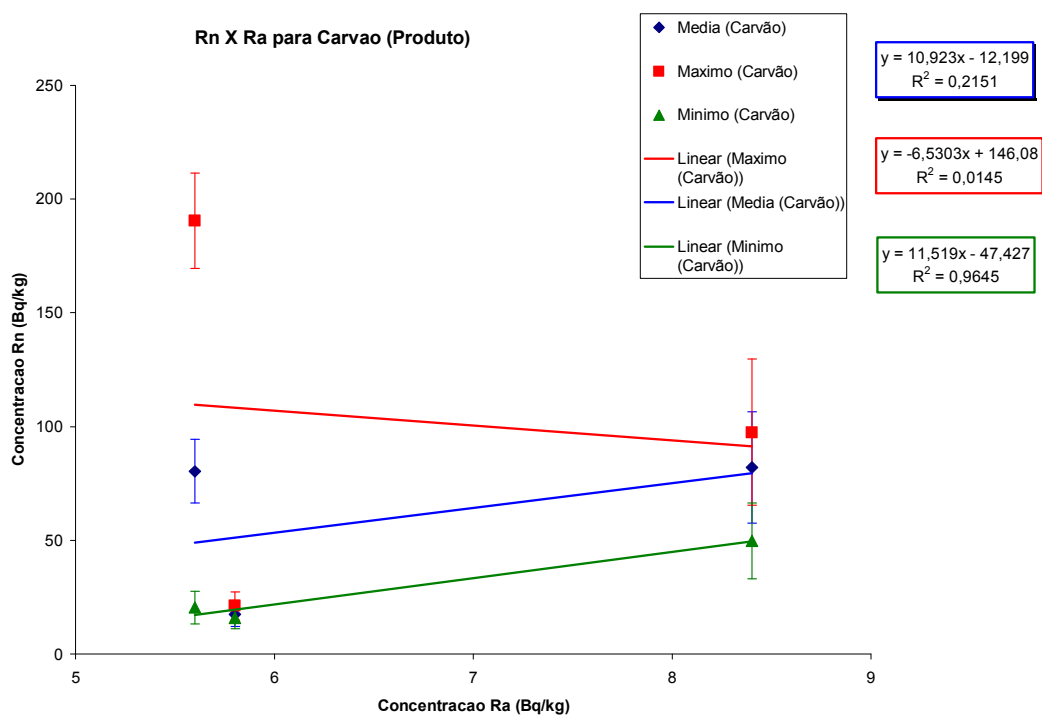


Figura 31 - Concentração de Rn-222 no ar em função da concentração de Ra-226 das minas de carvão para o carvão (produto).

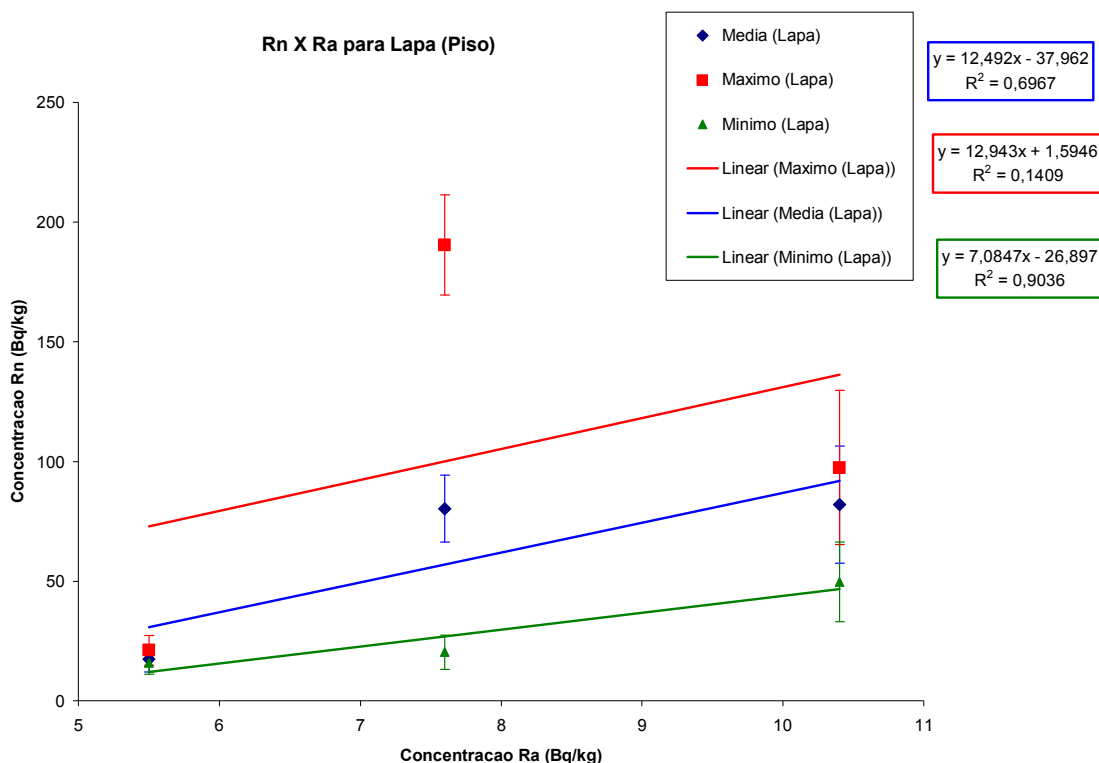


Figura 32 - Concentração de Rn-222 no ar em função da concentração de Ra-226 das minas de carvão para a lapa (teto).

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 25 e nas Figuras 30, 31 e 32, que a concentração de Ra-226 das rochas que compõem a capa (teto) não apresenta correlação alguma entre a concentração de radônio no ar, pois as retas de tendência apresentam inclinação negativa e  $R^2$  (coeficiente de correlação) menor e muito menor que 1 (0,7 e 0,01) para os valores médio e mínimo, respectivamente. Todavia para os valores máximos foi observado uma anti-correlação de 0,99, para a capa (teto).

A concentração de Ra-226 no carvão (produto) apresenta correlação entre a concentração de radônio no ar, para os valores mínimos, pois a reta de tendência apresenta inclinação positiva e  $R^2$  (coeficientes de correlação) está bem próximo de 1 (0,96). Já a concentração de rádio no carvão não apresenta correlação alguma com os valores médio e máximo das concentrações de Rn-222 no ar, pois a reta de tendência apresenta inclinação negativa, para o valor máximo, e  $R^2$  apresenta valor muito menor que 1 (0,21), para o valor médio.

A concentração de Ra-226 nas rochas que compõem a lapa (pisos) apresenta correlação entre a concentração de radônio no ar, para os valores mínimos, pois a reta de tendência apresenta inclinação positiva e  $R^2$  (coeficiente de correlação) é próximo a 1 (0,90). Já a concentração de rádio das rochas que compõe a lapa (pisos) não apresenta correlação alguma com os valores médio e máximo das concentrações de Rn-222 no ar, pois  $R^2$  apresenta valor muito menor que 1 (0,69 e 0,14), para os valores médio e máximo, respectivamente.

Essa falta de correlação era esperada, pois a concentração de Rn-222 no ar, nas minas de carvão, está muito abaixo dos limites aceitáveis internacionalmente ( $< 500 \text{ Bq/m}^3$ ). O valor máximo da concentração de Rn-222 no ar, entre as três minas de carvão, é de  $234,0 \text{ Bq/m}^3$  na mina MM. Além disso, as concentrações de Ra-226 nas rochas que compõem o ambiente mineiro, arenitos e siltitos, na capa e na lapa, e no carvão, são baixas.

Além disto, não se consegue alcançar o equilíbrio secular no interior da mina, tanto do rádio com o radônio como do radônio com seus filhos de meia-vida curta, pois o sistema de ventilação retira do ambiente mineiro o radônio exalado das rochas. Na ausência de equilíbrio secular, não é possível descrever o processo e estabelecer correlações em um ambiente caótico, como é o ambiente interno das minas subterrâneas

### 5.2.2 Relação entre Concentração de Radônio no Ar e Concentração de Rádio nas Rochas das Minas de Fluorita

Na Tabela 26, são apresentados os valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar, para primeira campanha (C1) e as concentrações de Ra-226, para cada tipo de rocha, granito normal (Gran. Nor.) e alterado (Gran. Mod.), e fluorita verde (Fluor. Vd.) e roxa (Fluor. Roxa.), das minas de fluorita, em Bq/kg.

Nas Figuras 33, 34, 35 e 36, são apresentados os gráficos dos valores máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar, em função da

concentração de rádio no granito normal, granito alterado, fluorita verde e fluorita escura das minas de fluorita, para a campanha 1, respectivamente.

