

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 28/02/2020



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de São José do Rio Preto

Marcos Roberto Moreira da Silva Junior

**RADIOATIVIDADE NATURAL EM REGIÕES DO BRASIL E PORTUGAL:
UMA CORRELAÇÃO ENTRE EXALAÇÃO DE RADÔNIO E
CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO.**

São José do Rio Preto
2019

Marcos Roberto Moreira da Silva Junior

**RADIOATIVIDADE NATURAL EM REGIÕES DO BRASIL E PORTUGAL:
UMA CORRELAÇÃO ENTRE EXALAÇÃO DE RADÔNIO E
CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO.**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Química, junto ao Programa de Pós-Graduação em Química, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto

Orientador: Prof. Dr. Marcos Fernando de Souza Teixeira.

Coorientador: Prof. Dr. João Osvaldo Rodrigues Nunes

Financiadora: CAPES

São José do Rio Preto
2019

M838r

Moreira-Silva, Marcos Roberto Junior

Radioatividade natural em regiões do Brasil e Portugal: uma correlação entre exalação de radônio e concentração de chumbo / Marcos Roberto Junior Moreira-Silva.

-- São José do Rio Preto, 2019

101 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: Marcos Fernando de Souza Teixeira

Coorientador: João Osvaldo Rodrigues Nunes

1. Especiação Química. 2. Geoquímica analítica. 3. Avaliação Ambiental. 4. Química Analítica. 5. Radioatividade. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Marcos Roberto Moreira da Silva Junior

**RADIOATIVIDADE NATURAL EM REGIÕES DO BRASIL E
PORTUGAL: UMA CORRELAÇÃO ENTRE EXALAÇÃO DE
RADÔNIO E CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO.**

Tese apresentada como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Química, junto
ao Programa de Pós-Graduação em Química, do
Instituto de Biociências, Letras e Ciências
Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio
de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio
Preto.

Financiadora: CAPES

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcos Fernando de Souza Teixeira
UNESP – Presidente Prudente
Orientador

Prof. Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz
UNESP – Presidente Prudente

Profa. Dra. Rosane Freire Boina
UNESP – Presidente Prudente

Prof. Dr. Luiz Humberto Marcolino Junior
UFPR – Curitiba

Prof. Dr. Caio Augusto Marques dos Santos
UFMT – Rondonópolis

Presidente Prudente

28 de fevereiro de 2019

Dedico esse trabalho a todos que me ensinaram: aos meus queridos através do amor, e aos meus desafetos através da dor. Lembrando que aquilo que o amor ensina, nada nem ninguém pode apagar.

Agradecimentos

À **Deus** pela dádiva da vida, que me ajudou, sustentou e fortaleceu em todos os momentos;

Ao meu pai, **Marcos**, que sempre me apoiou e incentivou, acreditando inabalavelmente nas minhas escolhas;

A minha **mãe** (in memorian), pela educação e amor dedicados, que me fizeram aquilo que realmente sou, fica a vontade e a saudade de um forte abraço de agradecimento;

A minha avó **Conceição**, àquela que é meu suporte de vida, que me ensinou os valores mais importantes e que mesmo em momentos complicados soube me impressionar com seu amor incondicional;

A minha avó **Alda**, que traz a sabedoria já carimbada no nome, que sempre trouxe palavras de acalento ao meu coração;

A toda a minha família, em especial aos meu **tios** que me incentivaram com amor, carinho e paciência durante esse período. Aos meus primos (**Diego, Cacá, Giovanni, Mirella, Murillo, Zézinho, Jeronymo, Bruno, Estella e Thiago**) por serem tão amáveis e tornarem nossos momentos juntos, os mais memoráveis;

Ao Prof. Dr. **Marcos Teixeira**, responsável como orientador, pelo seu amor à ciência e por acreditar em mim, mesmo com todas as minhas limitações, por ter me acolhido como irmão e amigo, pela oportunidade de tê-lo como família em todo esses anos juntos. Agradeço a **Pati Seraphim**, que tenho infinito carinho, pela amizade, pelas viagens divertidas e pelo alto astral contagiante;

Ao Prof. Dr. **João Osvaldo**, pelo aceite da co-orientação, pelas instruções e discussões desta pesquisa, pela enorme paciência e esforço nos trabalhos de campo, meu respeito pela sua competência como pesquisador e professor, e sua humildade como ser humano;

Ao Prof. Dr. **Carlos Tello**, que desde o início foi presente de forma direta para a realização desse trabalho, disponibilizando do seu tempo e experiência na área da geociência;

Ao Prof. Dr. **Alcides Pereira**, que me acolheu em seu laboratório na Universidade de Coimbra, onde nunca mediu esforços para transmitir seus conhecimentos e me proporcionou uma das maiores experiências da minha vida, a vivência junto ao Laboratório de Radioatividade Natural ;

Aos colegas de grupo do LRN, que me proporcionaram grande aprendizagem, sempre com muita paciência, sou grato pela acolhida pois sem isso seria impossível aproveitar o tempo em Portugal. Sou muito grato a vocês: Jéssica, Filipa, Sérgio, Nelson e Vasco.

Aos meus amigos que foram do GPES: **Camila Rizzardi, Denilson, Natíza, Laís e Fernanda** que participaram do meu processo evolutivo, pelas agradáveis companhias e pelos momentos inesquecíveis de descontração e muitas risadas;

Meus amigos do grupo de pesquisa, **André, Diego Parra, Yuri, Dani, Camila Fernanda, Jéssica, Marianna, Douglas, Kaio e Heitor**, vocês fizeram total diferença na minha caminhada de pós graduando, são sinônimo de boa companhia e muito mais que isso, são parte da família que pude escolher e viver todos esses anos;

Ao **Diego Parra**, pela amizade incondicional, pelos papéis fantásticos, pela oportunidade em dividir a mesma casa e formar uma república sensacional, pelas caronas e acima de tudo, pelo carinho e por ser um cara admirável;

A **Dani Chagas**, sou grato pela sua amizade, por você ser um exemplo de ser humano maravilhoso, pelos copos de cerveja bem aproveitados e por tantos anos me aturando;

Ao casal que demonstrou uma amizade incondicional, **Prof. Dr. Deuber Lincon e Jéssyka**, vocês foram fundamentais nesses quatro anos, sou grato pelos momentos fenomenais que me proporcionaram, amo vocês;

Ao prof. **Dr. Sérgio Lima**, pela amizade fiel e companheirismo, você me ensinou muito e sempre será uma referência de ser humano e profissional;

Aos amigos, àqueles que nomeio de irmãos, desde a graduação ao meu lado, **Larissa, Mamute, Thaísa, Camila Proença, Glauciana**, com certeza vocês revolucionaram o sentido da palavra amizade, foram essenciais na minha vida, sem vocês não teria graça nem sentido tudo aquilo que vivi em Presidente Prudente, vocês são os personagens principais da minha história;

As eternas e mais queridas vizinhas de todos os tempos, por todo carinho e dedicação em nossa amizade, por estarem comigo e me mostrarem valores que carregarei para vida inteira: **Edilene, Carol e Talita**;

A todos os professores da graduação do curso de Licenciatura em Química da FCT - UNESP, em especial àqueles que foram muito mais que simples professores, como o Prof. Dr. **Homero** pelos ricos ensinamentos, pelas melhores histórias, narradas sempre com muito afinho e por sua genialidade e simplicidade;

Aos docentes e funcionários do Departamento de Física, Química e Biologia da FCT - UNESP, particularmente, a **Juvanir, Fernanda e Angélica**, pelo carinho e ótima convivência durante esses anos;

Aos técnicos de laboratório, **Sidney, Marcelo, Gabriel e Murillo**, que sempre estiveram dispostos para colaborar, com o sorriso no rosto;

Ao técnico **Vítor**, pelo auxílio nas medidas granulométricas, bem como a todos os integrantes do Laboratório de Sedimentologia e Análise de Solos, na FCT - UNESP;

Por fim, mas não menos importante, aos meus amigos de longa data: **Elvio, Bia, Coala, Gabi, Didi, Bell, Carol Pelizzon, Marianna Manfio, Honey, Daniel, Junior, Augusto, Magno, Laura, Leandra, Malu**, que são primordiais em minha vida;

A todos que de alguma maneira cederam uma parcela de carinho, esforço, incentivo para a realização desse trabalho;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, à qual agradeço.

