Pesquisas em Geociências
GEOCIÊNCIAS
v. 51, nº 2 (2024)
doi.org/10.22456/1807-9806.135755

Artigo de Pesquisa

Determinação das Concentrações de Radônio e dos Processos de Enriquecimento em Minas Subterrâneas, de Fluorita e de Carvão, do Estado de Santa Catarina

Determination of enrichment processes and the concentrations of radon in underground mines of fluorite and coal in Santa Catarina state

Carlos Eduardo LIMA DOS SANTOS[1], *Rommulo Vieira CONCEIÇÃO*[1],
Daniel Triboli VIEIRA[1], *Maria Lidia VIGNOL-LELARGE*[1],
José Flavio MACACINI (In memorian)[2], *Ana Maria XAVIER*[3] & *Rodrigo Chaves RAMOS*[4]

[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências – Av. Bento Gonçalves nº 9500, CEP: 91501-970. Porto Alegre/Brasil/RS. E-mail: carlos.lima@ufrgs.br; rommulo.conceicao@ufrgs.br; daniel.triboli@ufrgs.br; lidia.vignol@ufrgs.br
[2]Laboratório de Poços de Caldas, Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento CNEN – Poços de Caldas/ MG. E-mail: macacini@cnen.gov.br
[3]Comissão Nacional de Energia Nuclear. Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43.322 — ILEA, CEP 91501-970, Porto Alegre/Brasil/RS. Email: axavier@cnen.gov.br
[4]Secretaria de Meio Ambiente e Preservação Ecológica, Prefeitura Municipal de Sapiranga., Av. João Correa, 808, CEP: 93800-222, Sapiranga/ Brasil/RS, E-mail: rodrigoramos@sapiranga.rs.gov.br

Resumo: Este trabalho apresenta a determinação das concentrações de Rn no ambiente de minas subterrâneas, visando ao estabelecimento de correlações entre as concentrações e as características geológicas das minas subterrâneas de fluorita e de carvão do Estado de Santa Catarina. Para a determinação da concentração de Rn, foram utilizados detectores de traços nucleares (Carbonato Diglicol Alílico CR-39). Foram instalados detectores passivos de Rn em locais de maior circulação de pessoas, tais como galerias, corredores de acesso, salas de reunião, almoxarifados, oficinas e *shafts*. As análises quali-quantitativas de radioatividade das rochas foram realizadas um sistema de espectrometria gama. Os resultados mostram que as minas de carvão apresentam baixos valores de concentração de Rn no ar (< 500 Bq/m^3) e não requerem ações protetoras. Isto pode ser explicado pelo fato que o U não tem associação geoquímica direta com o carvão. As baixas concentrações de Ra nas rochas (arenitos e siltitos na capa e na lapa) e no carvão ratificam essa hipótese. Além disso, a eficiência da ventilação normalmente requerida em função da presença de metano, gás combustível, contribui para a redução das concentrações eventuais de Rn no ambiente mineiro. As concentrações de Ra-226 das rochas que compõe a capa e a lapa, bem como do carvão, não apresentam correlação alguma com a concentração de Rn no ar. Essa falta de correlação é esperada porque não se consegue atingir o equilíbrio secular no interior da mina, pois o eficiente sistema de ventilação retira do ambiente mineiro o Rn exalado das rochas. As minas RB e NF, de fluorita, apresentam elevadas concentrações de Rn no ar, acima do intervalo de níveis de ação preconizado pela Agência Internacional de Energia Atômica. Já a mina MF, de fluorita, apresenta valores da concentração de Rn-222

Recebido: 09/2023
Aceito: 06/2024
Publicado: 06/2024

no ar entre 500 e 1500 Bq/m^3. 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 Rn no ar. No interior da mina, o granito alterado contribui de forma mais significativa para o aumento da concentração de Rn-222 no ar, quando comparado ao granito normal e à fluorita. Essa maior contribuição pode ser explicada pela alteração intempérica do granito, como fraturas e poros abertos, além da alteração de minerais primários, facilitando, assim, a exalação do Rn do granito alterado.

Palavras-chave: Radônio, Fluorita, Carvão, radioatividade, espectrometria gama.

Abstract: This work presents the determination of Rn concentrations in the environment of underground mines, aiming to establish correlations between the Rn concentrations and the geological characteristics of fluorite and coal underground mines in the State of Santa Catarina, Brazil. To determine the concentration of Rn, nuclear trace detectors (CR-39 Diglycol Allylic Carbonate) were used. Passive Rn detectors were installed in places with the greatest circulation of people such as galleries, access corridors, meeting rooms, storerooms, workshops, and shafts. The quali-quantitative analyses of radioactivity in the rocks were carried out using a gamma spectrometry system. The results show that coal mines have low values of Rn concentration in the air (< 500 Bq/m^3) and do not require protective actions. This can be explained by the fact that U has no direct geochemical association with coal. The low concentrations of Ra in the rocks (hanging wall and footwall sandstones and siltstones) and in the coal confirm this hypothesis. In addition, the efficiency of ventilation normally required due to the presence of methane, a combustible gas, contributes to the reduction of eventual concentrations of Rn in the mining environment. The concentrations of Ra-226 in the hanging wall and footwall rocks, as well as in the coal, do not show any correlation with the Rn concentration in the air. This lack of correlation is expected since it is not possible to achieve secular equilibrium inside the mine, since the efficient ventilation system removes the exhaled Rn and its progeny from the mining environment. The RB and NF fluorite mines have high concentrations of Rn in the air, which are above the recommended action levels as per the International Atomic Energy Agency. The MF fluorite mine presents a concentration of Rn-222 in the air between 500 and 1500 Bq/m^3. The Ra-226 concentrations of the normal granite, green fluorite, and purple fluorite, do not show any correlation with the Rn-222 concentrations in the air. However, the Ra-226 concentration in the altered granite shows a tendency towards a positive correlation with the concentration of Rn in the air. Inside the mine, the altered granite significantly contributes to the increase in the concentration of Rn-222 in the air, when compared with the normal granite and the fluorite. This higher contribution can be explained by the modification of the granite by weathering processes, such as open pores and fractures, and the alteration of primary minerals, thus facilitating the exhalation of Rn from the altered granite.

Keywords: Radon, Fluorite, Coal, radioactivity, gamma spectrometry.

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), rubídio (Rb-87), urânio (U-235 e U-238) e 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 (IAEA, 1996; 2003).

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 são escassos destacando-se os trabalhos de Santos *et al.,* (2014).