Tabela 26 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222, no ar, e as concentrações de Ra-226, para cada tipo de rocha, das minas de fluorita, para a campanha 1.

Mina	Concentração Rn-222 no ar (Bq/kg)			Concentração Ra na rocha (Bq/kg)			
	Maximo	Mínimo	Médio	Granito Normal	Granito Alterado	Fluorita Verde	Fluorita Roxa
MF	5169,0	493,0	1784,0	11,5	0,9	0,09	3,6
NF	1255,0	2577,0	1664,0	21,2	14,6	2,2	3,5
RB	4293,0	1679,0	2512,0	19,3	76,1	1,5	3,5

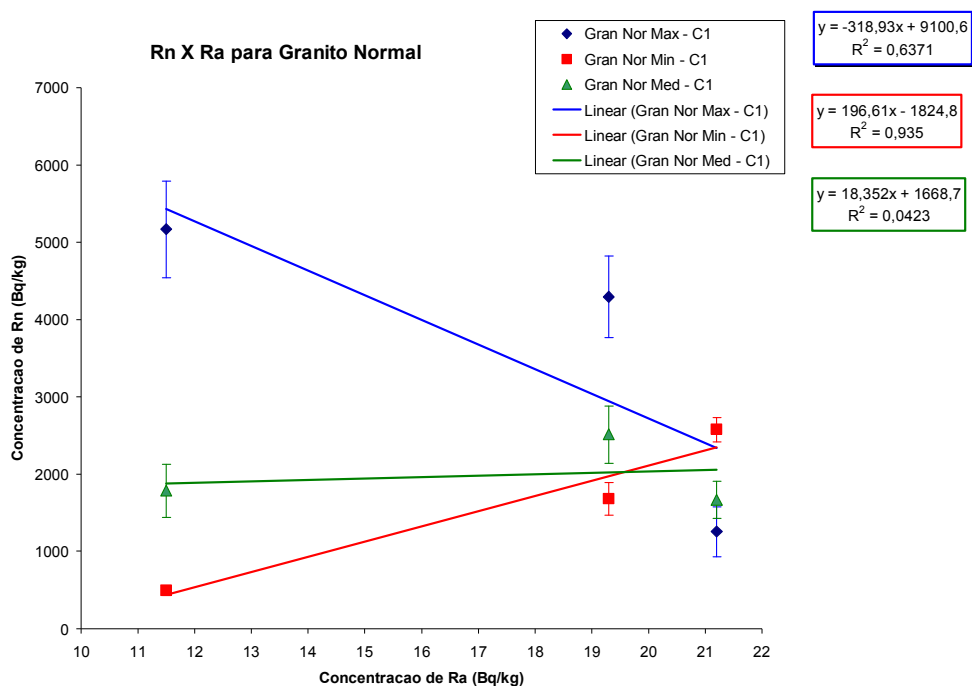


Figura 33 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar, em função da concentração de Rádio no granito normal, das minas de fluorita.

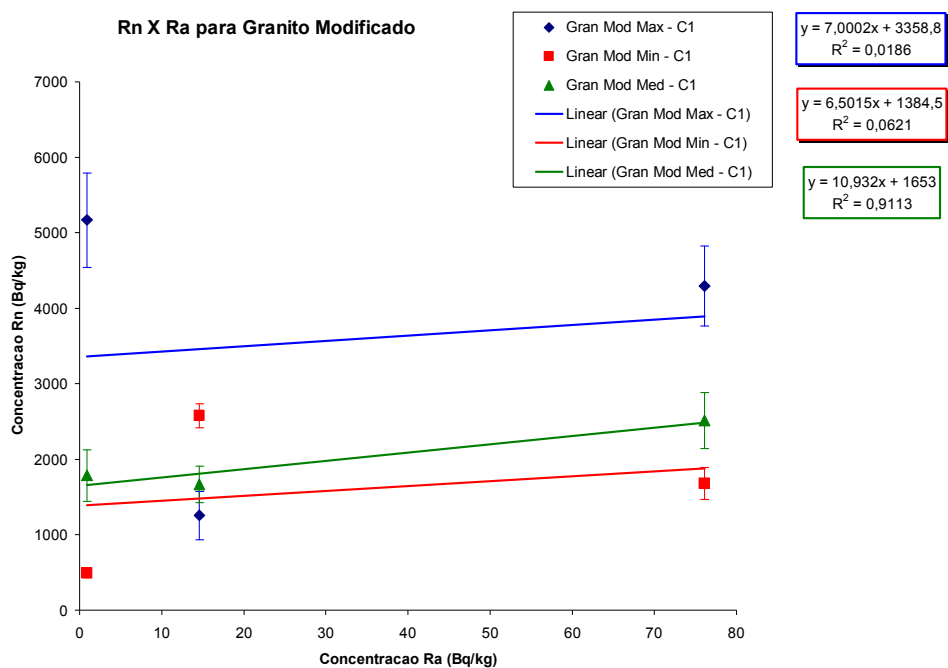


Figura 34 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar em função concentração de Rádío no granito alterado, das minas de fluorita.

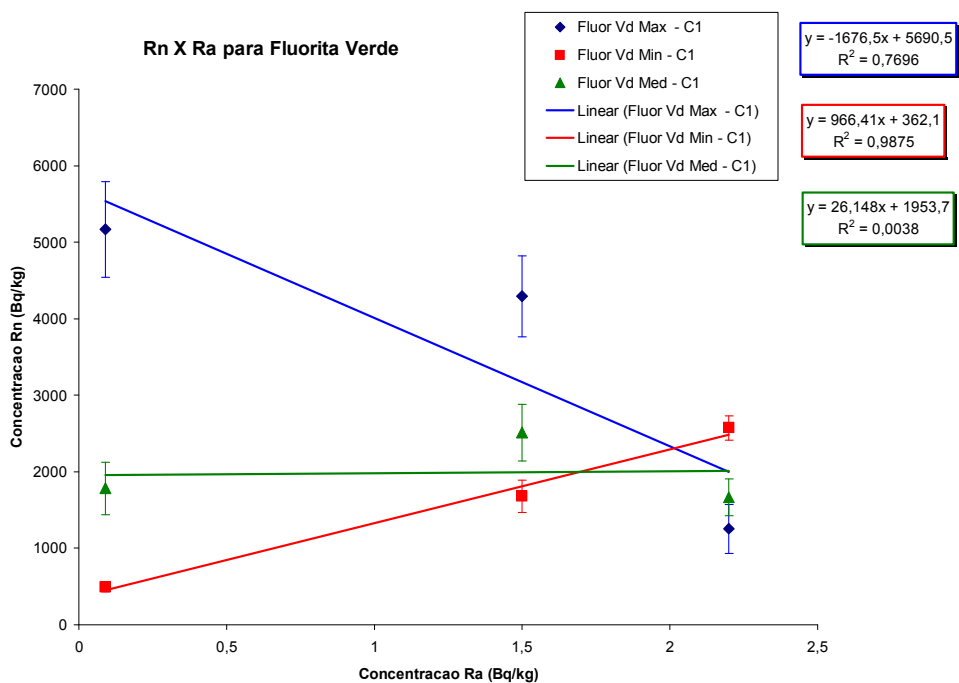


Figura 35 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar em função concentração de Rádío na fluorita verde, das minas de fluorita.



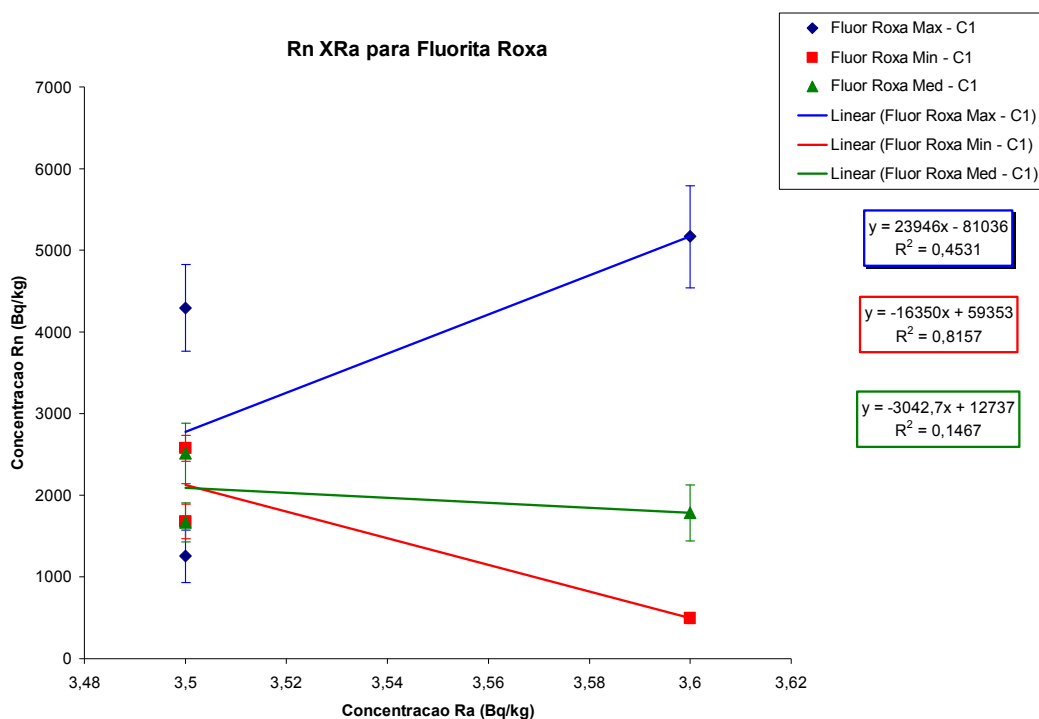


Figura 36 - Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar em função concentração de Rádío na fluorita roxa, das minas de fluorita.