*"Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada.
Apenas dê o primeiro passo".*

Martin Luther King

Resumo

Os principais objetivos desse trabalho, que envolve importantes áreas da ciência como química, física nuclear e geologia, são quantificar as atividades de gás radônio e concentração de chumbo total em regiões específicas do Brasil e Portugal, além de elaborar mapas indicativos do teor geogênico desses elementos em regiões de falhas geológicas. As zonas de falha geológica são regiões onde ocorreram fraturamentos e esmagamentos intensos de rocha e possuem a característica intrínseca de liberarem maior quantidade de gás Rn. As regiões de falhas também podem ser alvo de estudos voltados à quantificação de metais, principalmente de chumbo (Pb) por estar inserido na série natural de decaimento radioativo do urânio. As amostras de solo e rocha foram coletadas de acordo com estudos prévios em dois cenários, o primeiro abrange regiões específicas de Portugal (Sangemil e Oliveira do Hospital) e o segundo cenário refere-se ao município de Presidente Prudente, estado de São Paulo, Brasil. As amostras foram analisadas utilizando-se de algumas técnicas como: espectrometria com detector de germânio de alta resolução, onde quantificou-se as atividades de ^{235}U , ^{228}Ac , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{212}Bi , ^{214}Bi , ^{234}Pa , ^{208}Tl e ^{40}K ; medidor Alpha Guard instalado em contentores metálicos onde determinou-se o coeficiente de emanção por meio das concentrações de Rn e Ra; medidor Alpha Guard e câmara de ionização que possibilitou quantificar Rn e U *in situ*, análise eletroquímica via técnica de voltametria de redissolução anódica, onde aferiu-se o teor de Pb total das amostras e análise granulométrica. As atividades dos radionuclídeos nas amostras apresentaram-se heterogêneas principalmente ao se tratar dos valores atrelados à atividade de U^{235} comparado às atividades de U^{238} e Th^{232} . Em Oliveira do Hospital, valores elevados de U^{238} indicaram o enriquecimento de urânio, provavelmente pelo fato de serem rochas do tipo granítica. As razões das atividades entre ^{238}U e ^{230}Th indicaram valores característicos de rochas ígneas recentes. Para as áreas com maior exalação de Rn associou-se também maior atividade de urânio. De acordo com os dados obtidos de concentrações de Rn no leito das rochas para a região de Sangemil e para a área específica em Presidente Prudente, desenvolveram-se croquis da região indicando a exalação de radônio geogênico. Para o valor mais alto, de $1.609.273 \text{ Bq m}^{-3}$ de gás radônio, propôs-se como concentração anômalas ligada fortemente às falhas geológicas enriquecidas de urânio. As amostras do cenário 1, mesmo apresentando valores

radiométricos mais elevados, característicos de regiões de falhas geológicas e até mesmo de áreas enriquecidas de urânio, indicaram concentrações de Pb total relativamente baixas, sendo consideradas dentro na média natural de granitos. Para o cenário 2, observou-se uma relação direta entre o aumento da concentração de Pb, atividade de Rn e fração de argila que compõem as amostras de solo.

Palavras-chave: Radônio, Chumbo, Falhas Geológicas.

Abstract

The main objectives of this work, that involve important areas of science such as chemistry, nuclear physics and geology, are to quantify uranium, radon gas and total lead concentration in specific areas from Brazil and Portugal, and to prepare geogenic maps indicating the content of these elements in geological faults regions. The geologic fault zones are regions where fractures and intense crushing of the rock occurred, with varying thickness in centimeters until kilometers. Due to the intrinsic characteristic of releasing a larger amount of Rn gas, geological fault regions can also be the target of studies aimed at the quantification of metals, mainly lead (Pb), as it is included in the natural decay series of uranium. Soil and rock samples were collected according to previous studies in two scenarios, the first covering specific regions of Portugal (Sangemil and Oliveira do Hospital) and the second scenario refers to Presidente Prudente municipality, state of São Paulo, Brazil. The samples were analyzed using some techniques such as HPGe detector, where the activities of ^{235}U , ^{228}Ac , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{212}Bi , ^{214}Bi , ^{234}Pa , ^{208}Tl and ^{40}K were quantified; Alpha Guard installed in metal containers where the emanation coefficient was determined by the Rn and Ra concentrations ; Alpha Guard and ionization chamber that possibilited to quantify Rn and U in situ and Anodic Stripping Voltammetry that the total Pb content of the samples was measured. The radionuclides activities of the the samples were heterogeneous mainly when dealing with the values linked to ^{235}U activity compared to ^{238}U and ^{232}Th activities. In Oliveira do Hospital, high values of ^{238}U indicated uranium enrichment, probably because they are granitic rocks. The activity ratios measure between ^{238}U and ^{230}Th indicated characteristic of recent igneous rocks. According to ^{222}Rn concentrations in the bed of rocks in Sangemil region, a geogenic radon map was developed indicating the radon exhalation values. For the highest value, of $1,609,273 \text{ Bq m}^{-3}$ of radon gas, it was proposed as anomalous concentration linked to geological uranium enrichment. The samples from the first scenario, even with higher radiometric values, characteristic of geological faults regions and even enriched areas of uranium, indicated relatively low total lead concentrations, being considered within the natural mean of granites. For the second scenario , a direct relationship between the increase of Pb concentration, Rn activity and clay fraction that compose the soil samples was observed.

Keywords: Radon, Lead, Geological Fault

Lista de Figuras

Figura 1 - Séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th	18
Figura 2 - Formação do Rn a partir do decaimento do núcleo do elemento Ra.	24
Figura 3- Representação dos grãos, poros, pontos iniciais e finais dos elementos formados por decaimento radioativo em rochas.....	25
Figura 4- Representação dos processos de emanação e exalação de gás Rn.....	25
Figura 5 - Componentes estruturais de uma falha geológica.....	28
Figura 6- Falhas normais e indicação de suas tensões principais.....	29
Figura 7- Falhas reversas e indicação de suas tensões principais.....	30
Figura 8 - Falhas transcorrentes e indicação de suas tensões principais.	30
Figura 9- Mapa dos principais lineamentos e falhas geológicas do território brasileiro.	31
Figura 10- Mapa dos principais lineamentos e falhas no território português.	32
Figura 11- Representação esquemática da rocha (R) e do regolito (tudo que esta acima da rocha). O regolito subdivide-se em saprólito (C) e solum, que, por sua vez, é composto de várias camadas (os horizontes O, A, E e B).	34
Figura 12 - Diagrama textural detalhado adotado pela EMBRAPA.	37
Figura 13 - Produtos finais estáveis oriundos dos decaimentos radioativos do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th	39
Figura 14 - Ilustração do mineral galena (PbS)......	40
Figura 15 - Identificação das áreas de coleta no cenário 1: Sangemil e Oliveira do Hospital.....	46
Figura 16 - Identificação do cenário2: município de Presidente Prudente/SP.	48
Figura 17 - Localização da área de estudo no município de Presidente Prudente-SP, com as possíveis falhas geológicas.....	50
Figura 18 - Imagem representativa das amostras de rochas coletadas em trabalho de campo, em diferentes pontos.	51
Figura 19 - Imagem representativa dos processo de secagem (A), de moagem em (B) e armazenamento em béquer Marinelli (C).	52
Figura 20 - Ilustração do sistema espectrométrico com detector de germânio de alta pureza: em (A) sistema completo, (B) câmara de baixo fundo cilíndrica (Castelo de Chumbo Iteco), em (C) o interior da câmara e a amostra inserida no sistema em (D). 54	
Figura 21 - Imagem representativa do medidor AlphaGuard e bomba de gás acoplados ao contentor metálico onde está inserida a amostra.	55
Figura 22 - Ilustração dos procedimentos de perfuração e determinação da atividade de ^{222}Rn em rochas: (A) furadeira com broca de 80 cm; em (B) sonda metálica acoplada à bomba AlphaPump e medidor AlphaGuard e (C) marcação do furo após retirada da sonda.....	57
Figura 23 - Fórmula estrutural do monômero do detector de traço nuclear de estado sólido CR-39.....	57
Figura 24 - Malha de coletas indicando os 15 pontos no cenário 2.....	58
Figura 25 - Representação da implantação do CR-39.	59
Figura 26 - Equipamento da marca RADOSYS, modelo Radometer 2000 RSV10.	60