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 α 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 observados na população em geral (UNSCEAR, 2000; Pörstendorfer, 1993).

De acordo com a Comissão Nacional de Proteção Radiológica (NCRP, 1988), 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 frequentemente associada ao surgimento de neoplasias pulmonares (BEIR IV, 1988). 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.

A Agência Internacional de Energia Atômica recomenda o valor médio de 1500 Bq/m^3 para a tomada de ações remediadoras relacionadas à exposição crônica envolvendo radônio em ambientes de trabalho. Em ambientes de minas subterrâneas, concentrações de radônio inferiores a 500 Bq/m^3 são consideradas aceitáveis internacionalmente e concentrações superiores a 1500 Bq/m^3 requerem sempre medidas de proteção para os trabalhadores mineiros (IAEA, 1996; 2003).

Está a ser realizado um projeto sob a coordenação da Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, para estimar a concentração de Radônio em algumas dezenas de minas subterrâneas no país, a fim de estimar as doses de radiação a que os trabalhadores das minas estão expostos. Existem evidências estatísticas na literatura que suportam o facto de que a inalação de Radônio contribui para o desenvolvimento de cancro do pulmão devido aos seus produtos de decaimento emissores alfa que se depositam nos pulmões (Santos, 2008; Merola, 2017). Assim, o objetivo deste trabalho é averiguar se existe a necessidade de intervenção nas minas alvos do presente estudo bem como o estabelecimento de correlações entre os teores de radônio e as características geológicas das minas. O presente trabalho faz parte do já citado Projeto Radônio da CNEN e foi realizado em minas subterrâneas de carvão e flúor na região de Criciúma, Santa Catarina, Brasil na tentativa de obter as concentrações de Radônio em litologias constrastantes.

2. Área de Estudo

O trabalho tem como objetivo determinar a influência 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. A Figura 1 apresenta a localização das minas estudas**.**

2.1 Contexto Geológico

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.

Morfologicamente, estas jazidas possuem a forma de um arco com convexidade apontando para leste, mostrada na Figura 1. Seus limites sul-sudeste estão até o momento indeterminados. 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. Localmente, a Camada Irapuá tem sido objeto de lavra. A Camada Barro Branco possui espessuras médias de 1,60 m nas áreas mineradas. A Camada Bonito, mais espessa, mas com *grade* inferior ao Barro Branco, tem sido lavrada em subsuperfície 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.

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 à 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). Estratigraficamente, a camada Irapuá situa-se 9 m sob a 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, subordinadamente, siltitos e folhelhos (IBGE, 1996).

2.2 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. As áreas já exploradas e desativadas são lacradas, com paredes de alvenaria, para melhorar a circulação de ar limpo na frente de lavra.

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^3/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 escavada de 500 m x 1000 m, considerada uma mina pequena.

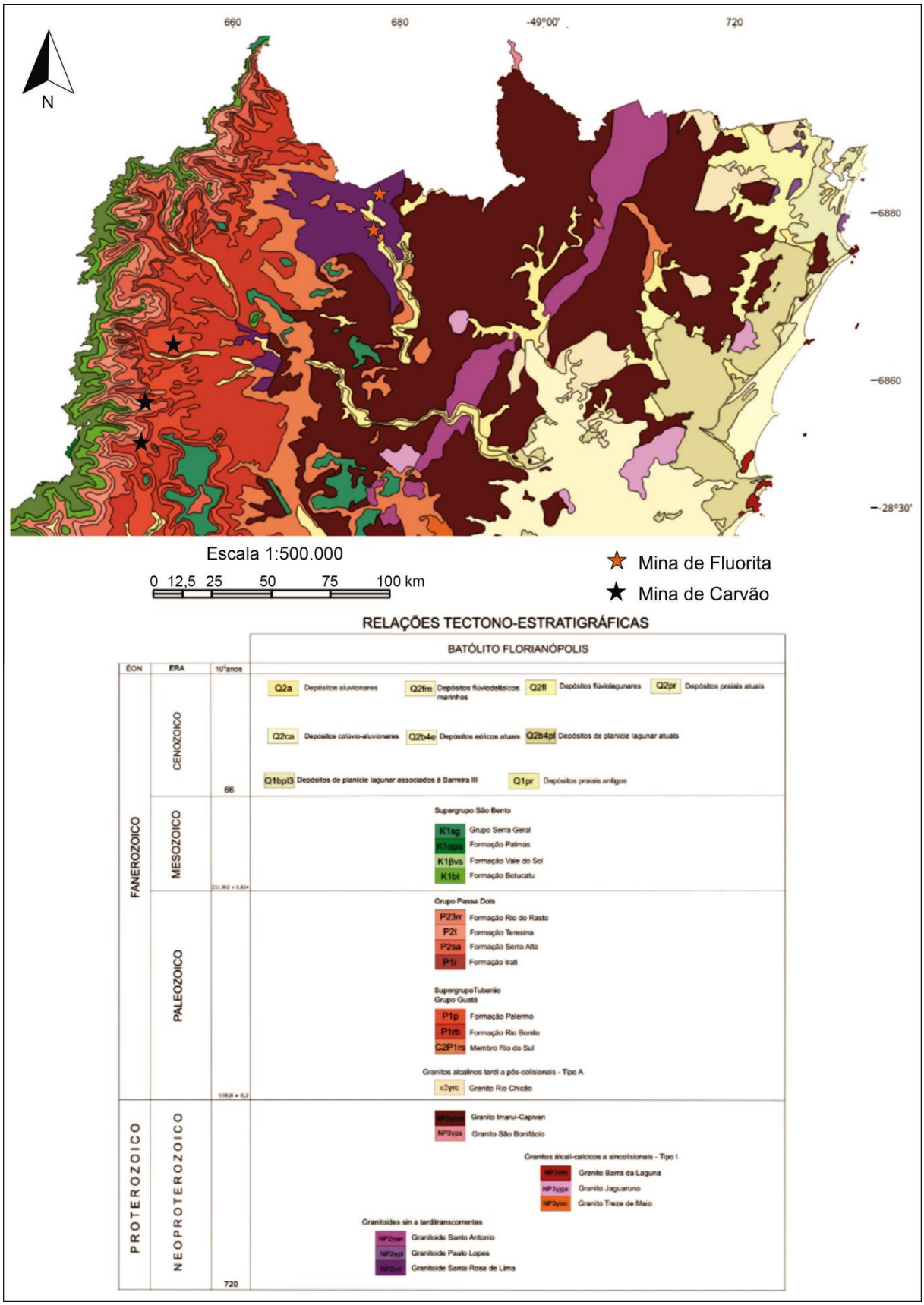

Figura 1. Mapa geológico simplificado da região de estudo mostrando a localização das minas foco deste estudo. Modificado de Parisi & Horn (2023).

