



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE MEDICINA DA BAHIA**

Mestrado em Saúde, Ambiente e Trabalho

Largo do Terreiro de Jesus – Centro Histórico,

40.026-010, Salvador, Bahia Brasil

Telefax: 55-71-3283-5572; 3283-5573; Cel.:8726-4059

e-mail: sat@ufba.br

<http://www.sat.ufba.br/>



ADELSON SILVA DE BRITO

**MEDIÇÃO DE CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO EM
AMBIENTES DA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR, BA**

Dissertação de Mestrado

Salvador (Bahia), 2013

UFBA/SIBI/Bibliotheca Gonçalo Moniz: Memória da Saúde Brasileira

Brito, Adelson S. de
B862 Medição de concentrações de radônio em ambientes da Região Metropolitana de Salvador, BA/Adelson Silva de Brito. - Salvador: 2013.

159 f. : il. [fotogr.; tab.; graf. diagr.]

Anexos.

Orientadora: Profª Drª Rita de Cássia Franco Rego.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Medicina da Bahia, 2013.

1. Radônio. 2. Ar – Poluição – Salvador, BA. 3. Química atmosférica. 4. Urânio.
I. Rego, Rita de Cássia Franco. II. Universidade Federal da Bahia. Faculdade de Medicina da Bahia. III. Título.

CDU – 546.296

ADELSON SILVA DE BRITO

**MEDIÇÃO DE CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO EM
AMBIENTES DA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR, BA**

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Saúde, Ambiente e Trabalho da Faculdade de Medicina da Bahia da Universidade Federal da Bahia, como pré-requisito obrigatório para a obtenção do grau de Mestre em Saúde, Ambiente e Trabalho.

Orientadora: Profa. Rita de Cássia Franco Rêgo

Salvador (Bahia), 2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE MEDICINA DA BAHIA**

Mestrado em Saúde, Ambiente e Trabalho

Largo do Terreiro de Jesus – Centro Histórico,
40.026-010, Salvador, Bahia Brasil.

Telefax: 55-71-3283-5572; 3283-5573; Cel. 8726-4059

e-mail: sat@ufba.br

<http://www.sat.ufba.br/>

**MEDIÇÃO DE CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO EM
AMBIENTES DA REGIÃO METROPOLITANA DE
SALVADOR, BA.**

Mestrando: Adelson Silva de Brito

SSA, BA 29 de Abril de 2013.

Dissertação apresentada ao Colegiado do
Curso de Pós-Graduação em Saúde,
Ambiente e Trabalho da Faculdade de
Medicina da Universidade Federal da Bahia,
como pré-requisito obrigatório para a
obtenção do grau de Mestre em Saúde,
Ambiente e Trabalho.

Aprovada em 29 de Abril de 2013

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Rita de Cássia Franco Rêgo / UFBA
Orientadora

Prof. Dr. Marcus Vinicius Teixeira Navarro / IFBA/UFBA

Profa. Dra. Maria do Rosário Zucchi /IF-UFBA

Banca Examinadora

Membros Titulares

Maria do Rosário Zucchi, Doutora em Física pela Universidade de São Paulo, SP, Brasil (2001), professora Adjunta do Departamento de Física do Estado Sólido do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia.

Marcus Vinícius Teixeira Navarro, Doutor em Saúde Pública pelo Instituto de Saúde Coletiva da Universidade Federal da Bahia (UFBA) (2007), professor Adjunto do Instituto de Educação Federal da Bahia, Professor colaborador do Programa de Pós-Graduação em Saúde, Ambiente e Trabalho, Salvador, BA, Brasil.

Rita de Cássia Franco Rêgo, (professora orientadora) Doutora em Saúde Pública pelo Instituto de Saúde Coletiva da Universidade Federal da Bahia (UFBA) (2002), professora Associada do Departamento de Medicina Preventiva e Social da Faculdade de Medicina da Bahia da Universidade Federal da Bahia, Professora permanente do Programa de Pós-Graduação em Saúde, Ambiente e Trabalho, Salvador, BA.

“... é difícil ser negro, é difícil ser intelectual no Brasil. Essas duas coisas juntas, dão o que dão... É difícil ser negro, por que fora das situações de evidencia, o cotidiano é sempre muito pesado (para os negros). É difícil ser intelectual por que não faz parte da Cultura Nacional ouvir tranquilamente uma palavra crítica...”