Figura 27- Ilustração das etapas da análise granulométrica conjunta.	62
Figura 28 - Fluxograma referente à metodologia de abertura das amostras.....	62
Figura 29 - Processador voltamétrico modelo 797 VA (Metrohm) e célula eletroquímica constituída por três eletrodos.	63
Figura 30 - Concentrações das atividades de ^{235}U para cada ponto de amostragem.	66
Figura 31 - Concentrações das atividades de ^{238}U para o conjunto de pontos de amostragem, em (A) os pontos vão de P1 a P33; em (B) excluiu-se o ponto P28.	67
Figura 32 - Concentrações das atividades de ^{235}Th para cada ponto de amostragem.....	68
Figura 33 - Representação gráfica da razão Th/U.	70
Figura 34 - Croqui da área de coleta em Sangemil, com indicação dos lineamentos das falhas geológicas (linhas azuis), e os pontos com seus respectivos valores de exalação de ^{222}Rn geogênico.	74
Figura 35 - Determinação do coeficiente de correlação de Person.	82
Figura 36 - Distribuição dos valores de atividade de Rn, concentração de Pb e posição em relação a falha geológica para os pontos do cenário 2.....	88
Figura 37 - Mapa de <i>Kernel</i> para a distribuição de chumbo em relação ao distanciamento da falha geológica.....	90
Figura 38 - Mapa de <i>Kernel</i> para a distribuição dos valores de atividade de Rn em relação ao distanciamento da falha geológica.	90
Figura 39 - Determinação do coeficiente de correlação de Person para as variáveis concentração de Pb e atividade de rn para o cenário 1.....	92
Figura 40 - Determinação do coeficiente de correlação de Person para as variáveis concentração de Pb e atividade de rn para o cenário 2.....	93

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dose média de radiação e suas respectivas fontes.....	19
Tabela 2 - Classe e diâmetro das partícula de acordo com as normas da ABNT.....	36
Tabela 3 - Valores orientados para chumbo em solos brasileiros, conforme Resolução CONAMA.....	41
Tabela 4 - Valores orientados para chumbo em solos brasileiros.....	42
Tabela 5 - Valores orientados para chumbo segundo Ministério de Ambiente de Ontário.....	42
Tabela 6 - Parâmetros metodológicos para aplicação da técnica voltamétrica.....	65
Tabela 7 - Valores das concentrações das atividades dos elementos U^{235} , U^{238} e Th^{232}	67
Tabela 8 - Razão entre ($^{238}U/^{230}Th$) para cada ponto de amostragem.....	71
Tabela 9 - Teor de exalação de ^{226}Ra , ^{222}Rn e coeficiente de emanação (E).....	73
Tabela 10 - Exalação de ^{222}Rn para cada ponto, média de exalação e quantidade de furos.....	75
Tabela 11 - Valores de atividade de Rn, U total e U^{238}	77
Tabela 12 - Valores aferidos para atividade de Rn no cenário 2.....	78
Tabela 13 - Valores de C_{Rn} para amostras de solo de diferentes regiões.....	78
Tabela 14 - Dados granulométricos referentes as amostras de solos.....	79
Tabela 15 - Valores de concentração de Pb total para os pontos de coleta do cenário 1.	81
Tabela 16 - Valores de concentração de Pb total, ^{210}Pb e ^{238}U para o cenário 1.....	82
Tabela 17 - Valores de concentração de Pb e desvio padrão para amostras de cenário 2.	84
Tabela 18 - Valores de concentração de Pb e fração de argila para os horizontes de cada perfil de solo do cenário 2.....	87
Tabela 19 - Valores de [Pb], atividade de Rn e fração de argila.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA: Agência Portuguesa do Ambiente

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

FCT: Faculdade de Ciência e Tecnologia

GPES: Grupo de Pesquisa em Eletroanalítica e Sensores

HMDE: *Hanging Mercury Dropping Electrode*

HPGe: *High-Purity Germanium*

LRN: Laboratório de Radioatividade Natural

MPA: Material Particulado Atmosférico

OMS: Organização Mundial da Saúde

SI: Sistema Internacional de Unidade

SP: São Paulo

UNSCEAR: *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*

USEPA: *United States Environmental Protection Agency*

USGS: *United States Geological Survey*

VRQ: Valor de Referência de Qualidade

VP: Valor de Prevenção

LISTA DE SÍMBOLOS

Ag: Prata

AgCl: Cloreto de Prata

Bi: Bismuto

Bq: Becquerel

Ce: Cério

Co: Cobalto

CO₂: Gás Carbônico

Gy: Gray

HCl: Ácido Clorídrico

Hg: Mercúrio

HNO₃: Ácido Nítrico

H₂O₂: Peróxido de Hidrogênio

KCl: Cloreto de Potássio

N₂: Nitrogênio

NaNO₃: Nitrato de Sódio

Pb: Chumbo

Po: Polônio

Ra: Rádio

Rn: Radônio

Sv: Siervet

Th: Tório

U: Urânio

Sumário

1. Introdução	18
2.Revisão Bibliográfica	23
2.1Radônio e radioatividade natural	23
2.2 Unidades de medidas dosimétricas	26
2.3 Falhas geológicas: definição e características.....	27
2.4 Rochas ígneas e suas características radiológicas.....	32
2.5 Solos: definição e atributos.....	33
2.6 Chumbo: propriedades gerais, toxicidade e legislação	38
3. Justificativa e motivação	43
4. Objetivos.....	45
4.1 Objetivos gerais	45
4.2 Objetivos específicos	45
5. Metodologia.....	46
5.1 Considerações sobre as áreas de amostragem.....	46
5.1.1 Cenário 1	46
5.1.2 Cenário 2	48
5.2 Coleta e preparação das amostras de rochas e solos	51
5.3 Espectrometria com detector de germânio de alta resolução	53
5.4 Avaliação da emissão de radônio em contentores de metal.....	55
5.5 Perfuração das rochas e determinação da atividade de ^{222}Rn e ^{238}U <i>in situ</i>	56
5.6 Detector de Traços Nucleares de Estado Sólido - CR-39	57
5.6.1 Exposição dos detectores CR-39 no solo	58
5.6.2 Ataque químico ao CR-39 e contagem dos traços	59
5.7 Análise Granulométrica das amostras de solos.....	60
5.8 Pré-tratamento das amostras para análise eletroquímica	62
5.9 Análise via voltametria de redissolução anódica	63
5.10 Análise Estatística.....	64
6. Resultados e discussão	65
6.1 Determinação das concentrações de U e Th.	65
6.2 Correlação entre concentração de atividade de ^{238}U e ^{230}Th	69
6.3 Relação de ^{226}Ra e ^{222}Rn	71
6.4 Atividade de ^{222}Rn e ^{238}U <i>in situ</i>	72
6.5 Atividade de ^{222}Rn no cenário 2.....	75
6.6 Avaliação granulométrica das amostras de solo	76
6.7 Concentração de Pb para o cenário 1	79
6.8 Concentração de Pb total nas amostras de solo do cenário 2.....	82