Figure 1. Simplified geological map of the study region showing the location of the mines that are the focus of this study. Modified from Parisi & Horn (2023).

Na mina MM, a ventilação é feita por dois exaustores em paralelo, de 60 Hp e vazão de 1600 m^3/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 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^3/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 x 1800 m, considerada uma mina grande.

2.3 *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-Cretáceo. 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 1.

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.

As minas de fluorita selecionadas são da mesma empresa e utilizam o método de lavra Shrinkage stopping, método de lavra subterrâneo que consiste em deixar o minério quebrado temporariamente no realce ou *stope*, de forma a fornecer uma plataforma de trabalho durante as operações de lavra (Melo, 2014). As rochas encaixantes da fluorita são principalmente granitos e alguns diques de diabásio. As fluoritas apresentam coloração verde, amarela e roxa.

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.

3. Materiais e Métodos

3.1 Determinação da Concentração de Radônio no Ar

Os detectores específicos de radônio podem ser divididos em dois grandes grupos: passivos e ativos. Dispositivos passives em geral possuem um custo relativo mais baixo, não requerem energia elétrica e permitem períodos amostrais de até aproximadamente um ano. Neste método geralmente o radônio ou seus produtos de decaimento se aderem a eles e posteriormente serão analisados em um laboratório, sendo recomendos para uma avaliação da exposição a radioatividade em que se é necessária a integração temporal (Silva & Vasconcelos, 2021).

Para a determinação da concentração de radônio, foram utilizados detectores de traços nucleares (SSNTD), o Carbonato Diglicol Alílico, CR-39 (Columbia Resin, 1939) montados e fornecidos pelo Laboratório de Poços de Caldas - LAPOC/ CNEN.

Esse detector consiste essencialmente de pequenas câmaras circulares de ionização, contendo um ou mais filmes plásticos. O gás radônio penetra naturalmente na câmara e o decaimento do próprio Rn e de seus descendentes resulta em traços sub-microscópicos das partículas alfa no plástico. Esses traços são realçados por meio de um ataque químico, para o CR-39, para que possam ser contados em microscópio. A obtenção dos dados, dependendo das concentrações a serem determinadas, exige tempos de exposição que variam de 90 a 180 dias (Santos, 2008; Enge, 1980; Frank, 1977; Pereira, 1983).

Os detectores passivos de radônio foram instalados em galerias, corredores de acesso, salas de reunião e de café, almoxarifados, oficinas e *shafts*, locais estes de maior circulação de pessoas. O período de permanência dos detectores na mina foi estabelecido, para cada uma, pelos detectores temporizadores, que foram coletados

cerca de 20 dias após sua instalação e, depois de revelados e interpretados, permitiram inferir o tempo ideal de exposição dos demais detectores.

Após o período de exposição, os detectores CR-39 foram coletados e enviados para o Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O tratamento dos detectores tipo CR-39 foi feito através de um ataque químico com solução de hidróxido de potássio, KOH 30%, em banho térmico a 80°C, por 5,5 horas (Santos, 2008; Tommasino, 1980; Paulo, 1991; Mishra, 2005).

Com isso as lesões que se apresentam em tamanho muito reduzido, na escala de angstrons, passaram a ter após o ataque químico tamanho aproximado de alguns micrometros (µm), possibilitando a quantificação da densidade dos traços na superfície do detector em microscópio óptico comum (Tommasino, 1980; Mishra, 2005).

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^2.

Após o ataque químico os traços revelados no detector CR 39 foram contados. Feito a contagem dos traços nucleares, a densidade de traços e a concentração de radônio no ar foram calculadas conforme Santos (2008).

3.2 Análises Qualitativas e Quantitativas de Radioatividade

Para fins de abranger uma maior distribuição de amostragem 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 qualitativas e quantitativas de radioatividade as rochas foram pulverizadas e com massa de 100 g, conforme orientações do Laboratório de Radioanálise da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Essas análises foram feitas através de um sistema de espectrometria gama utilizando um cristal cilíndrico de NaI(Tl) com 4,5 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%.

3. Resultados e Discussões

3.1. Concentração de Radônio no Ar e Teores de Rádio nas Rochas das Minas de Carvão

Na Tabela 1, são identificados os pontos, os números dos detectores e sua localização, bem como os valores da densidade de traços, em traços/cm^2, e a concentração de radônio, em Bq/m^3, para as três minas subterrâneas de carvão, na região de Criciúma/SC. Também são apresentados os valores da radiação de fundo (BG) da concentração de Rn-222 no ar, medidos fora do ambiente mineiro. Os detectores

foram instalados a partir da frente de lavra, em direção à saída das minas. A incerteza da densidade de traços, Id, foi calculada da seguinte maneira (Equação 1):

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

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

Observou-se na análise dos resultados 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^3. Valores inferiores a 500 Bq/m^3 não requerem ações.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina MI, são de 21,0 Bq/m3, 26,0 Bq/m^3 (detector nº 209, ponto 4: Galeria 6 - Travessa 6 - Eixo principal) e 20,0 Bq/m^3 (detector nº 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^3. 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^3, 120,0 Bq/m^3 (detector nº 67, ponto 4: Galeria 7- Travessa 7 - Eixo 2NW - Final da cauda) e 61,0 Bq/m^3 (detector nº 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^3. 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^3, 234,0 Bq/m^3 (detector nº 45, ponto 3: entre Galeria 5 e 6 – Travessa 15 - Eixo SE 03) e 25,0 Bq/m^3 (detector nº 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^3. Observa-se que para esta mina, o valor do BG é superior àqueles detectados em três pontos amostrados no interior da mina.

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^3) é menor que o da mina MM (234,0 Bq/m^3). 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.

Tabela 1. Valores da concentração de Rn-222 no ar e densidade de traços nos locais estudados.

Table 1. Rn-222 air concentration and track density in the studied sites.