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 26 e nas Figuras 33, 34, 35 e 36, que a concentração de Ra-226 do granito normal apresenta correlação entre a concentração de radônio no ar, para o valor mínimo, pois a reta de tendência apresenta inclinação positiva e  $R^2$  (coeficiente de correlação) é próximo de 1 (0,93). Já a concentração de rádio do granito normal não apresenta nenhuma correlação com os valores máximo e médio das concentrações de Rn-222 no ar, pois a reta de tendência apresenta inclinação negativa, para o valor máximo, e  $R^2$  apresenta valor muito menor que 1 (0,042), para o valor médio.

A concentração de Ra-226 do granito alterado apresenta tendência a uma correlação positiva com a concentração de radônio no ar, para o valor médio, pois a reta de tendência apresenta inclinação positiva e  $R^2$  (coeficiente de correlação) é próximo de 1 (0,91). Já a concentração de rádio do granito alterado não apresenta nenhuma correlação com os valores máximo e mínimo das concentrações de Rn-222 no ar, pois  $R^2$  apresenta valor muito menor que 1, para os valores máximo (0,018) e mínimo (0,062).

A concentração de Ra-226 da fluorita verde apresenta correlação com a concentração de radônio no ar, para o valor mínimo, pois a reta de tendência apresenta inclinação positiva e  $R^2$  é aproximadamente 1 (0,98). Já a concentração de Rádio da fluorita verde não apresenta correlação com os valores máximo e médio das concentrações de Rn-222 no ar, pois a reta de tendência apresenta inclinação negativa, para o valor máximo, e  $R^2$  apresenta valor muito menor que 1 (0,0038), para o valor médio.

A concentração de Ra-226 da fluorita roxa não apresenta correlação alguma entre a concentração de radônio no ar, para os valores máximo, mínimo e médio, pois a reta de tendência apresenta inclinação negativa, para os valores mínimo e médio e  $R^2$  apresenta valor muito menor que 1 (0,45), para o valor máximo.

Essa ausência de correlação entre as concentrações de radônio e de rádio era esperada, pois não se consegue atingir o equilíbrio secular no interior da mina, tanto do rádio com o radônio ou do radônio com seus filhos de meia-vida curta, pois o sistema de ventilação retira do ambiente mineiro o radônio exalado das rochas.

Os valores máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar são extremos e não são representativos, ou seja, temos como valor máximo 5169,0 Bq/kg, e mínimo 494,0 Bq/kg para a mina MF, por exemplo. Já o valor médio de 1784,0 Bq/kg é um valor intermediário e pode ser mais representativo para esse estudo.

Pensando deste modo, o granito alterado, que apresenta uma reta com inclinação positiva e  $R^2$  igual a 0,91, possui uma tendência de correlação entre o valor médio da concentração de Rn-222 no ar e de Ra-226 na rocha. Pode-se inferir, que o granito alterado contribui de forma mais significativa para o aumento da concentração de Rn-222 no ar, no interior da mina, que o granito normal e fluoritas verde e roxa. Isto pode explicar a alta concentração de Rn-222 no ar da mina RB, nas duas campanhas, pois o granito alterado apresenta maior concentração de rádio na rocha (76,0 Bq/kg) que as concentrações de rádio nas demais minas de fluorita, quais sejam, 0,9 Bq/kg para a mina MF e 14,6 Bq/kg para a mina NF.

Essa maior contribuição deve-se à própria modificação do granito por processos de intemperismo, os poros estão abertos, existem muitas fraturas e parte dos minerais, do granito, estão em processos de decomposição, chegando a se alterar em argilominerais, facilitando, assim, a exalação do radônio do granito alterado para o interior da mina.

### **5.3 Dose Efetiva e Risco Radiológico**

#### **5.3.1 Dose Efetiva e Risco Radiológico para as Minas de Carvão**

Na Tabela 27, são apresentados os valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar, em  $\text{Bq/m}^3$ , e os valores de dose efetiva e risco radiológico a que os trabalhadores mineiros estão expostos, calculados a partir das concentrações de Rn-222, para as minas de carvão. O fator de conversão de concentração de radônio em dose efetiva recomendado pelo UNSCEAR é de  $9 \text{ nSv}/(\text{Bq.h.m}^3)$  além de um fator de equilíbrio de 0,4 para ambientes internos. Foi considerado neste trabalho, uma exposição de 2.000 horas por ano para estimar as doses anuais dos trabalhadores em minas subterrâneas.

Tabela 27 - Valores da concentração de Rn-222 no ar, dose efetiva anual e risco radiológico, a que os trabalhadores estão expostos, para as minas de carvão.

<b>MI</b>					
<b>Valor</b>	<b>Detector (Ponto)</b>	<b>Concentração Rn (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Dose (nSv)</b>	<b>Dose anual (mSv/a)</b>	<b>Risco de Morte por Câncer</b>
<b>Máximo</b>	209 (4)	26,0	186984,0	0,19	4,7x10 <sup>-4</sup>
<b>Mínimo</b>	202 (5)	20,0	140040,0	0,14	3,5 x10 <sup>-4</sup>
<b>Médio</b>		21,0	154281,0	0,15	3,9 x10 <sup>-4</sup>
<b>MBI</b>					
<b>Máximo</b>	67 (4)	120,0	863064,0	0,86	22 x10 <sup>-4</sup>
<b>Mínimo</b>	64 (8)	61,00	439200,0	0,44	11 x10 <sup>-4</sup>
<b>Médio</b>		101,0	725904,0	0,73	18 x10 <sup>-4</sup>
<b>MM</b>					
<b>Máximo</b>	45 (3)	234,0	1686168,0	1,69	42 x10 <sup>-4</sup>
<b>Mínimo</b>	41 (8)	25,0	180720,0	0,18	4,5 x10 <sup>-4</sup>
<b>Médio</b>		99,0	711072,0	0,71	18 x10 <sup>-4</sup>

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 27, tomando por base os limites de dose efetiva anual apresentados nas Tabelas 11 e 12, que as doses efetivas anuais de trabalhadores das minas de carvão não estão acima do limite adotados no Brasil para indivíduos do público, qual seja, 1 mSv/ano.

Assim é que os trabalhadores da mina MI estão expostos a uma dose efetiva média de 0,15 mSv/a, e apresentam 0,039% de risco de câncer fatal após 50 anos de trabalho, nessas condições. Já os trabalhadores da mina MBI estão expostos a uma dose efetiva média de 0,73 mSv/a, e apresentam 0,18% de risco de câncer fatal, e os trabalhadores da mina MM estão expostos a uma dose efetiva média de 0,71 mSv/a, e apresentam 0,18% de risco de câncer fatal. Conforme CNEN (2005) a estimativa dos riscos de câncer, durante toda a vida, para indivíduos ocupacionalmente expostos e para a população inteira é  $5,6 \times 10^{-2}$  (5,6%) e  $7,3 \times 10^{-2}$  (7,3%) respectivamente.

### 5.3.2 Dose Efetiva e Risco Radiológico para as Minas de Fluorita

Na Tabela 28 são apresentados os valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar, em Bq/m<sup>3</sup>, das campanhas 1 e 2, e os valores de dose e risco radiológico, a que os trabalhadores estão expostos, calculados a partir das concentrações de Rn-222, para as minas de fluorita.

Tabela 28 - Valores da concentração de Rn-222 no ar, das campanhas 1 e 2, dose efetiva anual e risco radiológico, a que os trabalhadores estão expostos, para as minas de fluorita.