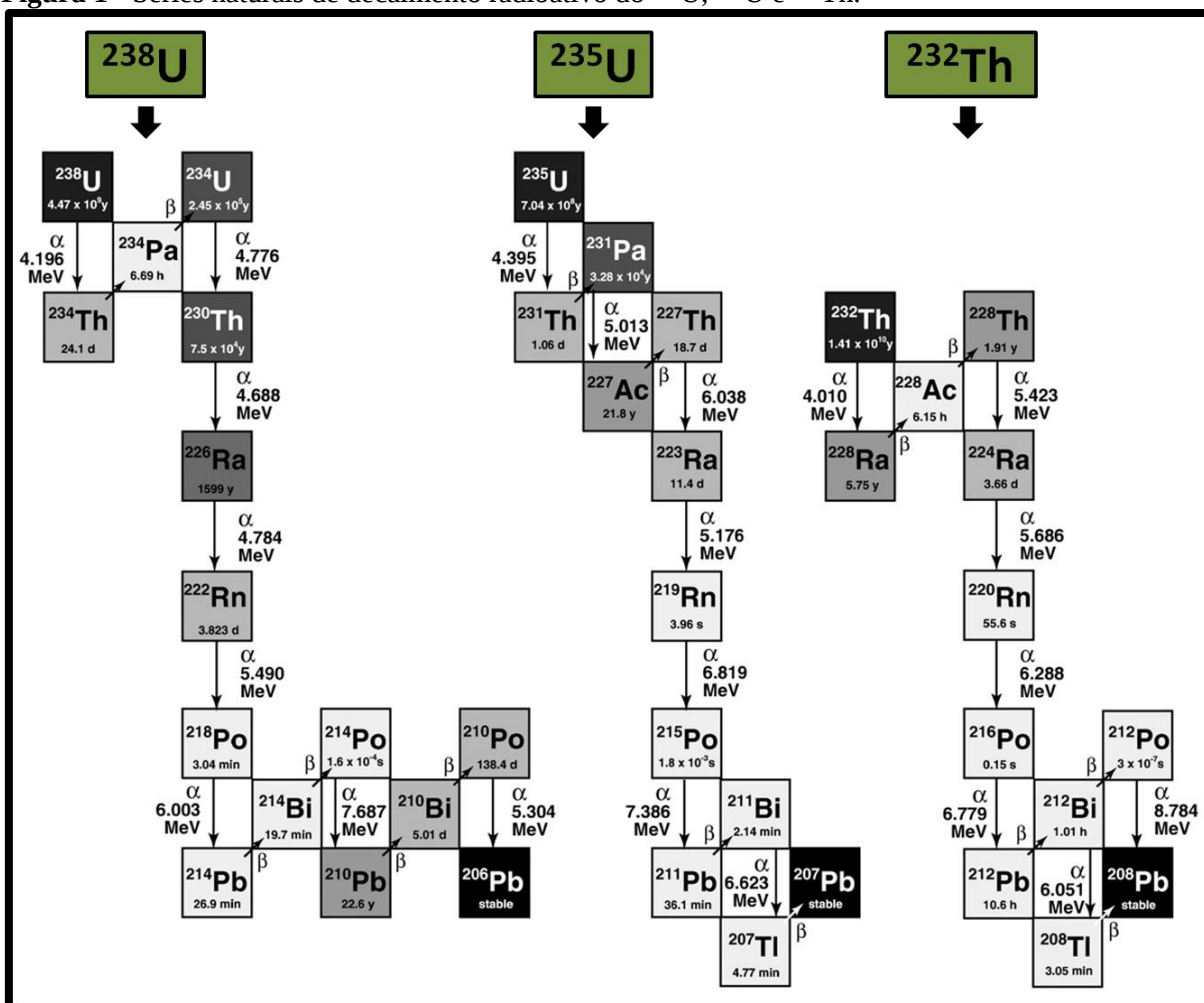
6.9 Relação entre concentração de Pb e fração de argila em amostras de solo do cenário 2.....	85
6.10 Relação entre concentração de Pb, fração de argila e atividade de Rn no cenário 1	87
6.11 Comparação entre concentração de Pb total para os cenários 1 e 2	91
6.12 Correlação de atividade de Rn e concentração de Pb total para ambos os cenários	91
7. Conclusão.....	94
8. Referências	96

1. Introdução

Ao se tratar dos diversos compartimentos que envolvem os problemas ambientais, a poluição causada por metais potencialmente tóxicos e elementos radioativos representa um dos temas mais relevantes justamente pelo quesito relacionando à periculosidade.

As fontes de radiação mais comuns às quais os seres humanos são expostos, provêm da radioatividade natural tanto da interação da radiação cósmica com a atmosfera como da crosta terrestre, que estão presentes na maior parte dos materiais geológicos, tendo em sua constituição elementos químicos radioativos como potássio (^{40}K), rubídio (^{87}Rb) e aqueles pertencentes às séries naturais de decaimento radioativo das famílias do urânio (^{235}U e ^{238}U) e do tório (^{232}Th) [1], conforme ilustração da Figura 1.

Figura 1 - Séries naturais de decaimento radioativo do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th .



Fonte: Adaptado de UNSCEAR, 2000 [2].

Pode-se verificar a relevância qualitativa e quantitativa da exposição dos seres vivos ao gás radônio quando se considera a dose de radiação oriunda de todas as fontes de radiação natural presentes no meio ambiente. Segundo dados do *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR, 2000), os valores apresentados na Tabela 1, indicam que o radônio e seus produtos de decaimento produzem cerca de 2/3 da dose efetiva oriunda das fontes naturais, apresentados pela média das doses anuais e individuais, expressas em microsievvert (μSv) [2].

Tabela 1 - Dose média de radiação e suas respectivas fontes.

Fonte	Dose efetiva anual (mSv)
Cosmogênita	15
^{40}K	180
^{87}Rb	6
^{226}Ra	19
^{214}Po	1100
^{210}Po	120
^{208}Th	160
Total	1600

Fonte: Adaptado de UNSCEAR, 2000[2].

O radônio é produzido no interior de rochas, e consequentemente em solos, que contenham em sua composição os elementos urânio (U) e rádio (Ra) e seus produtos de decaimento radioativo em equilíbrio secular. Por isso, estudos envolvendo análise de solos e rochas, quando se trata de radioatividade natural, adotam preferencialmente regiões caracterizadas com falhas geológicas [3-5].

Denominadas também de falhamentos geológicos, são descontinuidades formadas pela fratura das rochas superficiais da Terra (até cerca de 200 km de profundidade) quando as forças tectônicas superam a resistência das rochas.

Segundo Zarroca et al., as análises de gases emanados do solo (^{222}Rn , ^{220}Rn e CO_2) através de técnicas como tomografia de resistividade elétrica e refração sísmica, quando comparadas com os diferentes dados geoquímicos, geofísicos, hidrogeológicos das regiões, permitem concluir que os gases radônio e carbônico são liberados em maior quantidade em zonas de falhamento geológico [6].

Justamente pela característica intrínseca de liberarem maior quantidade de gás Rn, as regiões de falhas geológicas também podem ser alvo de estudos voltados à quantificação de metais, principalmente de chumbo (Pb) e bismuto (Bi) por estarem inseridos na série natural de decaimento radioativo do urânio e por isso são considerados radionuclídeos ou filhos de radônio [7, 8].

As concentrações desse metais nos solos e rochas, podem ser influenciadas por outros fenômenos naturais, como erupções vulcânicas, redistribuição por ação eólica ou hídrica [9, 10] ou por ações antropogênicas, como disposição de resíduos no solo, mineração, metalurgia, queima de resíduos, uso de fertilizantes, corretivos e outros insumos agrícolas [11, 12].

Portanto, dependendo da região a ser estudada, pode existir variadas fontes de liberação de urânio, tório, rádio, radônio e consequentemente de chumbo, por ser o elemento químico mais estável da série natural de decaimento radioativo do U. Por isso, estudos que visam diagnosticar o potencial radioativos e as concentrações de metais tóxicos torna-se cada vez mais importantes e necessários independente do território a ser explorado.