Mina MI					
Ponto	**Nº Detector**	**Localização**	**Densidade de Traços (traços/cm²)**	**Concentração Rn-222 (Bq/m³)**	**Incerteza (Bq/m³)**
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
		Área Externa (*outdoor*)	**BG**	53,0	
Mina MBI					
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
		Área Externa (*outdoor*)	**BG**	82,0	
Mina MM					
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
		Área Externa (*outdoor*)	**BG**	49,0	

Comparando o valor da concentração da radiação natural de fundo (53,0 Bq/m3) de Rn-222 no ar, encontrado para a mina MI, com o valor médio (21,0 Bq/m3), 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.

Na Tabela 2, são apresentados os valores da concentração de Ra-226, da capa (teto), do carvão (produto) e da lapa (piso), em Bq/kg, para cada mina de carvão estudada.

Tabela 2. Valores da concentração de Ra- 226, da capa (teto), do carvão (produto) e da lapa (piso), em Bq/kg, para cada mina de carvão. O tempo de aquisição das contagens foi estabelecido para obter uma incerteza de 1% nas medidas.

Table 2. Ra-226 concentration in the hanging wall, coal, and footwall, for each studied coal mine. Acquisition time was established to have an uncertainty of 1% in each analysis.

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

Observou-se, na análise dos resultados contidos na Tabela 2, 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.

3.2. Concentração de Radônio no Ar e Teores de Rádio nas Rochas das Minas de Fluorita

Na Tabela 3 observam-se os pontos, número dos detectores, localização, densidade de traços e a concentração de radônio no ar, para as três minas de fluorita, na região de Criciúma/SC. Também são apresentados os valores da radiação de fundo (BG),

da concentração de Rn-222 no ar, medidos fora do ambiente mineiro. Os detectores foram instalados a partir da frente de lavra, em direção à saída da mina.

Tabela 3. Valores da concentração de Rn-222, densidade de traços, número do detector e localização dos detectores das minas de fluorita.

Table 3. Rn-222 concentration and track density for each studied site in the fluorite mines.

Mina RB					
Ponto	**No Detector**	**Localização**	**Densidade de Traços (traços/cm²)**	**Concentração Rn-222 (Bq/m³)**	**Incerteza (Bq/m³)**
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 (*outdoor*)	BG	43,0	
Mina NF					
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 (*outdoor*)	BG	54,0	
Mina MF					
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 (*outdoor*)	BG	34,0	

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 3, que as minas RB e NF apresentam 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^3. Já, a mina MF apresenta valores de concentração de radônio no ar baixos, exceto para frente de lavra. Para as três minas de fluorita todos os valores da concentração de Rn no ar são acima do BG.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina RB são de 3090,0 Bq/m^3, 5281,0 Bq/m^3 (detector nº 184, ponto 1: Nível 152 – Frente de Lavra) e 2066,0 Bq/m^3 (detector nº 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^3.

O valor mínimo da concentração de Rn-222 no ar, da mina RB, se localiza na Sala de Café, enquanto o valor máximo da concentração de Rn-222 no ar se localiza próximo à frente de lavra.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina NF são de 2047,0 Bq/m^3, 3169,0 Bq/m^3 (detector nº 182, ponto 6: Nível 140 - Travessa 9 - Bloco 1/140 - Área Desativada) e 1544,0 Bq/m^3 (detector nº 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^3.

O menor valor da concentração de Rn-222 no ar, da mina NF, localiza-se na Sala de Café, enquanto o maior valor da concentração de Rn-222 no ar, se localizam na área desativada.

Os valores médios, máximo e mínimo da concentração de Rn-222 no ar para a mina MF são de 2194,0 Bq/m^3, 6358,0 Bq/m^3 (detector nº 170, ponto 1: Nível 200N - Bloco 3 - Frente de lavra) e 606,0 Bq/m^3 (detector nº 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^3.

O valor maior da concentração de Rn-222 no ar, da mina MF se localizam próximo à frente de lavra, enquanto, os demais pontos apresentam valores baixos de concentração de Rn-222 no ar.

Na Tabela 4, são apresentados os valores da concentração de Ra- 226, do granito normal e alterado, e da fluorita verde e roxa, em Bq/kg, para cada mina de fluorita estudada.

Tabela 4. Valores da concentração de Rádio, do granito normal e alterado, e da fluorita verde e roxa, em Bq/kg, para cada mina de fluorita. O tempo de aquisição das contagens foi estabelecido para obter uma incerteza de 1% nas medidas.

Table 4. Ra concentration for the normal and altered granite, and the purple and green fluorite, for each studied fluorite mine. Acquisition time was established to have an uncertainty of 1%.

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

Observou-se, na análise dos resultados apresentados na Tabela 4, 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.

3.3. Relação entre Concentração de Radônio no Ar e Concentração de Rádio nas Rochas das Minas de Carvão

Na Tabela 5, 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 3, 4 e 5, 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 5. 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.

Table 5- Maximum, minimum, and average Rn-222 air concentration, and Ra-226 concentration, for each rock type in the studied coal mines.

Mina	**Concentração Rn-222 no Ar (Bq/kg)**			**Concentração Ra-226 na Rocha (Incerteza de 1%) (Bq/kg)**		
	Médio	**Máximo**	**Mínimo**	**Capa (Teto)**	**Carvão**	**Lapa (Piso)**
MI	17,0	21,0	16,0	13,6	5,8	5,5
MBI	82,0	97,0	50,0	10,8	8,4	10,4
MM	80,0	190,0	20,0	7,8	5,6	7,6