– Milton de Almeida Santos, Negro, Geógrafo, Professor, Doutor.

AGRADECIMENTOS

Qpé ni fun Qlórun!

Qlórun awọn qlórun. Kabiyeesi, Qba awọn qba. Olódùmarè... Qlórun agbalagba...

Arúgbo ojó.

Agradeço a Solange, minha companheira, esposa, e cúmplice pelo amor, compreensão e apoio. A minha família pela paciência e apoio incondicional.

Agradeço a Professora Rita Rêgo, ao tempo que a parabenizo pela sua garra de guerreira, e por ter topado o desafio de orientar o trabalho de um físico ingressando na área de Saúde, Ambiente e Trabalho em uma empreitada pioneira.

Agradeço ao Professor Zildete Rocha, Pesquisador Sênior do CDTN-BH, pela amizade, e pelo apoio decisivo para que essa Dissertação evoluísse da concepção teórica para a realidade. Sem a sua participação essa Dissertação não aconteceria;

Agradeço a todos os técnicos do CDTN-BH na pessoa da Talita Oliveira Santos, essa jovem mestra recentemente empossada como Professora de Radiologia na UFMG, pela colaboração antes durante e depois das minhas recentes passagens por Belo Horizonte;

Agradeço ao Professor Fernando Martins Carvalho por ser como é e fazer o que faz, tendo participado desse projeto, a partir de uma iniciativa natural, me dando apoio instrumental.

Agradeço aos Colegas de Turma pela convivência recheada por uma Riqueza Espiritual única.

Agradeço a Solange Xavier pela amizade, pelo trabalho e pela atenção profissional. Agradeço a “Inha” pela sua presença especial na Secretaria do PPGSAT;

Agradeço ao Professor Dr. Thomas Ferreira da Costa Campos do LARANA/UFRN, pela ideia disparadora do Artigo 2 dessa Dissertação;

Agradeço a todos os professores do PPGSAT, nas pessoas dos Professores Verônica Cadena, Luis Roberto Moraes e Severino Agra, mestres de quem aprendi novos enfoques sobre velhos temas;

Agradecimento especial, contudo aos Professores Marco Rêgo e Paulo Gilvane Pena, pela participação direta em eventos que aumentaram o meu campo de atuação;

Agradeço ao Professor Dr. Antonio Expedito Azevedo, meu eterno professor de Mecânica Clássica que me abriu as portas do LFNA/UFBA;

Agradeço a Professora Dra. Maria do Rosário Zucchi, mestra, amiga e incentivadora e minha orientadora da minha jornada pelo LFNA/UFBA;

Agradeço ao Professor Dr. Alexandre Barreto Costa, chefe do LFNA/UFBA, pela acolhida e pela disposição em ajudar sempre que sua intervenção se mostrou necessária (e não foram poucas vezes);

Agradeço ao Professor Dr. Marcus Navarro que formulou o convite para uma palestra que ministrou na Faculdade de Medicina, fato que me levou a conhecer o PPGSAT em trouxe até aqui;

Agradeço a Emanuel Lopes, um irmão muito importante, pelos 40 anos de amizade e pelo gesto que teve para comigo durante um importante período;

Além de Emanuel, agradeço também a toda a Família Lopes: seu Jaime, e Dona Jú, Tom, Jaiminho, Norma, Marlene, Ângela, Carlos e Marcos, pelo testemunho e compartilhamento de uma história de vida;

Agradeço ao meu compadre Bartolomeu (Memeu) e minha comadre Conceição pais da minha afilhada Divanize Izabel, que avalizaram a compra da minha passagem de ida ao Japão em 1991.