<b>MF - C1</b>					
<b>Valor</b>	<b>Detector (Ponto)</b>	<b>Concentração Rn (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Dose (nSv)</b>	<b>Dose Anual (mSv/a)</b>	<b>Risco de Morte por Câncer</b>
<b>Máximo</b>	170 (1)	6358,0	45775656,0	45,78	11x10 <sup>-2</sup>
<b>Mínimo</b>	173 (7)	606,0	4365936,0	4,37	1 x10 <sup>-2</sup>
<b>Médio</b>		2194,0	15798528,0	15,80	4 x10 <sup>-2</sup>
<b>MF - C2</b>					
<b>Máximo</b>	97 (1)	751,0	18933264,0	18,93	5 x10 <sup>-2</sup>
<b>Mínimo</b>	95 (8)	366,0	9213624,0	9,21	2 x10 <sup>-2</sup>
<b>Médio</b>		563,0	4055544,0	4,06	1 x10 <sup>-2</sup>
<b>NF - C1</b>					
<b>Máximo</b>	182 (6)	3169,0	22818816,0	22,82	3 x10 <sup>-2</sup>
<b>Mínimo</b>	208 (3)	1544,0	11117088,0	11,12	6 x10 <sup>-2</sup>
<b>Médio</b>		2047,0	14740734,0	14,74	4 x10 <sup>-2</sup>
<b>NF - C2</b>					
<b>Máximo</b>	106 (1)	2826,0	20348208,0	20,35	5 x10 <sup>-2</sup>
<b>Mínimo</b>	95 (7)	505,0	3636936,0	3,64	1 x10 <sup>-2</sup>
<b>Médio</b>		1122,0	8078482,0	8,08	2 x10 <sup>-2</sup>
<b>RB - C1</b>					
<b>Máximo</b>	184 (1)	5281,0	38021472,0	38,02	10 x10 <sup>-2</sup>
<b>Mínimo</b>	181 (5)	2066,0	14872392,0	14,87	4 x10 <sup>-2</sup>
<b>Médio</b>		3090,0	22245480,0	22,25	6 x10 <sup>-2</sup>
<b>RB - C2</b>					
<b>Máximo</b>	184 (7)	4094,0	29476512,0	29,48	7 x10 <sup>-2</sup>
<b>Mínimo</b>	182 (5)	1162,0	8369136,0	8,37	2 x10 <sup>-2</sup>
<b>Médio</b>		2414,0	17379023,0	17,38	4 x10 <sup>-2</sup>

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 28 e considerando o limite de dose efetiva anual, que representa um valor médio em 5 anos consecutivos, de 20 mSv para indivíduos ocupacionalmente expostos, e 1 mSv para indivíduos do público, que os trabalhadores em minas de fluorita devem ser considerados como indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE), o que de fato não ocorre.

Assim é que a mina MF apresenta dose efetiva média (15,80 mSv/ano para primeira campanha e 4,06 mSv/a para segunda campanha) acima dos valores estabelecidos para indivíduos do público, porém abaixo do limite estabelecido para indivíduos ocupacionalmente expostos, IOE.

Para a mina NF a dose efetiva média (14,74 mSv/ano para a primeira campanha e 8,08 mSv/ano para a segunda campanha) apresenta valores acima do limite estabelecido para indivíduos do público, porém abaixo do limite estabelecido para indivíduos ocupacionalmente expostos, IOE.

Para a mina RB a dose efetiva média (22,25 mSv/ano) para a primeira campanha apresenta valores acima dos limites para indivíduos do público e para indivíduos ocupacionalmente expostos. Porém, a dose efetiva média (17,28 mSv/ano) para a segunda campanha apresenta valores acima dos limites aceitáveis internacionalmente e estabelecidos pela CNEN, para indivíduos do público, porém abaixo do limite estabelecido para IOE.

Todas as minas de fluorita apresentam valores de dose efetiva anual acima dos limites adotados no Brasil e aceitos internacionalmente para indivíduos do público.

Os trabalhadores da mina MF, conforme valores médios da segunda campanha, estão expostos a uma dose efetiva média de 4,06 mSv/a, e apresentam 1% de risco de câncer fatal após 50 anos de trabalho, nessas condições. Já os trabalhadores da mina NF, conforme valores médios da segunda campanha, estão expostos a uma dose efetiva média de 8,08 mSv/a, correspondendo a 2% de risco de câncer fatal, e os trabalhadores da mina RB, conforme valores médios da segunda campanha, estão expostos a uma dose efetiva média de 17,38 mSv/a,

correspondendo a uma probabilidade de 4,3 % de risco de câncer mortal após 50 anos de trabalho nessas condições. Cabe observar que, ainda de acordo com dados do ICRP-60, riscos máximos de morte por câncer para indivíduos ocupacionalmente expostos ( $4 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ ) e submetidos a uma dose efetiva de 20 mSv/a durante 50 anos, bem como para a população em geral ( $5 \cdot 10^{-2}/\text{Sv}$ ) exposta a uma dose efetiva de 1 mSv/a durante 50 anos são de  $4 \times 10^{-2}$  (4%) e  $2,5 \times 10^{-3}$  (0,25%), respectivamente.

O fato dos níveis de dose devido à inalação de radônio estarem acima dos preconizados para indivíduos do público implica na necessidade de tomada de providências para (i) considerar os trabalhadores de minas subterrâneas de fluorita como indivíduos ocupacionalmente expostos ou (ii) baixar os níveis de dose para 1mSv/a.

A primeira opção implica no atendimento aos requisitos de proteção radiológica estabelecidos pela CNEN, os quais abrangem a elaboração e implementação de procedimentos de segurança e proteção radiológica que incluem treinamento específico, estimativas de doses em condições normais e controle médico dos trabalhadores mineiros, incluindo planejamento médico em caso de acidentes, bem como monitoração de áreas e demonstração da otimização da proteção radiológica.

A redução dos níveis de radônio em função da melhoria do sistema de ventilação das minas de fluorita permite que considerações de custo-benefício relacionadas à otimização da proteção radiológica sejam feitas.

Nesse sentido, foram estimados os custos anuais da energia elétrica para o funcionamento dos exaustores das minas de fluorita durante a primeira e segunda campanha e os correspondentes detrimientos, ou seja, os danos esperados em função da dose de radiação resultante, expressos em valores monetários, conforme mostrado na Tabela 29. Os custos de aquisição e instalação dos exaustores não foram considerados nesta avaliação, por não terem sido disponibilizados.

A Tabela 30 apresenta uma avaliação simplificada do processo de análise custo benefício, em função dos dados disponíveis.

Tabela 29 - Avaliação de Custos Anuais de Operação do Sistema de Ventilação e do Correspondente Detrimento

MINAS DE FLUORITA	CUSTO ANUAL DE OPERAÇÃO DA VENTILAÇÃO (REAIS)	DOSE ANUAL (mSv)	NÚMERO DE TRABALHADORES	CUSTO DO DETRIIMENTO (REAIS)
<b>MF:</b> <b>1ª</b> <b>Campanha</b>	75HP x 746W x 2000h x $10^{-6}$ W/MW x R\$600,00/MWh = R\$ 67.140,00	15,8	46	46 pessoas x 0,0158 Sv x US\$ 20.000,00 pessoa.Sv x 2 R\$/US\$ = R\$29.072,00
<b>MF:</b> <b>2ª</b> <b>Campanha</b>	90HP x 746W x 2000h x $10^{-6}$ x W/MW x R\$ 600,00/MWh =R\$ 80.568,00	4,0	46	46 pessoas x 0,004 Sv x US\$ 20.000,00 pessoa.Sv x 2 R\$/US\$ = R\$ 7.360,00
<b>NF:</b> <b>1ª</b> <b>Campanha</b>	100HP x 746W x 2000h x $10^{-6}$ W/MW x R\$ 600,00/MWh =R\$ 89.520,00	14,7	58	58 pessoas x 0,0147 Sv x US\$ 20.000,00 pessoa.Sv x 2 R\$/US\$ = R\$ 34.104,00
<b>NF:</b> <b>2ª</b> <b>Campanha</b>	137HP x 746W x 2000h x $10^{-6}$ x R\$ 600,00/MWh =R\$ 122.642,40	8,1	58	58 pessoas x 0,0081 Sv x US\$ 20.000,00 pessoa.Sv x 2 R\$/US\$ =R\$ 18.792,00
<b>RB:</b> <b>1ª</b> <b>Campanha</b>	92HP x 746W x 2000h x $10^{-6}$ W/MW x R\$ 600,00/MWh =R\$ 82.358,40	22,3	56	56 pessoas x 0,0223 Sv x US\$ 20.000,00 pessoa.Sv x 2 R\$/US\$ = R\$ 49.952,00
<b>RB:</b> <b>2ª</b> <b>Campanha</b>	142HP x 746W x 2000h x $10^{-6}$ W/MW x R\$ 600,00/MWh =R\$ 127.118,40	17,3	56	56 pessoas x 0,0173 Sv x US\$ 20.000,00 pessoa.Sv x 2 R\$/US\$ = R\$ 38.752,00