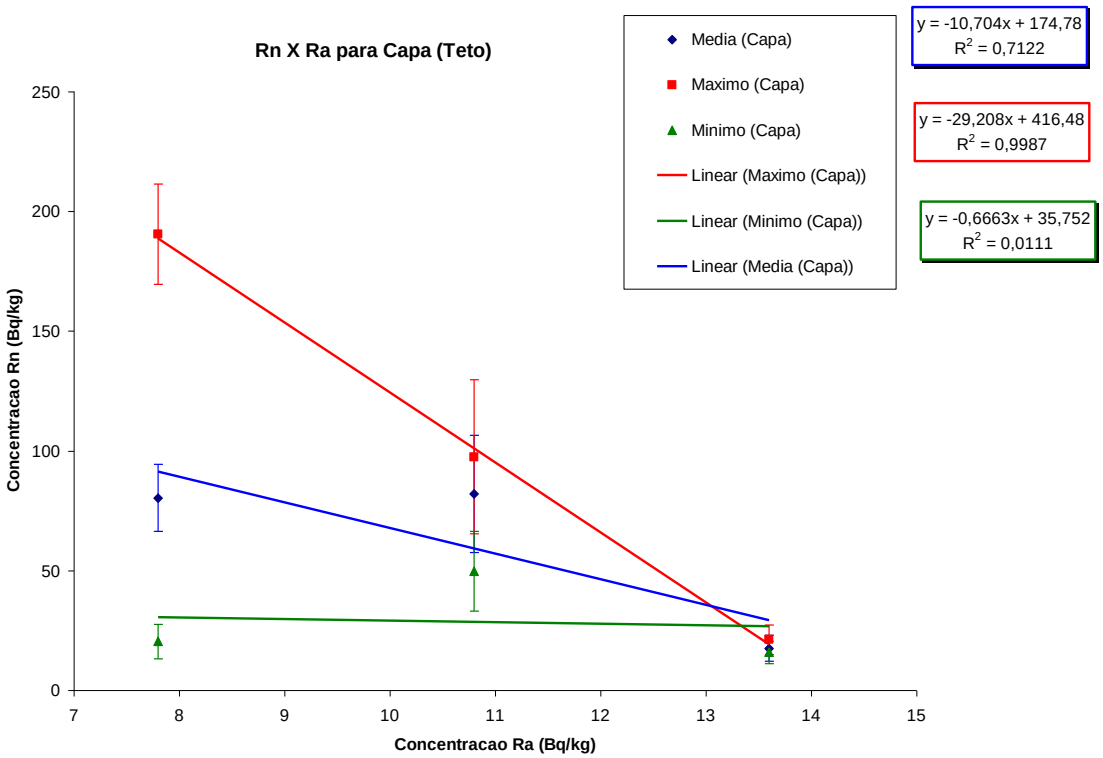

Figura 2. Concentração de Rn-222 no ar em função da concentração de Ra-226 das minas de carvão para a capa (teto).

Figure 2. Rn-222 air concentration is relative to the Ra-226 concentration in the studied coal mines for the hanging wall.

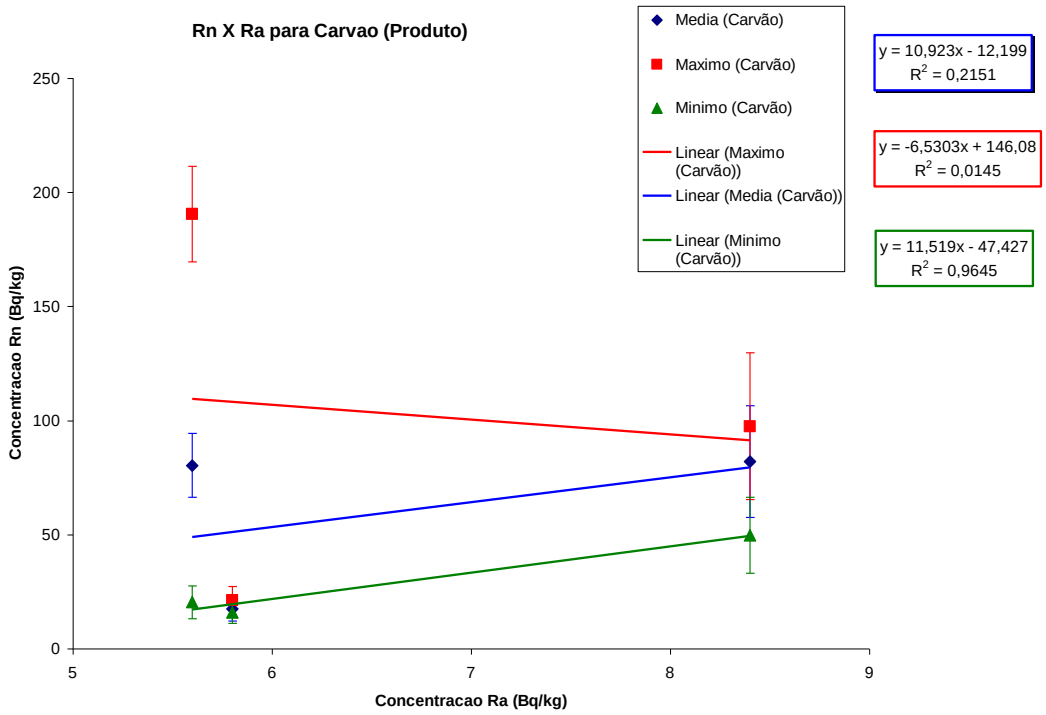

Figura 3. Concentração de Rn-222 no ar em função da concentração de Ra-226 das minas de carvão para o carvão (produto).

Figure 3. Rn-222 concentration is relative to the Ra-226 concentration in the studied coal mines for the product (coal).