DEDICATÓRIA

Dedico essa Dissertação a Solange, minha cúmplice, essa negra-índia que é Mestra na disciplina Saber Natural, por tantos anos de amor, história e comunhão, e por ter criado a nossa filha na minha ausência, tornando-a uma cidadã de bem. Dedico também as minhas filhas, Maria das Graças e, Silvana, as duas belezas e tesouros da minha vida. A Maria Dias de Oliveira (Mariá), mãe de minha filha Silvana, por ter criado a nossa filha na minha ausência, tornando-a uma cidadã de bem. Aos meus netos, Bruno, Ludmila e Marcos Júnior, aos meus pais Jandir e Conceição Maria (in memoriam), essa mulher primeira a ver na educação o único caminho para a Emancipação e a Liberdade, aos meus tios e tias, em especial ao meu tio Arnaldo, que me mostrou o caminho do samba, que muito me valeu na minha jornada nas terras estrangeiras, quando vivi no Japão de 1991 a 2006. Dedico à memória de Mieko Nagai de Brito (in memoriam), minha esposa nipo-brasileira a quem agradeço a minha vivência Japonesa. Ao meu tio José Carlos Silva (in memoriam) que com determinação e luta progrediu em pouco tempo do analfabetismo para o púlpito do ensino de Inglês, graças a sua inteligência e perseverança, me servindo como exemplo e modelo e as minhas primas Sara e Soraia. Dedico também a minha tia Valdete ("minha tia Detinha"), uma mulher negra simples e forte como Acotirene e Dandara e aos meus primos Beto, Carmem, Laudelina, Sueli, Rosinha e seus filhos. Dedico também aos amigos: Jorginho (Jorge Teixeira), Vevé (Everaldo Lázaro), meu compadre Vadinho (Creosvaldo) e meu afilhado Marcelo, meu compadre Memeu (Bartolomeu) e minha afilhada Divanize Izabel, a Dido (Francisco Sá), ao meu irmão Dizinho (Jandir Filho, in memoriam). Dedico aos meus filhos que ainda não tive o prazer de conhecer pessoalmente. Dedico essa dissertação também ao povo que vive na Região Uranífera de Caetité e Lagoa Real, todo o povo afrodescendente, ao povo japonês e ao povo nipo-brasileiro, a minha família estendida de sangue, a minha família de lutas e axé, e ao povo africano, em especial os povos da Nigéria, de Angola e da Guiné Equatorial que me fazem tanto bem.

Um prólogo sobre a formação de um Grupo de Física Ambiental traduzido em algumas das línguas que estudo e desenvolvo interesse:

Environmental Physics, as its name implies, is the application of the principles of physics to problems in the natural environment. Members of the Group are drawn from areas as diverse as geomagnetism and agriculture. Physics can never be taken in isolation when dealing with environmental problems. It does however play a pivotal role in exploring, monitoring and above all understanding the world we live in, and our effects on it, both on local and a global scale.

環境物理学は、その名前が示すように、自然環境の問題への物理学の原理を応用したものである。グループのメンバーは、地磁気や農業など広範な分野から描かれています。環境問題を扱うときに物理学は、単独で取られることはありません。しかしそれは私たちが住んでいる世界、監視を検討することにし、すべての理解上極めて重要な役割を果たしており、その上に、両方のローカルおよびグローバルな規模で私たちの効果。

Физики окружающей среды, как следует из ее названия, является применение принципов физики к проблемам окружающей среды. Члены группы взяты из таких разнообразных областях, как Геомagnetизм и сельского хозяйства. Физики никогда не могут быть приняты в изоляции при работе с экологическими проблемами. Она тем не менее играют ключевую роль в изучении, мониторинге и прежде всего понимание мира в котором мы живем, и наше влияние на нее, как на местном, так и глобальном масштабе.

مجالات مثل فيزيق أعضاء ويتممي الطي عي الة البيئي في لمشكال فيزياء بهادى تطيق هي اسمها، يدل كم البيئي في فيزياء ل عديل ذلك ومع البيئي في لمشكال مع ذلك عامل عديل العزل الق فيزياء في تؤخذ أن بلداي يمكن لا والزراعة ان ضح نبال تمنوع المحلبي تسواء حد عدل ذلك، عدل وين اثار. وفي عن عيش الذي العال ف همش يء كل قبل وورص دلتك ش اف في محوري دورا علمين طاق وعلى

Physique de l'Environnement, comme son nom l'indique, est l'application des principes de la physique aux problèmes de l'environnement naturel. Les membres du groupe sont issus de domaines aussi variés que le géomagnétisme et l'agriculture. Physique ne peut jamais être pris isolément lorsqu'il s'agit de problèmes environnementaux. Cela ne va cependant jouer un rôle central dans l'exploration, le suivi et surtout la compréhension du monde dans lequel nous vivons, et nos effets sur elle, à la fois sur une échelle locale et mondiale.