Tabela 30 - Avaliação Custo Benefício

<b>MINAS DE FLUORITA</b>	<b>CUSTO ANUAL DA OPERAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO (X) (REAIS)</b>	<b>CUSTO DO DETRIIMENTO (Y) (REAIS)</b>	<b>(X + Y) (REAIS)</b>
<b>MF - C1</b>	R\$ 67.140,00	R\$29.072,00	R\$96.212,00
<b>MF - C2</b>	R\$ 80.568,00	R\$ 7.360,00	R\$87.928,00
<b>NF - C1</b>	R\$ 89.520,00	R\$ 34.104,00	R\$ 123.624,00
<b>NF - C2</b>	R\$ 122.642,40	R\$ 18.792,00	R\$ 141.434,40
<b>RB - C1</b>	R\$ 82.358,40	R\$ 49.952,00	R\$132.310,40
<b>RB - C2</b>	R\$ 127.118,40	R\$ 38.752,00	R\$165.870,00

Pode ser observado na Tabela 30 que, caso os trabalhadores mineiros venham a ser considerados indivíduos ocupacionalmente expostos, uma primeira avaliação de custo benefício leva à conclusão que o gasto adicional com o sistema de ventilação (segunda campanha) na mina MF foi justificado, uma vez que a soma custo (X) + detrimento (Y) diminuiu, restando avaliar o custo de ventilação adicional e a dose correspondente que torna essa soma mínima, maximizando o benefício.

Por outro lado, nas minas NF e RB, o investimento feito em ventilação (segunda campanha) foi superior ao que seria requerido pelo princípio da otimização da proteção radiológica, uma vez que a soma (X + Y) aumentou, ou seja, o benefício líquido diminuiu.

Finalmente, para que os trabalhadores mineiros sejam considerados indivíduos do público para fins de exposição à radiação ionizante, novos investimentos no sistema de ventilação das minas de fluorita devem ser feitos de modo a assegurar doses anuais que não ultrapassem 1 mSv.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As minas de carvão apresentam valores de concentração de radônio no ar baixos, inferiores a  $500 \text{ Bq/ m}^3$  e não requerem ações protetoras. Isto pode ser explicado pelo fato que o urânio não tem associação geoquímica direta com o carvão. As baixas concentrações de rádio nas rochas (arenitos e siltitos na capa e na lapa) e no carvão que compõem o ambiente mineiro, ratificam essa afirmativa. Além disso, a eficiência da ventilação normalmente requerida em função da presença de metano, gás combustível contribui para a redução das concentrações eventuais de radônio no ambiente mineiro.

As concentrações de Ra-226 das rochas que compõe a capa e a lapa, bem como o carvão (produto) não apresentam correlação alguma com a concentração de radônio no ar. Essa falta de correlação é esperada porque não se consegue atingir o equilíbrio secular no interior da mina, ou do rádio com o radônio ou do radônio com seus filhos de meia-vida curta, pois o eficiente sistema de ventilação retira do ambiente mineiro o radônio exalado das rochas.

Os trabalhadores das minas de carvão estão expostos a uma dose efetiva média inferior a  $1 \text{ mSv/a}$ , limite estabelecido pela CNEN para indivíduos do público, correspondendo a 0,2% de risco de câncer fatal após 50 anos de trabalho, nessas condições.

A mina RB, de fluorita, apresenta elevada concentração de radônio no ar e acima do intervalo de níveis de ação preconizado pelo ICRP 65, para as duas campanhas. Isso pode ser explicado pela ineficiência da ventilação e pelo grande número de explosões, já que as concentrações de rádio nas rochas (granito normal

e alterado) e nos minerais (fluorita verde e roxa) que compõem o ambiente mineiro são baixas.

Na mina RB, houve uma diminuição dos valores da concentração de Rn-222 no ar entre as duas campanhas, o valor médio da concentração de radônio no ar passou de 3090,0 Bq/m<sup>3</sup> para 2414,0 Bq/m<sup>3</sup>, mas permanecendo acima do intervalo de concentração de Rn-222 no ar preconizado pelo ICRP 65 para níveis de ação. Neste caso, será necessário o emprego de ações protetoras.

A mina NF, de fluorita, apresenta valores de concentração de radônio no ar elevados e acima do intervalo de níveis de ação preconizado pelo ICRP 65 para as duas campanhas. Isso pode ser explicado pela ineficiência da ventilação e pelo número elevado de explosões, uma vez que as concentrações de rádio nas rochas (granito normal e alterado) e nos minerais (fluorita verde e roxa) que compõe o ambiente mineiro são baixas.

Na mina NF houve uma diminuição dos valores da concentração de Rn-222 no ar, entre as duas campanhas, o valor médio da concentração de radônio no ar passou de 2047,0 Bq/m<sup>3</sup> para 1122,0 Bq/m<sup>3</sup>, valor este que ainda demanda avaliação sobre a necessidade de implantação de ações protetoras.

Na mina MF de fluorita, houve uma diminuição dos valores da concentração de Rn-222 no ar, entre as duas campanhas, sendo que o valor médio da concentração de radônio no ar passou de cerca de 2194,0 Bq/m<sup>3</sup> para 563,0 Bq/m<sup>3</sup>, em função do aprimoramento do sistema de ventilação ocorrido. Todos os pontos apresentaram valores entre 500 e 1500 Bq/m<sup>3</sup>, dentro do intervalo estabelecido para tomada de decisão quanto à necessidade de implantação de ações protetoras.

Para as mina RB e NF, no entanto, as modificações feitas na ventilação, motivo da diferença entre as duas campanhas, não foram suficientes para reduzir a concentração de radônio no ar para valores aceitáveis internacionalmente, sendo necessário o emprego de ações protetoras.

As explosões têm grande importância para o aumento da concentração de radônio no ar no ambiente mineiro. O intervalo médio de tempo decorrido entre a

explosão e o aparecimento dos picos de concentração de radônio no ar foi em torno de 1,5 horas, essa defasagem entre momento da explosão e surgimento do pico ocorre porque se necessita algum tempo para que sejam geradas condições diferentes no ambiente que impliquem em mudanças perceptíveis pelo detector.

As concentrações de Ra-226 do granito normal, da fluorita verde e da fluorita roxa não apresentam correlação alguma com os valores das concentrações de Rn-222 no ar, porém, a concentração de Ra-226 do granito alterado apresenta tendência a uma correlação positiva com a concentração de radônio no ar, para o valor médio.

O granito alterado contribui de forma mais significativa para o aumento da concentração de Rn-222 no ar, no interior da mina, do que as demais rochas, ou seja, granito normal e fluoritas verde e roxa. Essa maior contribuição deve-se à própria modificação do granito por processos de intemperismo, os poros estão abertos, existem muitas fraturas e parte dos minerais, do granito, estão em processos de decomposição, chegando a se alterar em argilominerais, facilitando, assim, a exalação do radônio do granito alterado.

Os trabalhadores das minas de fluorita estão expostos a uma dose efetiva anual média em torno de 12 mSv/a, correspondendo a 2,5% de risco de câncer fatal após 50 anos de trabalho. Nessas condições, essa dose é superior ao limite adotado no Brasil para indivíduos do público (1 mSv/a) e inferior ao limite anual estabelecido para indivíduos ocupacionalmente expostos (20 mSv/a).

Levando em conta o fato que os trabalhadores em mineração convencional não são presentemente considerados como indivíduos ocupacionalmente expostos à radiação ionizante, faz-se necessário o emprego de ações protetoras para reduzir a dose efetiva a valores inferiores ao limite estabelecido pela CNEN para indivíduos do público.

Alternativamente, pode-se optar pela classificação dos trabalhadores em mineração como indivíduos ocupacionalmente expostos, o que implica no cumprimento de todos os requisitos estabelecidos na Norma CNEN-NN-3.01 (2005). Adicionalmente, deve ser realizado um estudo para demonstrar, por meio de análise

custo benefício, a necessidade ou não de aumentar a potência do sistema de ventilação para reduzir ainda mais as doses a que os trabalhadores mineiros estão submetidos, de modo a maximizar o benefício.