Quanto ao continente Europeu, existem alguns dados importantes relativos à Portugal no que concerne ao gás radônio. Teixeira e Faísca [13] efetuaram um levantamento preliminar das concentrações de radônio no ar do interior das habitações do território continental português, numa base de amostragem aleatória, o qual conduziu à detecção superior a 8% de habitações com valores superiores a 200 Bq.m^{-3} e 3% superiores a 400 Bq.m^{-3} . As maiores concentrações de Rn foram encontradas em distritos cujo substrato geológico é majoritariamente constituído por granitos, que são efetivamente, dentre a diversidade de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares que ocorrem no planeta, a variedade lítica que normalmente incorpora os mais elevados teores de urânio.

Em Castelo Branco, região central de Portugal, avaliou-se o teor de U e Th em mais de 50 pontos representativos, conforme avaliação prévia do fundo radiométrico dos principais litótipos aflorantes presentes na área. Os teores de Th enquadraram-se em um intervalo de 0 até 28 partes por milhão (ppm), onde os valores mais elevados

correspondem a bancadas de quartzitos provavelmente enriquecidas por minerais como zircão¹ e monazita², em áreas típicas de falhas geológicas [14].

Os teores de U variaram entre 2 e 14 ppm, sendo os mais elevados correspondentes à áreas de rochas graníticas. Em geral, atribui-se às rochas graníticas um potencial acrescido de Rn em relação a outras litologias devido a sua composição ter maior concentração em urânio.

Ressalta-se o fato de que em Portugal, as áreas urbanas onde têm sido detectadas concentrações elevadas de gás Rn, localizam-se em regiões de substrato majoritariamente de natureza granítica [15-17].

Ainda em Portugal, na região de Guarda, verificou-se a importância de estudos dosimétricos de elementos radioativos em habitações, isso devido a existência de falhas geológicas que proporcionam um teor radiométrico anômalo.

O granito de grão médio a grosseiro abundante nessa região proporciona a existência de elevados teores de U e Th, que combinado com a geomorfologia e condições meteorológicas do local favorecem elevada concentração de Rn nas habitações ocupadas pela população. Os valores médios de concentração de Rn são superiores a 400 Bq.m^{-3} , indicando que tal localidade possui um dos valores mais elevados de concentração de Rn e filhos de radônio no país [15, 18].

Ao se tratar de estudos voltados ao continente Americano, o Brasil ainda pouco destaca-se quanto as pesquisas voltadas à radioatividade natural, além disso é importante ressaltar os déficits da legislação que estabelece normas de base relativas à radiação.

Contudo, ainda pode-se relatar importantes estudos voltados a quantificação e identificação de Rn e filhos, como por exemplo no estado de Santa Catarina onde verificou-se valores superiores a 1000 Bq.m^{-3} em minas subterrâneas de fluorita [19].

Esse valor considerado elevado pode ser justificado devido à ineficiência do sistema de ventilação das minas, mesmo assim, segundo estudo os trabalhadores estão expostos a uma dose efetiva média na ordem de 12 mSv/a que não extrapola o valor limite determinado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) [20].

¹ Zircão: mineral presente em muitas rochas ígneas (como produto primário da cristalização), em rochas metamórficas (como grãos recristalizados) e rochas sedimentares (como grãos detríticos). O seu tamanho médio no granito varia de 100 a 300 μm .

² Monazita: mineral fosfato que têm em sua composição teor de cério, lantanídeo e tório, sendo que último pode chegar a 30% da composição total do mineral.

Segundo Vasconcelos [21], os resultados de análises dosimétricas em amostras de areia em praias do extremo sul da Bahia, indicaram que das sete localidades estudadas apenas duas (praias de Alcobaça e Cumuruxatiba) apresentaram os valores de atividades específicas do ^{238}U elevados, com a dose efetiva anual acima de 18 mSv/a. Com esse teor elevado de radiação, concluiu-se que em tais praias os valores médios de radiação superam até mesmo os valores médios mundiais.

Ainda no estado da Bahia, na região de Irecê (centro norte do estado), foram realizados estudos dosimétricos correspondentes à atividade gama total em solos e rochas aflorantes. Percebeu-se, segundo dados obtidos, que as rochas calcárias da região apresentavam baixos teores de U e relativamente elevados de Th, enquanto que para amostras de solos observou-se uma tendência de enriquecimento dos elementos radioativos, justificados principalmente pela absorção desses por frações de argilas típicas em solos [22].

No município de Lucrecia, Rio Grande do Norte, verificou-se a atividade de gás radônio em regiões formadas por rochas metamórficas de composição granítica e carbonática. Em todas as habitações estudadas, durante o período de medições, os valores de exalação de Rn ultrapassaram o limite máximo permitido pela Organização Mundial da Saúde (OMS) que é de 100 Bq/m^3 . Esses resultados estão atrelados ao fato da região estar inserida em uma importante área mineira geologicamente conhecida como Província Mineira da Borborema [23].

Sendo assim, tanto o território brasileiro quanto de Portugal mostram-se aptos a serem investigados e monitorados quanto ao teor de emissão de gás radônio e filhos de Rn, onde poderá se explorar o fator da radioatividade natural, intrínseco em ambas as regiões.

7. Conclusão

De acordo com os dados explanados no item 6, pode-se verificar que os menores valores de atividade de U^{235} foram de 6,800 e 6,900 Bq Kg⁻¹, respectivamente para as regiões de Sangemil e Oliveira do Hospital (rotatória) em contraste com o valor de 846,9 Bq Kg⁻¹ aferido no ponto 28 (P28) situado no Parque Municipal, também no município de Oliveira de Hospital.

Ao se tratar dos valores de atividade de U^{238} , verificou-se que os valores médios dessa atividade no cenário 1 são maiores que o valor médio mundial que equivale a 35 Bq Kg⁻¹. Pode-se apontar uma contribuição muito significativa da atividade desse radioisótopo, especificamente no ponto 28 (P28) do Parque Municipal de Oliveira do Hospital, que extrapolou o valor de 13280,0 Bq Kg⁻¹.

Em relação aos valores médios de atividade de Th^{232} constatou-se uma baixa amplitude, sendo a região de Sangemil com atividade média de 94,4 Bq Kg⁻¹ e a região de Penalva com 113,6 Bq Kg⁻¹. Tais valores são maiores do que o valor médio mundial que é de 30 Bq kg⁻¹, indicando que essas amostras de rochas são ricas em mineral de tório.

Para o cenário 1, a maioria dos valores de K ($^{238}U/^{230}Th$) encontram-se em uma razão que varia entre 0,7 e 1,8 que é indicativo de rochas ígneas recentes, confirmando tal característica das amostras em estudo.

Conforme aferição do teor de rádio e radônio nas amostras do cenário 1 via medidor AlphaGuard em contentores metálicos, com relação ao ^{226}Ra exalado observou-se um valor mínimo de 112,1 Bq Kg⁻¹ (P33) e máximo de 1034,8 Bq Kg⁻¹ (P28). Para os valores referentes à exalação do gás radônio, verificou-se em P17 o menor valor (11,38 Bq Kg⁻¹), e em P28 o maior valor correspondendo a mais de 630,0 Bq Kg⁻¹. Tais valores estão coerentes por se tratar de amostras de solos/rochas de regiões de granito, considerando os graus de alteração quando se trata de rochas.

Segundo o cálculo do coeficiente de emanção (E) das amostras de rochas graníticas, os valores variaram entre 0,13 e 0,39 corroborando com os valores esperados para amostras graníticas.

De acordo com os resultados obtidos para as concentrações de ^{222}Rn no leito das rochas para a região de Sangemil, foi possível desenvolver um croqui da região indicando a exalação de radônio geogênico. Para o valor mais alto, de 1.609.273 Bq m⁻³ de gás radônio, propôs-se como concentração anômalas ligada fortemente às falhas

geológicas enriquecidas de urânio, com provável mineralização pontual desse analito, classificando tal ponto no bloco de falha como anômalo.