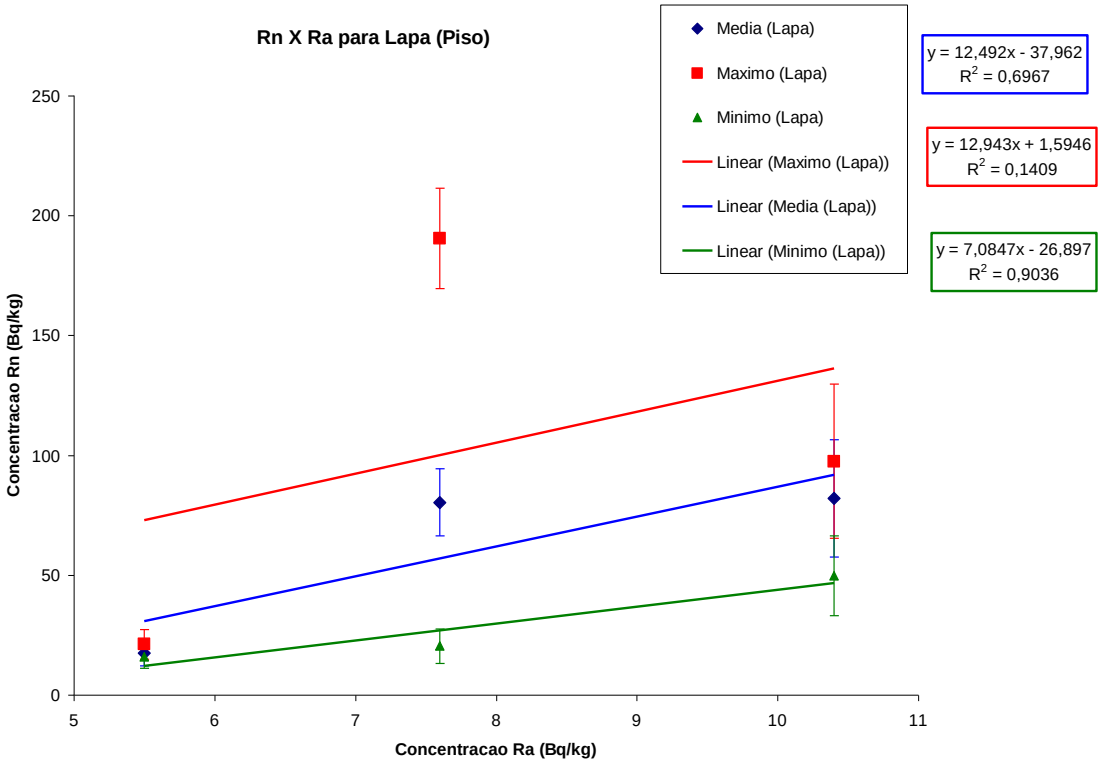

Figura 4. Concentração de Rn-222 no ar em função da concentração de Ra-226 das minas de carvão para a lapa (piso).

Figure 4. Rn-222 concentration relative to the Ra-226 concentration in the studied coal mines for the footwall.

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 5 e nas Figuras 3, 4 e 5, 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 R2 (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 R2 (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 R2 apresenta valor muito menor que 1 (0,21), para o valor médio.

A concentração de Ra-226 nas rochas que compõem a lapa (piso) apresenta correlação entre a concentração de radônio no ar, para os valores mínimos, pois a reta de tendência apresenta inclinação positiva e R2 (coeficiente de correlação) é próximo a 1 (0,90). Já a concentração de rádio das rochas que compõe a lapa (piso) 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 pode ser explicada pelo fato do meio não ser homogêneo. O valor máximo da concentração de Rn-222 no ar, entre as três minas de carvão, é de 234,0 Bq/m3 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 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

3.4. Relação entre Concentração de Radônio no Ar e Concentração de Rádio nas Rochas das Minas de Fluorita

Na Tabela 6, são apresentados os valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar 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 6, 7, 8 e 9, 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.

Tabela 6. 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.

Table 6. Maximum, minimum, and average Rn-222 air concentration, and Ra-226 concentration, for each rock type in the studied fluorite mines.

Mina	**Concentração Rn-222 no ar (Bq/kg)**			**Concentração Ra na rocha (Incerteza de 1%) (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

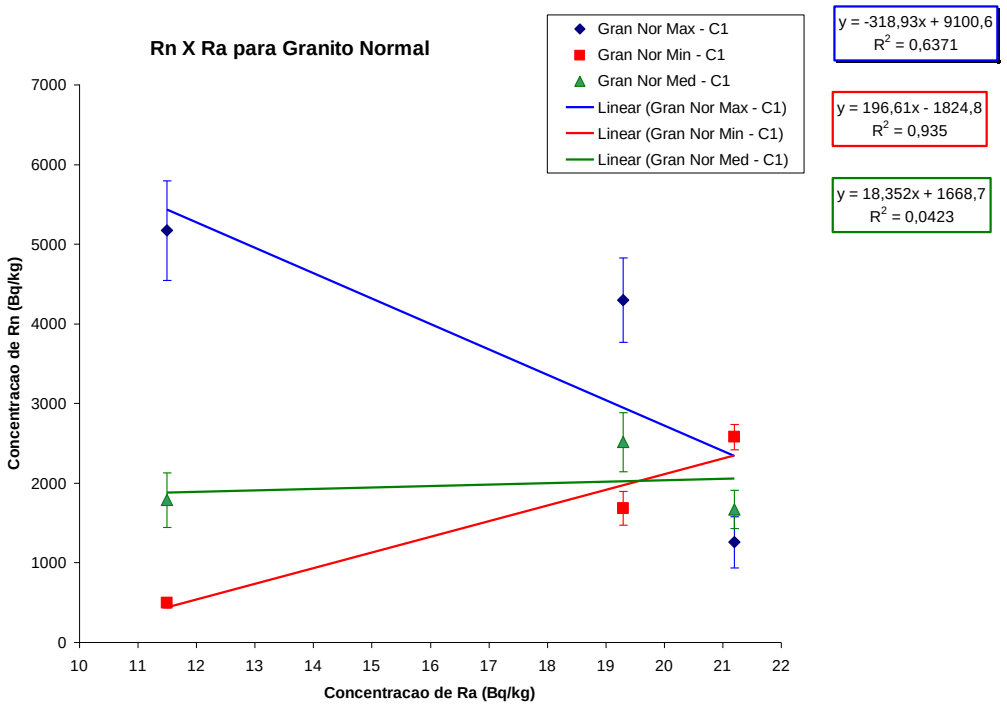

Figura 5. Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar, em função da concentração de Rádio no granito normal, das minas de fluorita.

Figure 5. In the studied fluorite mines, the maximum, minimum, and average Rn-222 air concentration, relative to the Ra-226 concentration in the normal granite.

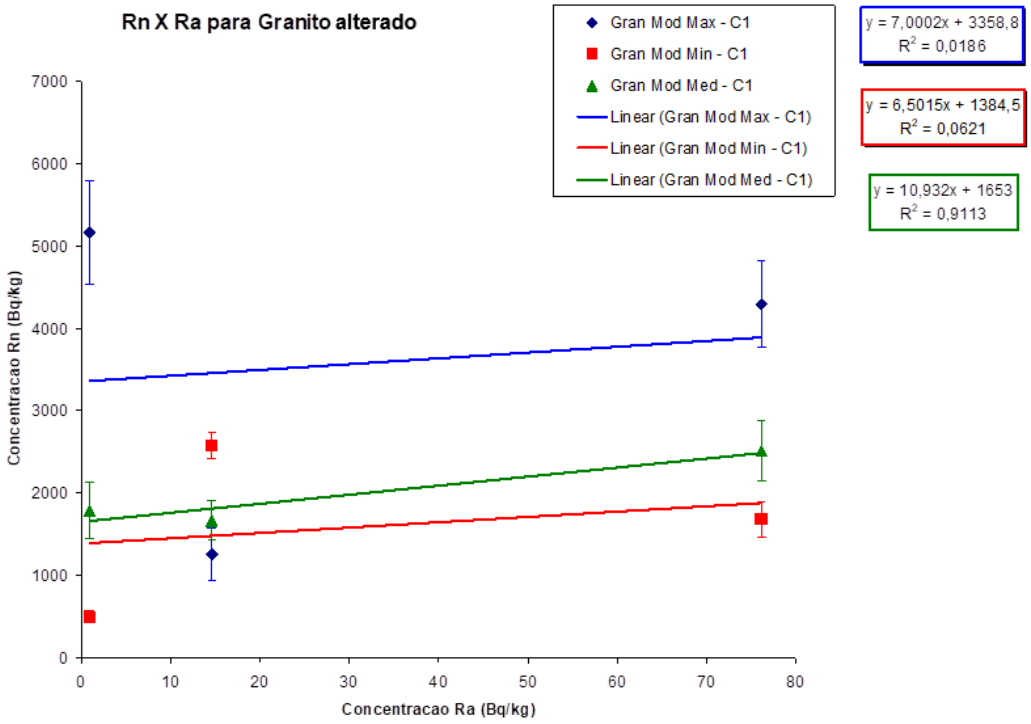

Figura 6. Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar em função concentração de Rádio no granito alterado, das minas de fluorita.