Finalmente, para melhor compreender os processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas, pode-se sugerir a obtenção de um maior número de amostras de rochas para estabelecer uma avaliação mais representativa dos teores de radionuclídeos nessas rochas (U-238 e Ra-226) e sua relação com a concentração de radônio no ar. Além disso, deve ser conduzido um estudo mais abrangente sobre a influência das explosões no aumento da concentração de radônio, bem como sobre o comportamento do radônio em zonas de falhas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Jarad, F. A. (1988) *Application of nuclear track detectors for radon related measurements*, Nuclear Tracks Radiation Measurement, vol. 15, pp. 525-534.
- Aldenkamp, F. J., Stoop, P. (1994) *Sources and transport of indoor radon – Measurements and Mechanisms* – Thesis of environmental radioactivity research group at the KVI.
- Barroso, S. L. C., Beijo, P. C., Hadler, J. C., Iunes, P. J., Paulo, S. R. Shibuya, E. H. e Tello, C. A. (1993) *O Uso de um Fotomicrodensitômetro de Alta Resolução em Física Nuclear, Dois Exemplos*, Proceedings do Simpósio Técnicas Experimentais em Física, Publicação nº 86 da Academia de Ciências do Estado de São Paulo, pp. 321-331. São Paulo, SP.
- Cohen, B. L. (1980) *Health effects of radon from insulating buildings*, Health Physics, vol. 39, pp. 937-941.
- Cohen, B. L. (1992) *Compilation and integration of studies of radon levels in U. S homes by states and counties*. Critical Rev. Environmental Control, vol. 23, 243-364.
- Cohen, B. L. (1993) *Relationship between exposure to radon and various types of cancer*, Health Physics, vol. 65, 529-531.
- Cohen, B. L. (1995) *Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products*, Health Physics, vol. 68, 157-174.
- Cohen, B. S. and Cohen, E. S. (1983) *Theory and practice of radon monitoring with charcoal adsorption*, Health Physics, vol. 45, pp. 501-508.
- Cole, J., Green, M. H. L., Bridges, B. A., Waugh, A. P. W., Beare, D. M., Hanshaw, D., Last, R. Liu, Y. and Cortopassi, G. (1996) *Lack of evidence for an association between the frequency of mutants or translocations in circulating lymphocytes and the exposure to radon gas in the home*, Radiation Research, vol. 145, 61-69.
- COMISSAO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN (2005). *Diretrizes básicas de proteção radiológica*. Norma CNEN-NN-3.01.

- Dardenne, M. A. e Savi, C. N. (1994) *Geologia e geoquímica dos filões de fluorita Segunda Linha Torrens e Cocal (SC)*. Revista Brasileira de Geoquímica, vol. 14(2), pp 120-127.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, DNPM (1985) *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, vol. I, Brasília.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, DNPM (1997) *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, vol. IV, Brasília.
- Dorschel, B. and Piesch, E. (1993) *A new approach to estimating the equilibrium factor between radon and its daughters*, Radiation Protection Dosimetry, vol. 48, pp.145-151.
- Durrani, S. A. (1993) *Radon as a health hazard at home: what are the facts?*, Nuclear Tracks Radiation Measurement, vol 22, 303-317.
- Enge, W. (1980) *Introduction to plastic track detectors*. Nuclear Tracks, vol. 4, pp. 283-308, Pergamon Press, Great Britain.
- Foreman, N. K., Thorne, R., Berry, P. J., Oakhill, A., and Mott, M. G. (1994) *Childhood malignancies in the South-West region of England, 1976-1985*, Med. Pediatr. Oncol., vol. 23, 14-19.
- Frank, A. L., and Benton, E. V. (1977) *Radon dosimetry using nuclear track detectors*. Nuclear Track Detection, vol. 1, n° 3/4, pp. 149-179. Pergamon Press.
- Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE. (1996) *Levantamento de Recursos Naturais*. Vol. 33. Rio de Janeiro.
- Godoy, J. M., Schüttelkopf, H. (1987) *Considerations about the Ra-226 gross alpha counting determination*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol.111, n° 2, pp. 329-335.
- Hadler, J. C. e Paulo, S. R. (1994) *Indoor Radon Daughters Contamination Monitoring: the Absolute Efficiency of CR-39 Taking into Account the Plate-out Effect and Environmental Conditions*, Radiation Protection Dosimetry, vol. 51, n° 51, pp. 283-296.
- Hashemi-Nezhad, S. and Peak, L. S. (1993) *Measurement of plate-out rates of Rn-222 daughters in laboratory conditions: implications for radon dosimetry*, Nuclear Tracks Radiation Measurement, vol. 21, pp. 225-234.
- Henshaw, D. L. (1993) *Radon Exposure in the home: its occurrence and possible health effects*, Contemporary Physics, vol. 34, 31-48.
- Hess, C. T., Michel, J., Horto, T. R., Prichard, H. M., Coniglio, W. A. (1985) *The Occurrence of Radioactivity in Public Water Supplies in the United States*. Health Physics, vol. 48, pp.553-586.

- Ilić, R. (1989) *Damage track detectors for alpha particle registration track formation and detector processing*. Proceedings of the International Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental Radioactivity and Earth Sciences, ICTP, Trieste, Italy, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, pp. 133-144.
- Inceöz, M., Baykara, O., Aksoy, E., Doğru, M. (2006) *Measurements of soil gas radon in active fault systems: A case study along the North and East Anatolian fault systems in Turkey*. Radiation Measurements, vol. 41, pp. 349-353. Pergamon Press.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA (1989) *Radiation Monitoring in the Mining and Milling of Radioactive Ores*. Report Safety Series n° 95, Vienna.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA (1996). *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Source*. Vienna.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA (2003). *Radiation protection against radon in workplaces other than mines*. Vienna.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ICRP (1991) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Publication No. 60. Pergamon Press, Oxford and New York.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ICRP (1993) *Protection Against Radon-222 at Home and Work*. Publication 65. Pergamon Press, Oxford and New York.
- Islam, G. S., Mazundar, S. C. and Ashraf, M. A. (1996) *Influence of various room parameters upon radon daughter equilibrium indoors*, Radiation Measurements, vol. 26, pp. 193-201.
- Jelinek, A. R., Bastos Neto, A. C., Rocha, F. F. N., Prado, M. (2006) *Geoquímica Isotópica do Sr no Distrito Fluorítico de Santa Catarina: Implicações na fonte dos fluidos mineralizantes de fluorita*. Revista Brasileira de Geociências, vol. 36(1), pp 147-154.
- Liu, S. C., Mcafee, J. R. (1984) *Radon-222 and tropospheric vertical transport*. Journal of Geophysical Research, vol. 89, n° D5, pp.7291-7297.
- Lowder, W. M. (1989) - "Natural Environmental Radioactivity and Radon Gas" – *Proceedings of the International Workshop on Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental Radioactivity and Earth Sciences*, ICTP, Trieste, Italy, April 3-14, 1989 – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. – pp. 1-17
- Lubin, J. H., Boice, J. D., Edling, C., Hornung, R. W., Howe, G., Kunz, E., Kusiak, R. A., Morrison, H. I., Radford, E. P., Samet, J. M., Tirmarche, M., Woodward, A., Xiang, Y. S. and Pierce, D. A. (1994) *Radon and Lung Cancer Risk: a Joint Analysis of 11 Underground Mines Studies*, US Department of Health and Human Services. Washington, DC.