Para as áreas de maior exalação de Rn associou-se também maior concentração da atividade de urânio. Para os pontos P3 e P16, tem-se os maiores valores da média de exalação de ^{222}Rn , de 965.592 e 1.295.474 Bq m⁻³ respectivamente; e também valores elevados para a concentração de atividade de urânio, sendo 17,7 e 28,7 mg Kg⁻¹ respectivamente.

As médias das concentrações de Pb total (aferidas via método eletroquímico) foram de 12,01 mg Kg⁻¹ para Sangemil; Oliveira do Hospital/Quinta (63,55 mg Kg⁻¹); Oliveira do Hospital/Penalva (6,438 mg Kg⁻¹); Oliveira do Hospital/Rotatória (4,167 mg Kg⁻¹) e Oliveira do Hospital/ Parque Municipal (6,870 mg Kg⁻¹). Tais valores encontram-se dentro dos permitidos para a Comunidade Europeia.

As amostras do cenário 1, mesmo apresentando valores radiométricos mais elevados, característicos de regiões de falhas geológicas e até mesmo de áreas enriquecidas de urânio, indicaram concentrações de Pb total relativamente baixas, sendo consideradas dentro na média natural de granitos.

Para os pontos B1 a B15 (cenário2) a variação de concentração de Pb foi em um intervalo de 23,41 a 371,23 mg kg⁻¹, sendo valores mais elevados que os aferidos em Portugal.

Quanto maior a distância dos pontos de coleta em relação à falha geológica, no cenário 2, os valores de concentração de chumbo e atividade de Rn tendem a diminuir, bem como a fração de argila nas amostras de solos. Portanto, conclui-se que existe uma relação direta no aumento da atividade de Rn em pontos que se encontram mais próximos à falha geológica, bem como o aumento da concentração de Pb total que é garantida pela presença de argila na composição do solo.

Existe uma relação de baixa magnitude entre as variáveis do cenário 1, que pode estar atrelada ao fato das amostras serem livres de fração argila, uma vez que são rochas do tipo graníticas e consequentemente apresentaram menor concentração de chumbo e maior atividade de gás radônio.

Por fim foi possível estabelecer duas correlações lineares entre as variáveis para as amostras do cenário 2. A primeira está relacionada aos pontos de amostragem mais distantes da falha geológica e a segunda reta é referente às amostras que estão mais próximas da falha geológica, e ambas possuem correlação estatística satisfatória.

8. Referências

- [1] TYKVA, R. and BERG, D. Man-made and natural radioactivity in environmental pollution and radiochronology. Dordrecht ; Boston, Kluwer Academic Publishers 2004, p.
- [2] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Report to the General Assembly, with Scientific Annexes**, v. Volume II, n. p. United Nations Sales Publication, New York, 2000.
- [3] PLANINIC, J.; RADOLIC, V. and LAZANIN, Z. Temporal variations of radon in soil related to earthquakes. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 55, n. 2, p. 267-272, 2001.
- [4] SHWEIKANI, R.; GIADDUI, T. G. and DURRANI, S. A. The Effect of Soil Parameters on the Radon Concentration Values in the Environment. **Radiation Measurements**, v. 25, n. 1-4, p. 581-584, 1995.
- [5] SCHROEDE, G.L.; KRANER, H. W. and EVANS, R. D. Diffusion of Radon in Several Naturally Occurring Soil Types. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, n. 2, p. 471-&, 1965.
- [6] ZARROCA, M., LINARES, R. BACH, J, ROQUE, C. , MORENO, V. , BAIXERAS, C Integrated geophysics and soil gas profiles as a tool to characterize active faults: the Amer fault example (Pyrenees, NE Spain). **Environment Earth Science** v. 67, n. p. 889–910, 2012.
- [7] AL-HILAR, M. and AL-ALI, A. Investigation for Uranium Dispersion Adjacent to Cretaceous Phosphatic Outcrops in Al-Nassrieh Basin, Southern Palmyrides, Syria. **Journal of Earth Science**, v. 27, n. 5, p. 786-795, 2016.
- [8] GIRAULT, F.; POITOU, C.; PERRIER, F.; KOIRALA, B. P. and BHATTARAI, M. Soil characterization using patterns of magnetic susceptibility versus effective radium concentration. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, n. 8, p. 2285-2293, 2011.
- [9] ESPINOSA, G., GOLZARRI, J.L., GAMMAGE, R.B., SAJO-BOJUS, L., VICCON-PALE, J., SIGNORET-POILLON, M. Seasonal variation measurements of radon levels in caves using SSNTD method. **Radiation Measurements**, v. 43, n. p. 364-368, 2008.
- [10] ALLOWAY, B. J., ed. *Heavy Metals in Soils*. 1 ed., ed. B. A. S. LTD. 1990.
- [11] DORAN, J. W. and ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 15, n. 1, p. 3-11, 2000.
- [12] APREA, C.; COLOSIO, C.; MAMMONE, T.; MINOIA, C. and MARONI, M. Biological monitoring of pesticide exposure: a review of analytical methods. **Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences**, v. 769, n. 2, p. 191-219, 2002.
- [13] TEIXEIRA, M. M. R. F., M.C. . Concentração de radão em habitações a nível nacional. **III Conf. Nacional sobre a Qualidade do Ambiente**, v. 2, n. p. 522-531, 1992.
- [14] FIGUEIREDO, J. M. S. **O radão nos materiais geológicos da área urbana de Castelo Branco**. . 1998. f. - Depto Ciências da Terra, Universidade de Coimbra,, Coimbra.
- [15] PEREIRA, A. J. S. C.; BARBOSA, S. M.; NEVES, L. J. P. F. and AUMENTO, F. Soil-gas radon monitoring in an active granite quarry from central Portugal. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, n. 7, p. 1845-1849, 2011.

- [16] NEVES, L. J. P. F.; BARBOSA, S. M. and PEREIRA, A. J. S. C. Indoor radon periodicities and their physical constraints: a study in the Coimbra region (Central Portugal). **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 100, n. 10, p. 896-904, 2009.
- [17] NEVES, L. J. P.; PEREIRA, A. J. S. and GODINHO, M. M. The role of cooling rate on the Al-Si order of K-feldspar in the Hercynian Tabua granite, central Portugal. **Canadian Mineralogist**, v. 39, n. p. 85-92, 2001.
- [18] MARTINS, L. M. O.; GOMES, M. E. P.; TEIXEIRA, R. J. S.; PEREIRA, A. J. S. C. and NEVES, L. J. P. F. Indoor radon risk associated to post-tectonic biotite granites from Vila Pouca de Aguiar pluton, northern Portugal. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 133, n. p. 164-175, 2016.
- [19] SANTOS, C. E. L. C., R. V. ; VIGNOL, M. L. ; XAVIER, A ; GOUVEA, V. ; MACACINI, J. F. Estimate Of Radiation doses to workers in underground mines of coal and fluorite in the Brazilian state of Santa Catarina and considerations on the optimisation of radiation protection **International Nuclear Atlantic Conference**, v. 1, n. p. 2009.
- [20] CNEN, *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*, C. N. D. E. NUCLEAR, Editor. 2005: Brasil.
- [21] VASCONCELOS, D. C. L., C. P. B. ; OLIVEIRA, A. H. ; OLIVEIRA, A. H. ; SANTOS, T.O ; ROCHAZ. ; MENEZES, M. A. B. Determination of natural radioactivity in beach sand in the extreme south of Bahia, Brazil, using gamma spectrometry **Radiation Protection and Environment**, v. 0972-0464, n. p. 178-184, 2011.
- [22] FERREIRA, C. M.-N., L.M; NORDEMAN, D.JR. A RADIOATIVIDADE NATURAL DA REGIÃO DE IRECÊ, BA. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 2, n. 22, p. 167-174, 1992.
- [23] CAMPOS, T. F. C., PRETTA, R.A., MALANCA,A., PASTURA, V.F.S., SICHEL, S.E., MOTOKI, A. O Gás Radônio Doméstico e a Radioatividade Natural Em Terrenos Metamórficos: o Caso do Município de Lucrecia (Rio Grande do Norte, Brasil). **Revista de Geologia**, v. 26, n. 2, p. 85-93, 2013.
- [24] GOMEZ, D. P.; NEVES, L.; PEREIRA, A. and NEILA, C. G. Natural radioactivity in ornamental stones: an approach to its study using stones from Iberia. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 70, n. 4, p. 543-547, 2011.
- [25] JELINEK, A. J. and FITTING, J. E. Studies in the natural radioactivity of prehistoric materials. Ann Arbor,, University of Michigan 1965, p.
- [26] HULT, M. A., E; GONZ DE ORDUNA, R.; POMM, S; YELTEPE, E. . Quantification of uranium-238 in environmental samples using gamma-ray spectrometry. **EPJ Web of Conferences** v. 24, n. p. 1-12, 2012.
- [27] OTTON, J. K., GUNDERSEN, L.C.S., SCHUMANN, R. The Geology of Radon. **Department of the Interior/U.S**, v. Geological Survey, n. Disponível em <<http://energy.cr.usgs.gov/radon/georadon.html>> Acesso em 25/10/2013, p. 1995.
- [28] PORSTENDOFER, J. Properties and behaviors of radon and thoron and their decay products in the air. . **Commission of the European Communities - International Symposium on the Natural Radiation Environment**, v. 50, n. p. 1993.
- [29] ALENCAR, A. S. E. F., A.C. Reference levels of natural radioactivityfor the beach sands in a Brazilian southeastern coastal region. **Radiation Measurements**, v. 40, n. p. 76-83, 2005.