Figure 6. Maximum, minimum, and average Rn-222 air concentration in the studied fluorite mines, relative to the Ra-226 concentration in the altered granite.

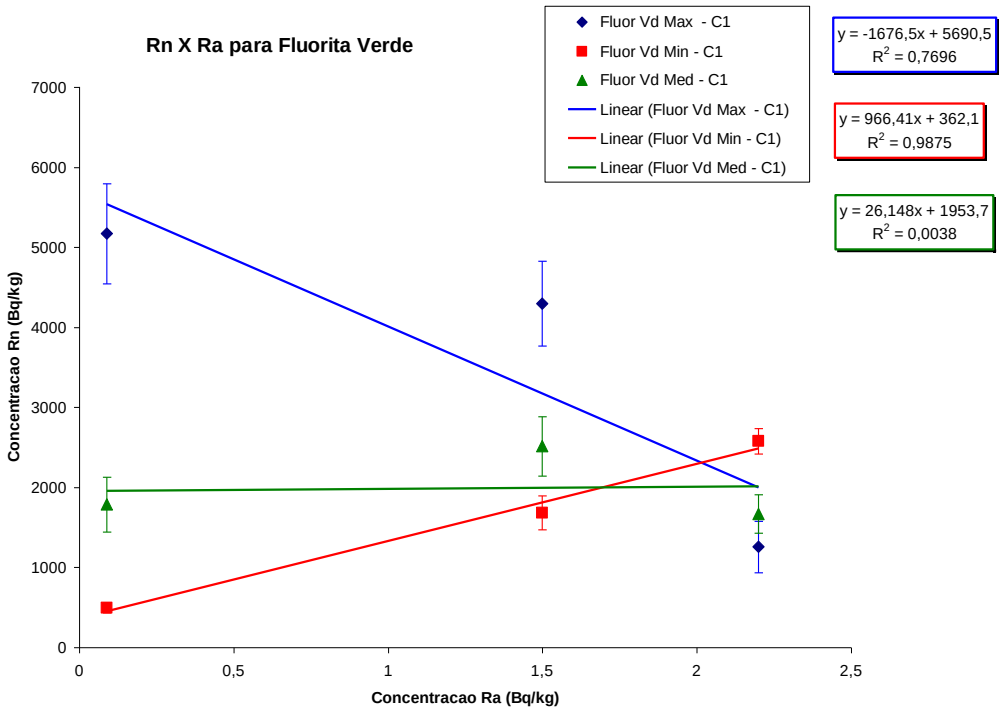

Figura 7. Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar em função concentração de Rádio na fluorita verde, das minas de fluorita.

Figure 7. In the studied fluorite mines, the maximum, minimum, and average rn-222 air concentration, relative to the ra-226 concentration in the green fluorite.

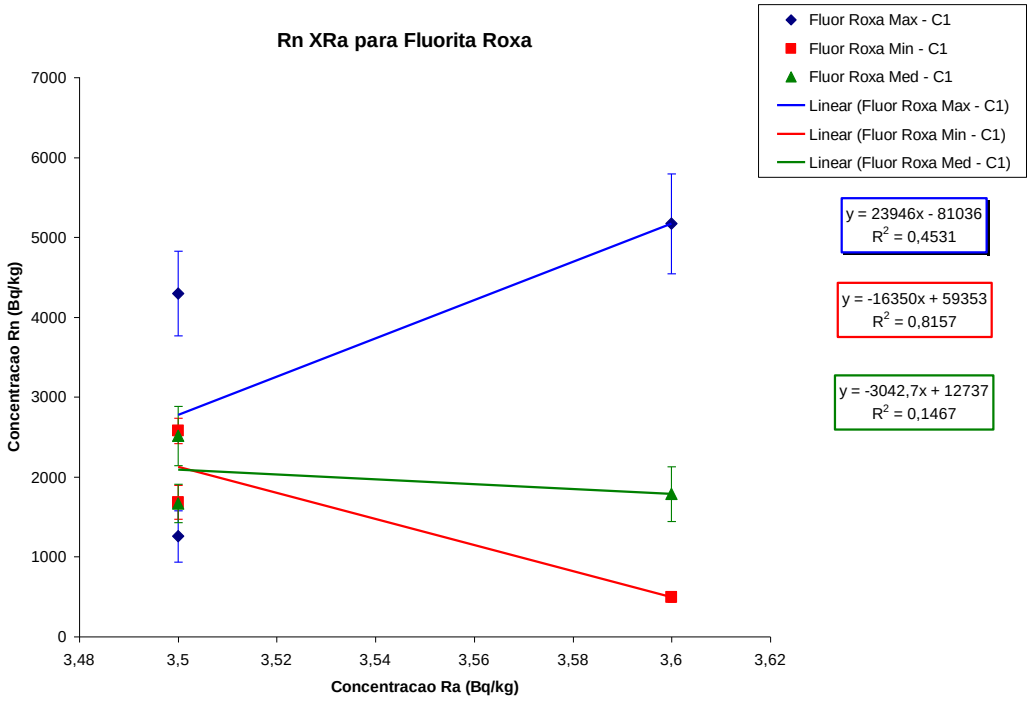

Figura 8. Valores, máximo, mínimo e médio, da concentração de Rn-222 no ar em função concentração de Rádio na fluorita roxa, das minas de fluorita.

Figure 8- Maximum, minimum, and average Rn-222 air concentration in the studied fluorite mines, relative to the Ra-226 concentration in the purple fluorite.