- Magalhães, M. H. (1999) *Dinâmica do Radônio no Ar em Ambientes Tropicais*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Rio de Janeiro. 100 p.
- Marx, G. (1993) Risks of radioactivity, *Physics Education*, vol. 28, 121-125.
- Mishra, R., Orlando, C., Tomasino, L., Tonnarini, S. and Trevisi, R. (2005) *A better understanding of the background of CR-39 detectors*. *Radiation Measurements*, vol. 40, pp. 325-328. Elsevier.
- National Research Council, Committee on the Biological effects of Ionizing Radiation (1988), *The health effects of radon and other internally deposited alpha-emitters (BEIR IV)*. National Academy Press, Washington, DC.
- NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, NCRP (1988) *Measurements of Radon and Radon Daughters in Air*, Report 97, NCRP Publications, New York, N.Y.
- Nazaroff, W. W. and Nero Jr., A. V. (1988) *Radon and its Decay Products in Indoor Air*, J. Wiley, New York.
- Neuberger, J. (1991) *Residential radon exposure and lung cancer: An overview of published studies*, *Cancer Detect. Prev.*, vol 15, 435-443.
- Nuclear Chemical Engineering. M. Benedict, T. Pigford e H. Levi. McGraw-Hill Book Company. 2° edição. 1981.
- Paulo, S. R. (1991) *Dosimetria ambiental de Rn-222 e filhos: Medida da eficiência absoluta do CR-39 levando-se em conta os efeitos do plate-out e fatores ambientais*, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- Pereira, J.F.A., Estrada, J.J.S., Binns, D.A.C. e Urban, M. (1983) *Técnica de Medida de Radônio no Ar Utilizando um Detector Plástico de Traços*. IRD/CNEN. RJ.
- Pershagen, G., Akerblom, G., Axelson, O., Clavnsjo, B. Damber, L., Desai, G., Enflo, A., Lagarde, F., Mellander, H., Svartengren, M. and Swedjemark, G. A. (1994) *Residential Radon Exposure and Lung Cancer in Sweden*, *New Eng. J. Med.*, vol. 330, 159-164.
- Pershagen, G., Liang Z. H., Hubrek, Z., Sensson, C. and Boyce Jr, J. D. (1992) *Residential radon exposure and lung cancer in Swedish women*, *Health Physics*, vol. 63, 179-186.
- Pörstendorfer, J. (1993) *Properties and behaviors of radon and thoron and their decay products in the air*. Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment. Published by the Commission of the European Communities.
- Read, C. (1990) *Linear link found between radon exposure and leukaemia*, *New Scientist*, 5 May, pp.32.

- Rio Doce, A. P. C. (1997) *Determinação da taxa de exalação de Rn-22 em materiais de construção*. Dissertação de mestrado apresentado na Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ-COPPE.
- Sallet, R. G. (1988) *Étude pétrologique et métallogénique d'un secteur du district à fluorine de Santa Catarina, Brésil. Les granitöides précambriens monzonitiques source probable de la fluorine filonienne post-jurassique*. Tese de Doutorado. Université de Paris.
- Savi, C. N. (1980) *Gênese e controle das mineralizações de fluorita da região de Crisciúma/SC*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 112 p.
- Tanner, A. B. (1978) *Radon migration in the ground: A supplementary review*, Natural Radiation Environment III, Symposium Proceeding, vol. 1, pp.5-56, Houston, Texas.
- Tolentino Junior, J. (1994) *Estudo dos Níveis de Radônio e Exposição Externa em uma Mineração Subterrânea*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. 100 p.
- Tommasino, L. (1980) *The present state of track etch processes in radiation dosimetry*. Radiation Protection Dosimetry, Nuclear Technology Publishing, vol. 34, n°1/4, pp. 1-4.
- Tommasino, L., Cherouati, D. E., Seidel, J. L. and Monin, M. (1986) *A plastic-bag sampler for passive radon monitoring*. Radiation Measurement, vol. 12, pp. 681-684.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, UNSCEAR (1988) *Source, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, Report to the General Assembly, United Nations, New York.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, UNSCEAR (2000) *Source and Effects of Ionizing Radiation*, Report to the General Assembly, United Nations, New York.
- Walia, V., Virk, H. S., Bajwa, B. S., Sharma, N. (2003) *Relationships between radon anomalies and seismic parameters in N-W Himalaya, India*. Radiation Measurements, vol. 36, pp. 393-396. Pergamon Press.
- Wilkening, M. N., Clements, W. E. (1975) *Radon-222 from the Ocean Surface*, Journal Geophysics Research, vol. 80, pp. 328.
- Zamani, M. and Charalambous, P. (1981) *Registrations probability of alphas in cellulose nitrate*. Nuclear Tracks, vol. 4, pp. 177-185, Pergamon Press.

## ANEXO A: RESULTADOS OBTIDOS COM O DETECTOR DE MEDIDA INSTANTANEA DOSEMAN-PRO.

A Tabela 31 apresenta os valores da Concentração Equivalente de Equilíbrio (CEE), em Bq/m<sup>3</sup>, e de Dose, em µSv, encontrados com o detector *Doseman-Pro* para a sala de café.

Tabela 31 - Resultados obtidos com o detector Doseman-Pro, na Sala de Café da Mina RB.

Ponto/Data e Hora da Medida	CEE	DOSE	RESULTADOS	
<b>Mesa do Café</b>	<b>[Bq/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[µSv]</b>	<b>Tempo de Exposição [min]</b>	180
9/8/2006 12:28	31,59142	0,11859	<b>PAEC [nJ/m<sup>3</sup>]</b>	745,613
9/8/2006 12:48	69,23087	0,25988	<b>CEE [Bq/m<sup>3</sup>]</b>	132,4697
9/8/2006 13:08	107,2123	0,40245	<b>Exposição [Bq*h/m<sup>3</sup>]</b>	397,4089
9/8/2006 13:28	108,1147	0,40584	<b>Dose [µSv]</b>	4,47533
9/8/2006 13:48	146,864	0,55129		
9/8/2006 14:08	173,0743	0,64968		
9/8/2006 14:28	182,9844	0,68688		
9/8/2006 14:48	187,166	0,70257		
9/8/2006 15:08	185,9888	0,69816		

A Tabela 32 apresenta os resultados obtidos com o detector Doseman-Pro na frente de Lavra da mina RB, para a Concentração Equivalente de Equilíbrio (CEE), em  $\text{Bq/m}^3$ , para a Dose, em  $\mu\text{Sv}$ , e para a Concentração de Energia Alfa Potencial, CEAP, em  $\text{nJ/m}^3$ .

Tabela 32 - Resultados obtidos com o detector Doseman-Pro, na frente de Lavra da Mina RB.

<b>Frente de Lavra - Data e Hora da Medida</b>	<b>CEAP [nJ/m<sup>3</sup>]</b>	<b>CEE [Bq/m<sup>3</sup>]</b>	<b>EXPOSIÇÃO [Bq*h/m<sup>3</sup>]</b>	<b>DOSE [μSv]</b>
3/10/2007 09:09	0	0	0	0
3/10/2007 09:19	114,35	20,32	3,39	0,04
3/10/2007 09:29	466,88	82,95	13,82	0,16
3/10/2007 09:39	955,63	169,78	28,30	0,32
3/10/2007 09:49	1268,25	225,32	37,55	0,42
3/10/2007 09:59	1682,15	298,86	49,81	0,56
3/10/2007 10:09	1897,04	337,04	56,17	0,63
3/10/2007 10:19	2208,01	392,29	65,38	0,74
3/10/2007 10:29	2551,63	453,34	75,56	0,85
3/10/2007 10:39	2766,69	491,55	81,92	0,92
3/10/2007 10:49	3181,33	565,21	94,20	1,06
3/10/2007 10:59	3510,46	623,69	103,95	1,17
3/10/2007 11:09	4042,59	718,23	119,70	1,35
3/10/2007 11:19	4475,62	795,16	132,53	1,49
3/10/2007 11:29	4488,01	797,36	132,89	1,50
3/10/2007 11:39	4838,94	859,71	143,29	1,61
3/10/2007 11:49	5131,01	911,60	151,93	1,71
3/10/2007 11:59	5064,44	899,78	149,96	1,69
3/10/2007 12:09	5229,09	929,03	154,84	1,74
3/10/2007 12:19	5397,68	958,98	159,83	1,80

<b>Frente de Lavra - Data e Hora da Medida</b>	<b>CEAP [nJ/m³]</b>	<b>CEE [Bq/m³]</b>	<b>EXPOSIÇÃO [Bq*h/m³]</b>	<b>DOSE [µSv] (continuação)</b>
3/10/2007 12:29	5503,58	977,80	162,97	1,84
3/10/2007 12:39	5661,94	1005,93	167,66	1,89
3/10/2007 12:49	5741,75	1020,11	170,02	1,91
3/10/2007 12:59	5754,94	1022,45	170,41	1,92
3/10/2007 13:09	5689,63	1010,85	168,48	1,90
3/10/2007 13:19	5317,58	944,75	157,46	1,77
3/10/2007 13:29	5135,12	912,33	152,06	1,71
3/10/2007 13:39	5019,17	891,73	148,62	1,67
3/10/2007 13:49	5054,17	897,95	149,66	1,69
3/10/2007 13:59	5053,31	897,80	149,63	1,69
3/10/2007 14:09	5200,03	923,87	153,98	1,73
3/10/2007 14:19	5200,37	923,93	153,99	1,73
3/10/2007 14:29	5257,01	933,99	155,66	1,75
3/10/2007 14:39	5222,87	927,92	154,65	1,74
3/10/2007 14:49	5770,59	1025,23	170,87	1,92
3/10/2007 14:59	5708,25	1014,16	169,03	1,90
3/10/2007 15:09	6371,17	1131,94	188,66	2,12
3/10/2007 15:19	6578,52	1168,78	194,80	2,19
3/10/2007 15:29	6967,48	1237,88	206,31	2,32
3/10/2007 15:39	6913,30	1228,25	204,71	2,31
3/10/2007 15:49	6666,38	1184,39	197,40	2,22
3/10/2007 15:59	6356,61	1129,35	188,23	2,12
3/10/2007 16:09	6259,79	1112,15	185,36	2,09
3/10/2007 16:19	6313,17	1121,63	186,94	2,11
3/10/2007 16:29	6399,20	1136,92	189,49	2,13
3/10/2007 16:39	6609,24	1174,23	195,71	2,20