- [30] ATTIX, F. H., ed. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. 1986, Wiley and Sons: USA.
- [31] SURVEY, U. S. G. Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps. **Geological Survey Publication**, v. Version 1.2, n. p. 2018.
- [32] ANASTASIA, D. J., ERSLEV E.A., FISHER, D.M.,. Fault-related folding. **Journal of Structural Geology** v. 19, n. p. 602, 1997.
- [33] DAVIS, G. H. A. R., S., ed. *Structural Geology of Rocks and Regions*. ed. WILEY. 1996.
- [34] RUTQVIST, J., WU, Y. S, TSANG, C. F., CF, BODVARSSON,G. . A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 39, n. 4, p. 429-442, 2002.
- [35] JACKSON, J., PRIESTLEY, K., ALLEN, M. AND BERBERIAN, M. Active Tectonics of the South Caspian Basin. **Geophysical Journal International**, v. n. 148, p. 214-245, 2002.
- [36] SAADI, A. M., M. N., ed. *Map and Database of Quaternary Faults and Lineaments in Brazil*, ed. U. S. G. SURVEY. Vol. 1. 1999: Denver/Colorado:.
- [37] BALCAZAR, M.; GONZALEZ, E.; ORTEGA, M. and FLORES, J. H. Geothermal-Energy Prospecting in El-Salvador. **Nuclear Tracks and Radiation Measurements**, v. 22, n. 1-4, p. 273-276, 1993.
- [38] SANTANNA, L. G.; SCHORSCHER, H. D. and RICCOMINI, C. Cenozoic tectonics of the Fonseca Basin region, eastern Quadrilatero Ferífero, MG, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 10, n. 3-4, p. 275-284, 1997.
- [39] LAMAS, R.; MIRANDA, M. M.; PEREIRA, A. J. S. C.; NEVES, L. J. P. F.; FERREIRA, N. and RODRIGUES, N. V. 3-D distribution of the radioelements in the granitic rocks of northern and central Portugal and geothermal implications. **Journal of Iberian Geology**, v. 43, n. 1, p. 3-12, 2017.
- [40] CABRAL, J., RIBEIRO, A. . Carta neotectónica de Portugal Continental, escala 1/1000000. . **Serviços Geológicos de Portugal**, v. 1, n. p. 1988.
- [41] GOLDSCHTIDT, V. M. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. **J. Chem. Soc**, v. n. p. 655-673, 1937.
- [42] MAROCCHI, M., RIGHI, S., BARGOSSO, G. M., GASPAROTTO, G. Natural radionuclides content and radiological hazard of commercial ornamental stones, an integrated radiometric and mineralogical-petrographic study. . **Radiation Measurements**, v. 46, n. p. 538-545, 2011.
- [43] BASTOS, R. O., APPOLONI, C. . Radioactivity of rocks from the geological formations belonging to the Tibagi river hydrographic basin. **International Nuclear Atlantic Conference**, v. 1, n. p. 2009.
- [44] EL-ARABI, A. Ra-226, Th-232 and K-40 concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications. **Radiation Measurements**, v. 1, n. 42, p. 94-100, 2007.
- [45] MOURA, C. L., ARTUR, A., BONOTTO, D. M., GUEDES, S., MARTINELLIC, D. M. Natural radioactivity and radon exhalation rate in brazilian igneous rocks. . **Applied Radiation and Isotopes**, v. n. p. 2011.
- [46] DIJKERMAN, J. C. Pedology as a science: The role of data, models and theories in the study of natural soil systems. **Geoderma**, v. 11, n. 2, p. 73-93, 1974.

- [47] EMBRAPA, *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, C. N. D. P. D. SOLOS, Editor. 2018: Rio de Janeiro.
- [48] STAFF, S. S., *Soil survey manual*, D. O. AGRICULTURE, Editor. 1951: United States.
- [49] LEPSCH, I. F. 19 lições de pedologia fácil. **São Paulo: Oficina de Textos**, v. n. p. 456, 2011.
- [50] AZEVEDO, A. C. T., P. V., *Química e Mineralogia do Solo*, V. S. B. D. C. D. SOLO, Editor. 2009. p. 381-426.
- [51] ABNT, *NBR 6502 - Rochas e solos - Terminologia*, A.-A. B. D. N. TÉCNICAS, Editor. 1995: Rio de Janeiro.
- [52] LEMOS, R. C. S., R.D, *Manual de descrição e coleta de solo no campo*, in *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, C. N. D. P. D. SOLOS, Editor. 1996: Campinas.
- [53] CURCIO, G. R. L., V.C; GIAROLA, N.F.B, *Antropossolos: proposta de ordem (1º aproximação)*, EMBRAPA, Editor. 2004, 1: Colombo.
- [54] AHBERG, G., GUSTAFISSON, O., WEDEL, P. . Leaching of metals from sewage sludge during one year and their relationship to particle size. **Environ. Pollut.** , v. 144, n. p. 545-553, 2006.
- [55] ADRIANO, D. C. Trace elements in the terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. **Springerplus**, v. 1, n. p. 2001.
- [56] KETTERER, M. E., LANE, D.A., JORDAN, J.A. . Unusually Radiogenic Lead (Pb) in Ashtabula River Sediments: An Isotopic Tracing Case Study Using Quadrupole ICP-MS. . **Open Chem. Biom.Meth. J**, v. 2, n. p. 2010.
- [57] KOMARE, M., ETTLER, V., CHASTNY, V., MIHALJEVIC, M. . Lead isotopes in environmental sciences: A review. . **Environ. Intern.**, v. 34, n. p. 562-577, 2008.
- [58] BOLLHOFFER, A., CHISHOLM, W, ROSMAN, K.J.R. . Sampling aerosols for lead isotopes on a global scale. . **Anal. Chim. Acta**, v. 390, n. p. 227-235, 1999.
- [59] CHENG, H., HU, Y. . Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: A review. . **Environ Pollut.**, v. 158, n. p. 1134-1146, 2010.
- [60] AMBIENTE, C.-C. N. D. M., *Critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas*, CONAMA, Editor. 2009, 420.
- [61] CETESB. Valores orientadores para solo e água subterrânea, Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/noticia/596,Noticia>>. Acesso em: 22/11/2014
- [62] AMBIENTE, A.-A. P. D., *Qualidade do Ar em Espaços Interiores: Um Guia Técnico*, D. O. MINISTÉRIO DO AMBIENTE, DO TERRITÓRIO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, Editor. 2009: Amadora.
- [63] PROENCA, C. A. B., N. ; MAROUBO, L. ; MOREIRA-SILVA, M. R. ; GOMES, HOMERO M. ; TEIXEIRA, M. F. S. Simultaneous determination of Cd, Pb, and Cu in atmospheric particulate matter from different regions of the city of Presidente Prudente, Sao Paulo, Brazil. **Chemistry and Ecology**, v. 32, n. p. 598-607, 2016.
- [64] MOREIRA-SILVA, M. R. J. T., C, A, S; NUNES, J. O. R; GODOY, M; TEIXEIRA, M.F.S. Evidence for a correlation between total lead concentrations in soils and the presence of geological faults. **Environmental Chemistry Letter**, v. n. p. 2017.