Física Ambiental, como o próprio nome indica, é a aplicação dos princípios da física a problemas no ambiente natural. Os membros do Grupo são provenientes de áreas tão diversas como geomagnetismo e agricultura. Física nunca pode ser considerada isoladamente quando se lida com os problemas ambientais. Isto, contudo, desempenhar um papel central na exploração, monitoramento e, acima de tudo a compreensão do mundo em que vivemos, e os nossos efeitos sobre ele, tanto no local e uma escala global.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACS	American Cancer Society
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
AMA	American Medical Association
ANL	Argonne National Laboratories
APHA	American Public Health Association
ASTM	American Society for and Testing Material
BEIR VI	Biological Effects Biological Effects of Ionizing Radiation
BG	Background Radiation
CCOHS	Canadian Center for Occupational Health and Safety
CDC	Centers for Disease Control and Prevention
CE	Chemical Elements
CDTN	Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CPT	Comissão Pastoral da Terra
DNA	Deoxyribonucleic acid
DU	Depleted Uranium
DUA	Diuranato de amônio
EC	Exposição Cumulativa
EIC	Electret Ion Chamber

EPA	Environmental Protection Agency
ER	Equilibrium Ratio
FAMEB	Faculdade de Medicina da Bahia da Universidade Federal da Bahia
GT	Geological Time
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços
IEM	Integrated Environment Management, Inc
IF-UFBA	Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
LFNA-IF	Laboratório de Física Nuclear Aplicada do Instituto de Física
MA	Média Aritmética
MCL	Maximum Contaminant Level
MG	Média Geométrica
NORM	Naturally Occuring Radioactive Material
NRC	National Research Council
OMS	Organização Mundial de Saúde
PCE	Painel de Ciências do Espaço
PIB	Produto Interno Bruto
PPGSAT	Programa de Pós-Graduação em Saúde, Ambiente e Trabalho
RCR	Russian Chemical Reviews
RDPs	Radon Decay Products
RLAM	Refinaria Ladulpho Alves- Mataripe

SI	Sistema Internacional
SLRDs	Short-Lived Radon-222 Daughters
SRGC	Student Resources for General Chemistry
SSNTD	Solid State Nuclear Track Detectors
STOA	Scientific and Technological Options Assessment
TN	Tribuna do Norte
TNAP	The National Academy Press
TNT	Trinitrotulueno
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UFTPR	Universidade Federal Tecnológica do Paraná
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
URA	Região Uranífera de Caetité e Lagoa Real
USA	United States of America
USCSS & T	U.S. Congress Committee Subgroup on Sciences & Technology
UMNSPH	University of Minnesota School of Public Health
WHO	World Health Organization
WL	Working Level
WLM	Working Level Month
WNA	World Nuclear Association

PRICIPAIS SÍMBOLOS E UNIDADES

Símbolo	Significado
Bq	Becquerel
Bq/m ³ , ou Bq.m ⁻³	Becquerel por metro cúbico
Ci	Curie
KeV	Kilo (mil) elétron-volt
MeV	Milhão de elétron-volt
pCi/L	Picocurie por litro
ppm	partes por milhão

LISTA DE FIGURAS, TABELAS, QUADROS E GRÁFICOS

Figura	página
Figura 1.1. Ilustração esquemática do decaimento alfa de um núcleo de urânio-238 para um núcleo de tório-234 (Criação do Autor, 2013).	24
Figura 1.2. Figura 1.2. Espectro eletromagnético com destaque para a faixa da luz visível. O comprimento de onda decresce com o avanço para a direita. (Fonte: PCE, 2012).	26
Figura 1.3 Diagrama esquemático da cadeia de desintegrações sucessivas características da série do tório-232 (Criação do Autor, 2103).	31
Figura 1.4. Diagrama esquemático da cadeia de desintegrações sucessivas características da série do urânio-238,ou série do rádio (Criação do Autor, 2013).	32
Figura 1.5. Diagrama esquemático da cadeia de desintegrações sucessivas características da série do urânio-235, ou série do actínio (Criação do Autor, 2012).	33
Figura 1.6. O radônio tem acesso ao interior de imóveis, migrando do subsolo através de fendas e fissuras naturais e da construção (Fonte: Premier Radon, 2012).	38
Figura 2.1 A câmara E-Perm vista nas posições: “aberta” (centro) e “fechada”. A esquerda aparece a Leitora SPER (Electric Voltage Reader) Radelec, 2013).	56
Figura 3.1 Exalação do radônio a partir de solos e materiais de construção; (Fonte: Santos, 2010).	68
Figura 3.2 Mapa com a localização da Região Metropolitana de Salvador, no Estado da Bahia, Brasil (Fonte: Wikipédia, 2013).	70
Figura 3.3 Mapa da Região Metropolitana de Salvador (RMS), mostrando as cidades de Salvador, Lauro de Freitas, e Camaçari, cidades onde as medições foram realizadas (Fonte: Wikipédia, 2013).	70
Figura 4.1 Monitor de radonio Alphaguarda PQ-2000 em pleno uso – Praia de Jardim de Alah, Salvador, BA (Foto tirada por Renato Santiago, 2012).	82
Figura 4.2 Circuito de medição de atividade de radônio no solo (Fonte: ABDULFATTAH A. A.; BUSHRA A., 2011)	83