<b>Frente de Lavra - Data e Hora da Medida</b>	<b>CEAP [nJ/m³]</b>	<b>CEE [Bq/m³]</b>	<b>EXPOSIÇÃO [Bq*h/m³]</b>	<b>DOSE [µSv] (continuação)</b>
3/10/2007 16:49	6675,52	1186,01	197,67	2,23
3/10/2007 16:59	6584,06	1169,76	194,96	2,20
3/10/2007 17:09	6810,31	1209,96	201,66	2,27
3/10/2007 17:19	6819,10	1211,52	201,92	2,27
3/10/2007 17:29	6776,62	1203,97	200,66	2,26
3/10/2007 17:39	6985,57	1241,10	206,85	2,33
3/10/2007 17:49	6798,55	1207,87	201,31	2,27
3/10/2007 17:59	6866,77	1219,99	203,33	2,29
3/10/2007 18:09	6841,76	1215,55	202,59	2,28
3/10/2007 18:19	6948,12	1234,44	205,74	2,32
3/10/2007 18:29	6867,91	1220,19	203,37	2,29
3/10/2007 18:39	6668,95	1184,84	197,47	2,22
3/10/2007 18:49	6674,03	1185,75	197,62	2,23
3/10/2007 18:59	6508,36	1156,31	192,72	2,17
3/10/2007 19:09	6327,95	1124,26	187,38	2,11
3/10/2007 19:19	6333,38	1125,22	187,54	2,11
3/10/2007 19:29	6202,53	1101,98	183,66	2,07
3/10/2007 19:39	6291,76	1117,83	186,30	2,10
3/10/2007 19:49	6220,34	1105,14	184,19	2,07
3/10/2007 19:59	6205,15	1102,44	183,74	2,07
3/10/2007 20:09	6048,61	1074,63	179,10	2,02
3/10/2007 20:19	5798,45	1030,18	171,70	1,93
3/10/2007 20:29	5850,51	1039,43	173,24	1,95
3/10/2007 20:39	5656,81	1005,02	167,50	1,89
3/10/2007 20:49	5763,39	1023,96	170,66	1,92
3/10/2007 20:59	5629,52	1000,17	166,70	1,88

<b>Frente de Lavra - Data e Hora da Medida</b>	<b>CEAP [nJ/m³]</b>	<b>CEE [Bq/m³]</b>	<b>EXPOSIÇÃO [Bq*h/m³]</b>	<b>DOSE [µSv] (continuação)</b>
3/10/2007 21:09	6105,93	1084,81	180,80	2,04
3/10/2007 21:19	6667,70	1184,62	197,44	2,22
3/10/2007 21:29	7055,68	1253,55	208,93	2,35
3/10/2007 21:39	7319,32	1300,39	216,73	2,44
3/10/2007 21:49	7339,30	1303,94	217,32	2,45
3/10/2007 21:59	6920,89	1229,60	204,93	2,31
3/10/2007 22:09	6782,56	1205,03	200,84	2,26
3/10/2007 22:19	6759,44	1200,92	200,15	2,25
3/10/2007 22:29	6449,78	1145,90	190,98	2,15
3/10/2007 22:39	5992,49	1064,66	177,44	2,00
3/10/2007 22:49	5900,64	1048,34	174,72	1,97
3/10/2007 22:59	5531,55	982,77	163,79	1,84
3/10/2007 23:09	5610,45	996,78	166,13	1,87
3/10/2007 23:19	5274,13	937,03	156,17	1,76
3/10/2007 23:29	4997,70	887,92	147,99	1,67
3/10/2007 23:39	5040,92	895,60	149,27	1,68
3/10/2007 23:49	5253,18	933,31	155,55	1,75
3/10/2007 23:59	5879,63	1044,61	174,10	1,96
4/10/2007 00:09	5789,14	1028,53	171,42	1,93
4/10/2007 00:19	5938,49	1055,06	175,84	1,98
4/10/2007 00:29	5856,28	1040,46	173,41	1,95
4/10/2007 00:39	6057,58	1076,22	179,37	2,02
4/10/2007 00:49	5936,66	1054,74	175,79	1,98
4/10/2007 00:59	5793,36	1029,28	171,55	1,93
4/10/2007 01:09	5967,20	1060,17	176,69	1,99
4/10/2007 01:19	5811,41	1032,49	172,08	1,94

<b>Frente de Lavra - Data e Hora da Medida</b>	<b>CEAP [nJ/m³]</b>	<b>CEE [Bq/m³]</b>	<b>EXPOSIÇÃO [Bq*h/m³]</b>	<b>DOSE [µSv] (continuação)</b>
4/10/2007 01:29	5848,06	1039,00	173,17	1,95
4/10/2007 01:39	5777,50	1026,46	171,08	1,93
4/10/2007 01:49	5974,68	1061,50	176,92	1,99
4/10/2007 01:59	6016,42	1068,91	178,15	2,01
4/10/2007 02:09	6041,76	1073,41	178,90	2,01
4/10/2007 02:19	6155,54	1093,63	182,27	2,05
4/10/2007 02:29	6273,72	1114,62	185,77	2,09
4/10/2007 02:39	6061,17	1076,86	179,48	2,02
4/10/2007 02:49	6491,92	1153,39	192,23	2,16
4/10/2007 02:59	6591,37	1171,06	195,18	2,20
4/10/2007 03:09	6701,89	1190,70	198,45	2,23
4/10/2007 03:19	6474,05	1150,21	191,70	2,16
4/10/2007 03:29	6999,56	1243,58	207,26	2,33
4/10/2007 03:39	7234,26	1285,28	214,21	2,41
4/10/2007 03:49	7652,44	1359,57	226,60	2,55
4/10/2007 03:59	7792,31	1384,42	230,74	2,60
4/10/2007 04:09	8634,27	1534,01	255,67	2,88
4/10/2007 04:19	9069,41	1611,32	268,55	3,02
4/10/2007 04:29	9355,72	1662,19	277,03	3,12
4/10/2007 04:39	9762,71	1734,50	289,08	3,26
4/10/2007 04:49	9633,00	1711,45	285,24	3,21
4/10/2007 04:59	9804,16	1741,86	290,31	3,27
4/10/2007 05:09	10136,08	1800,83	300,14	3,38
4/10/2007 05:19	9422,62	1674,07	279,01	3,14
4/10/2007 05:29	9409,27	1671,70	278,62	3,14
4/10/2007 05:39	9228,35	1639,56	273,26	3,08



<b>Frente de Lavra - Data e Hora da Medida</b>	<b>CEAP [nJ/m³]</b>	<b>CEE [Bq/m³]</b>	<b>EXPOSIÇÃO [Bq*h/m³]</b>	<b>DOSE [µSv] (continuação)</b>
4/10/2007 05:49	8650,48	1536,89	256,15	2,88
4/10/2007 05:59	8359,55	1485,20	247,53	2,79
4/10/2007 06:09	8296,58	1474,02	245,67	2,77
4/10/2007 06:19	8048,47	1429,94	238,32	2,68
4/10/2007 06:29	7709,13	1369,65	228,27	2,57
4/10/2007 06:39	7306,19	1298,06	216,34	2,44
4/10/2007 06:49	7421,06	1318,47	219,74	2,47
4/10/2007 06:59	7224,78	1283,59	213,93	2,41
4/10/2007 07:09	7187,56	1276,98	212,83	2,40
4/10/2007 07:19	6856,72	1218,20	203,03	2,29
4/10/2007 07:29	6743,63	1198,11	199,68	2,25
4/10/2007 07:39	6922,43	1229,88	204,98	2,31
4/10/2007 07:49	6983,23	1240,68	206,78	2,33
4/10/2007 07:59	6804,37	1208,90	201,48	2,27
4/10/2007 08:09	6934,88	1232,09	205,35	2,31
4/10/2007 08:19	7030,05	1249,00	208,17	2,34
4/10/2007 08:29	7253,67	1288,73	214,79	2,42
4/10/2007 08:39	7436,87	1321,27	220,21	2,48
4/10/2007 08:49	7004,18	1244,40	207,40	2,34