- [65] PEREIRA, A. J. S. C.; GODINHO, M. M. and NEVES, L. J. P. F. On the influence of faulting on small-scale soil-gas radon variability: a case study in the Iberian Uranium Province. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 101, n. 10, p. 875-882, 2010.
- [66] ROSS, J. L. S. M., I.C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, n. p. 1996.
- [67] AGROPECUÁRIA-EMBRAPA, E. B. D. P., *Sistema brasileiro de Classificação de Solos*, in *Brasília-DF: Serviço de Produção de Informação*. 1999.
- [68] FUSHIMI, M. N., J. O. R. Principais classes de solos do município de Presidente Prudente-SP: identificação e caracterização. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 32, n. 1, p. 45-58, 2012.
- [69] GODOY, M. C. T. F. B., MARCOS NORBERTO ; SANAIOTTI, D. C. ; SILVA, JOEL BATISTA DA, *Contaminação das águas subterrâneas por nitrato em Presidente Prudente - SP, Brasil*, in *Revista do Instituto Adolfo Lutz*. 2004: São Paulo-SP. p. 208-214.
- [70] GODOY, M. C. T. F. S., L. E. ; SOUZA FILHO, A, *O risco tecnogênico no planejamento físico-territorial: exemplo de área de ampliação do Distrito Industrial de Presidente Prudente - SP*, in *Caderno Prudentino de Geografia*. 2002: Presidente Prudente-SP. p. 74-92.
- [71] CETESB. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. CETESB, GTZ. v. 2.ed., n. São Paulo., p. 2001.
- [72] SILK, E. C. H. B., R. S. Examination of fission fragments tracks with an Electron Microscope. **Philosophical Magazine**, v. 4, n. p. 970-971, 1959.
- [73] DE PAULO, S. R. **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**. 1991. f. - UNICAMP, Campinas/SP.
- [74] GUEDES, S.; HADLER, J. C.; IUNES, P. J.; NAVIA, L. M. S.; NEMAN, R. S.; PAULO, S. R.; RODRIGUES, V. C.; SOUZA, W. F.; TELLO, C. A. and ZUNIGA, A. Indoor radon and radon daughters survey at Campinas-Brazil using CR-39: First results. **Radiation Measurements**, v. 31, n. 1-6, p. 287-290, 1999.
- [75] ABU-JARAD, F. W., C. K.; FREMLIN, J. H. The registration of the alpha particles from polonium isotopes plated-out on the surface of the plastic detectors Lr-115 and Cr-39. **Nuclear Tracks and Radiation Measurements**, v. 5, n. p. 285-290, 1981.
- [76] LIMA, R. M. F. L., J. A. M. Análise Granulométrica em Técnicas que se Baseiam em Sedimentação Gravitacional: Lei de Stokes. **Revista da Escola de Minas**, v. 54, n. Ouro Preto, p. 155-159, 2001.
- [77] EMBRAPA, E. B. D. P. A.-. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*, E. S. E. I. A. E. C. P. T. D. TECNOLOGIA, Editor. 1999: Brasília. p. 370.
- [78] USEPA, U. S. E. P. A.-. *Method 3050 Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils.* , E. C. N. 68-03-3254, Editor. 1988: USA.
- [79] ALMEIDA, A. M. Determinação voltamétrica de molibdênio (VI) utilizando um sistema ternário homogêneo de solventes. **Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química**, v. n. p. 2003.
- [80] GRAY, A. W. Minimum Critical Mass of Uranium-235 Reflected by Natural Uranium in Water. **Nuclear Technology**, v. 12, n. 4, p. 342-347, 1971.

- [81] ALLEGRE, C. J., CONDOMINES, M. Fine chronology of volcanic process using U-Th systematics. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 28, n. p. 395-406, 1976.
- [82] CONDOMINES, M., HERMOND, C., ALLEGRE, C. J., U-Th-Ra radioactive disequilibria and magmatic processes. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 90, n. p. 243-262, 1988.
- [83] GILL, J. B., PYLE, D., WILLIAMS, R.W. Igneous rocks - uranium series disequilibrium. **Applications to Earth, Marine and Environmental**, v. 2, n. p. 1992.
- [84] SAKODA, A. I., Y.; YAMAOKA, K. A. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. . **Applied Radiation and Isotopes**, v. 69, n. p. 1422–1435, 2011.
- [85] PEREIRA, A.; LAMAS, R.; MIRANDA, M.; DOMINGOS, F.; NEVES, L.; FERREIRA, N. and COSTA, L. Estimation of the radon production rate in granite rocks and evaluation of the implications for geogenic radon potential maps: A case study in Central Portugal. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 166, n. p. 270-277, 2017.
- [86] MEHRA, R. B., P. Estimation of annual effective dose due to radon level in indoor air and soil gas in Hamirpur district of Himachal Pradesh. **Journal of Geochemical Exploration**, v. n. p. 2013.
- [87] BOURAI, A. A. A., S; DANGWAL, A; RAWAT, M; PRASAD, M. Measurement of radon flux and soil-gas radon concentration along the main central thrust, Garhwal Himalaya, using SRM and RAD7 detectors. **acta Geophysica**, v. 4, n. 61, p. 950-957, 2013.
- [88] LUBIN, J. H. B., J. D; EDLING, C.; HORNUNG, R. W., *Radon and Lung Cancer Risk: a Joint Analysis of 11 Underground Mines Studies*, in *US Department of Health and Human Services*: Washington.
- [89] ENVIRONMENT, C. C. O. M. O. T., *Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health*, C. C. O. M. O. T. ENVIRONMENT, Editor. 1999: Canadá.
- [90] ATSDR, *Toxicological Profile for lead.*, D. O. P. H. A. H. S.-P. H. SERVICE, Editor. 2007: Atlanta.
- [91] BECKETT, P. H. T., *Critical tissue concentrations as indicators of toxicity*. 1991.
- [92] MELO, V. F. Z., S.; ANDRADE, A.M.; BROSKA, C.Z. Chumbo em solos às margens de estradas na região metropolitana de Curitiba. **Revista Acadêmica de Ciência Agrária e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 45-57, 2010.
- [93] OLSZOWY H, T. P., IMRAY P, SMITH P, HEGARTY J, HASTIE G. Trace element concentrations in soils from rural and urban areas of Australia. **Australian Health Commission**, v. 4, n. p. 1995.
- [94] ALBERT, H. P., M. Trace elements in soils. **Elsevier Scientific Publishing Company**, v. n. p. 395, 1977.
- [95] XIAN, X. Effect of Chemical Forms of Cadmium, Zinc, and Lead in Polluted Soils on Their Uptake by Cabbage Plants. **Plant and Soil**, v. 113, n. 2, p. 257-264, 1989.
- [96] ALLEONI, L. R. F.; PEIXOTO, R. T. D.; DE AZEVEDO, A. C. and MELO, L. C. A. Components of Surface Charge in Tropical Soils With Contrasting Mineralogies. **Soil Science**, v. 174, n. 11, p. 629-638, 2009.