Figura 4.3. O Alphaguard PQ-200 medindo radônio no solo de uma residência no bairro do Stiep, Salvador, BA (2012) (Foto tirada por Zildete Rocha, 2012).	84
Figura 5. 1 O caráter atômico da trilha de uma partícula em um polímero (Fonte: Al-Mosa, 2007).	94
Figura 5.2. Os quatro estágios do processo de formação de trilhas: Estágio i) Trajetória da partícula carregada; Estágio ii) Ionização; Estágio iii) Repulsão Coulombiana; Estágio iv) Relaxação do dano (Fonte: Al-Mosa, 2007).	95
Figura 5.3. (a) Ilustração esquemática frontal (topo) do dano provocado por uma partícula pesada carregada ao atingir a superfície de um polímero. (Construção do Autor, 2012).	96
Figura 5.3. (b). Ilustração do foco do dano aproximada em “close” simula o dano provocado pela partícula eletricamente carregada ao penetrar até o âmago do SSNTD. (Construção do Autor, 2013)	97
Figura 5.4. Trajetória da partícula (trilha). A velocidade de corrosão V_T é maior do que a velocidade de corrosão da parte não danificada, V_G resultando daí a formação de bocas cônicas (pitch) (Fonte: RAKUŠA, 2006)	102
Figura 5.5 Uma visualização da trajetória de uma partícula pesada carregada desde a colisão com o SSNTD segundo uma perpendicular, até a sua parada (Construção do Autor, 2012);	103
Figura 5.6 Uma vista breve do processo laboratorial de revelação química dos SSNTD (Fonte: AL-JARALLAH, 2012).	105
Figura 5.7 Mapa da Região Metropolitana de Salvador (RMS) (Fonte: WIKIPÉDIA, 2013).	106
Figura 5.8 (a) As peças componentes da câmara de difusão e (b) o CR-39 e a tampa montada (Fonte: Corrêa, 2011).	109
Figura 5.9 Imagem do elemento detector CR-39, com destaque para a face onde está gravado o seu número de identificação (Fonte: Corrêa, 2011).	110
Figura 5.10. Uma bolsista do LFNA montando um SSNTD (Foto tirada pelo Autor, 2012).	110
Figura 5.11 Imagem da superfície de um CR-39 após a revelação (Fonte:Foto CDTN, 2012)	111

Tabelas

Tabela 1.1. Principais características físicas do radônio (Construção do Autor, 2013).	37
Tabela 1.2 Energias características do decaimento alfa (α) do radônio-222 e do polônio-218, com suas respectivas energias de ionização (Fonte: Ernbo,	42

H, 2006).

Tabela 2.1 – Tabela de tensão inicial (V_i) e tensão final (V_f), medidos com o auxílio da Leitora de Tensão SPER nos eletretos das câmaras de ionização expostas em Caípe (Construção do Autor, 2012). 59

Tabela 2.2 – Tabela mostrando os resultados dos cálculos das concentrações de radônio calculadas com base nos dados da Tabela 2.1 (Construção do Autor, 2012). 60

Tabela 4.1. Valor de atividade de radônio em água medido em amostra colhida na Fonte do Pilar, Salvador, BA (Fonte: Dados da Pesquisa, 2012) 85

Tabela 4.2. Pontos de Salvador e da RMS, onde as medidas de solo foram realizadas, e os valores de atividade medidos (Fonte: Dados da Pesquisa, 2012). 86

Quadros

Quadro 1.1. Propriedades radioativas dos isótopos do urânio e dos seus primeiros descendentes e distribuição relativa das abundâncias naturais 13

Gráficos

Gráfico 1.1. Plotagem: n^0 de nêutrons x n^0 de prótons de isótopos da Tabela Periódica (Fonte: SRGC, 2011). 19