Observou-se na análise dos resultados, contidos na Tabela 6 e nas Figuras 6, 7, 8 e 9, 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 R2 (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 R2 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 R2 (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 R2 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 R2 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 R2 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 R2 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 no interior da mina, o meio não é homogêneo, 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 R2 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 radio 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.

4. Conclusão

As minas de carvão apresentam valores de concentração de radônio no ar baixos, inferiores a 500 Bq/ m3 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.

As minas RB e NF apresentam 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/m3. Isso pode ser explicado pela ineficiência da ventilação, 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.

Já, a mina MF apresenta valores de concentração de radônio no ar baixos, exceto para frente de lavra. Isso pode ser explicado pela eficiência da ventilação, 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 e semelhantes as demais minas.

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 os valores médios.

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.

Agradecimentos: Esta pesquisa foi financiada com o apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), e da FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul)

Contribuições dos Autores: Concepção, C.E.L.S., R.V.C., M.L.V., J.F.M. e A.M.X.; Metodologia, R.V.C., J.F.M. e A.M.X.; escrita do artigo, C.E.L.S., R.V.C., D.T.V., R.C.R.; revisão, D.T.V. e R.C.R.; aquisição de financiamento, R.V.C., M.L.V., J.F.M. e A.M.X.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse

Referências

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*, 23: 243-364. https://doi.org/10.1080/10643389209388437

Cohen, B.L. 1993. Relationship between exposure to radon and various types of cancer. *Health Physics*, 65: 529-531. https://doi.org/10.1097/00004032-199311000-00009

Cohen, B.L. 1995. Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products. *Health Physics*, 68: 157-174. https://doi.org/10.1097/00004032-199502000-00002

Cohen, B.S. & Cohen, E.S. 1983. Theory and practice of radon monitoring with charcoal adsorption. *Health Physics*, 45: 501-508.

Cole, J.; Green, M.H.L.; Bridges, B.A.; Waugh, A.P.W.; Beare, D.M.; Hanshaw, D.; Last, R.; Liu, Y. & 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*, 145: 61-69. https://doi.org/10.2307/3579196

COMISSAO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN. 2005. *Diretrizes básicas de proteção radiológica.* Norma CNEN-NN-3.01.

Dardenne, M.A. & Savi, C.N. 1994. Geologia e geoquímica dos filões de fluorita Segunda Linha Torrens e Cocal (SC). *Revista Brasileira de Geoquímica*, 14(2): 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.

Durrani, S.A. 1993. Radon as a health hazard at home: what are the facts? *Nuclear Tracks Radiation Measurement*, 22: 303-317. https://doi.org/10.1016/0969-8078(93)90074-E

Enge, W. 1980. Introduction to plastic track detectors. *Nuclear Tracks*, 4: 283-308, Pergamon Press, Great Britain.

Frank, A.L. & Benton, E.V. 1977. Radon dosimetry using nuclear track detectors. *Nuclear Track Detection*, 1(3/4): 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*, 111(2): 329-335. https://doi.org/10.1007/BF02072866

Henshaw, D.L. 1993. Radon Exposure in the home: its occurrence and possible health effects. *Contemporary Physics*, 34: 31-48. https://doi.org/10.1080/00107519308211072

Ilié, 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, Triest, Italy, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, pp. 133-144. https://doi.org/10.1016/s1350-4487(99)00107-9

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA. 1989. *Radiation Monitoring in the Mining and Milling of Radioactive Ores.* Report Safety Series nº 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*. Viena.

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.

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 Geociencias, vol. 36(1), pp 147-154. https://doi.org/10.25249/0375-7536.2006361147154

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.

Melo, M.R.B. 2014. *Estudo da Viabilidade do Método Shrink Stope na Mina do Mamão, Município de Floresta do Araguaia-PA*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas). Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, Tocantins.

Merola, Y.L. 2017. *Radiação natural e células tronco de tumores mamários em população residente no Município de Poços de Caldas-MG*. Tese (Doutorado em Fisiopatologia Médica da Faculdade de Ciências Médicas), Universidade Estadual de Campinas, Brasil, p. 1 - 120.

Mishra, R.; Orlando, C.; Tomasino, L.; Tonnarini, S. & Trevisi, R. 2005. A better understanding of the background of CR-39 detectors. *Radiation Measurements*, 40: 325-328. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.11.010

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 MEASUREMNTS, NCRP. 1988. *Measurements of Radon and Radon Daughters in Air*, Report 97, NCRP Publications, New York, N.Y.

Parisi, G.N. & Horn, B.L.D. 2023. *Projeto Materiais Construção da Região de Criciúma , Tubarão e Entorno: 1 Mapa Geológico*. Porto Alegre: SGB-CPRM, 2023. Escala 1:500.000.

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. & Urban, M. 1983. *Técnica de Medida de Radônio no Ar Utilizando um Detector Plástico de Traços*. IRD/CNEN. RJ.

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.

Rio Doce, A.P.C. 1997. *Determinação da taxa de exalação de Rn-22 em materiais de construção*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ-COPPE.

Sallet, R.G. 1988. *Étude pétrologique et métallogénique d'un secteur du district àfluorine de Santa Catarina, Brésil. Les granitöides précambriens monzonitiques source probable de la fluorine filonienne post-jurassique*. Tese de Doutorado. Université de Paris.

Santos, C.E.L. 2008. *Determinação dos processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas de fluorita e carvão do estado de Santa Catarina: critérios para avaliação dos riscos radiológicos*. Dissertação de Mestrado. IGEO/UFRGS. Porto Alegre/RS. 136 p.

Santos, T.O.; Rocha, Z.; Cruz, P.; Gouvea, V.A.; Siqueira, J.B. & Oliveira A.H. 2014. Radon dose assessment in underground mines in Brazil. *Radiat Prot Dosim*etry, 160(1-3):120-3. https://doi.org/10.1093/rpd/ncu066

Savi, C.N. 1980. *Gênese e controle das mineralizações de fluorita da região de Crisciuma/SC*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 112 p.

Silva, R.S. & Vasconcelos, D. 2021. Assessment of Indoor Radon Levels in Brazil: an overview. *Revista Virtual de Quimica*, 13(6): 1372-1383.

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*, 34(1/4): 1-4. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a080831

Tommasino, L.; Cherouati, D.E.; Seidel, J.L. & Monin, M. 1986. A plastic-bag sampler for passive radon monitoring. *Radiation Measurement*, 12: 681-684. https://doi.org/10.1016/1359-0189(86)90678-3

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.