Gráfico 3.1. Resultados das medidas das atividades de concentrações de radônio atmosférico em ambientes interiores de Salvador e Região Metropolitana (RMS) (Fonte: Resultados da pesquisa, 2012). 73

Gráfico 5.1. Distribuição das concentrações de radônio medidas por ambiente (Fonte: Dados da pesquisa, 2012). 113

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
OBJETIVOS	3
APRESENTAÇÃO	4
ARTIGO 1 A cadeia de decaimentos do urânio no ambiente e os riscos para a saúde humana	
Introdução	9
Características do urânio, aplicações, e efeitos sobre o ambiente	12
O urânio e o ambiente	16
A origem e o comportamento do radônio	18
Estabilidade nuclear	19
Desintegrações nucleares naturais e tipos de radiação	20
A Lei fundamental do decaimento radioativo	26
O crescimento de produtos radioativos	29
Equação geral do decaimento radioativo	29
As desintegrações naturais do tório-232, do urânio-238 e do urânio-235	31
Cadeia de decaimentos do radônio ²²² e de seus RDPs: Equilíbrio secular	34
Equilíbrio secular radônio/RDPs e a ameaça para os pulmões	35
Atividade das concentrações de radônio	36
Radônio e Riscos à saúde humana	37
Radônio e câncer de pulmão	39
Radônio e RDPs no ambiente	40
Limites estabelecidos para as concentrações ambientais de radônio	41

A detecção de partículas alfa	42
Conclusão	44
Referências	46

ARTIGO 2 Uso de câmaras de ionização em experimento de medição de níveis de radônio-222 em residências e em uma escola pública situadas nas proximidades da Refinaria de Petróleo Landulfo Alves – RLAM

Resumo	50
Abstract	50
Introdução	51
Depósitos de lamas e escamas radioativas	52
Materiais e Métodos	54
Vantagens e limitações das EIC em atividades de medição de radônio	58
Resultados	59
Discussão	60
Conclusão	62
Agradecimentos	63
Referências	64

ARTIGO 3 Medição de concentrações atmosféricas de radônio no ar de ambientes interiores de Salvador e Região Metropolitana (RMS)

Resumo	67
Abstract	67
Introdução	68
Alguns aspectos físicos da Região Metropolitana de Salvador	69
Materiais e métodos	71
Resultados	73

Discussão	74
Conclusão	74
Financiamento	74
Agradecimentos	75
Referências	76

ARTIGO 4 Medição de atividades de concentrações de radônio-222 em solos, e em uma amostra de água de nascente de Salvador e Região Metropolitana de Salvador – RMS

Resumo	80
Abstract	80
Introdução	81
Materiais e métodos	81
Resultados	85
Discussão	86
Conclusão	87
Agradecimentos	87
Referencias	88

ARTIGO 5 Medição de Atividades de Concentrações Atmosféricas de Ambientes Interiores Mediante o Uso de Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido – SSNTD

Resumo	91
Abstract	91
Introdução	92
Materiais e Métodos	107
Discussão	112
Resultados	113

Conclusão	114
Agradecimentos	114
Referencias	115
Discussão Geral	117
Conclusão Geral	120
Lista Geral de Referencias	121
ANEXO A – Transcrição da comunicação sobre a publicação do livro “Questões Ambientais em Saúde Coletiva”	134
ANEXO B – Declaração relativa ao registro ISBN do livro “Questões Ambientais em Saúde Coletiva”	135
ANEXO C – Certificado de participação como autor principal e apresentador de Trabalho no XXX Encontro de Físicos do Norte e Nordeste	136
ANEXO D – Certificado de participação no “International Nuclear Atlantic Conference”, – 2011. Belo Horizonte, MG.	138

RESUMO

O radônio é o mais importante e mais amplamente estudado poluente ambiental radioativo em todo o mundo. O radônio é um gás nobre derivado do decaimento radioativo do rádio, que por sua vez resulta do decaimento radioativo do urânio. Os produtos do decaimento do radônio se apresentam sob a forma de partículas de poeira no ar, as quais, uma vez inaladas podem aderir ao epitélio brônquico onde suas respectivas desintegrações alfa podem produzir altas doses de radiação local. As partículas alfa podem alterar o DNA levando ao desenvolvimento de câncer. A exposição ao radônio se tornou uma questão de saúde pública há quase 25 anos. Estudos mostram que a mortalidade por câncer de pulmão se associa com a exposição ao radônio. Há, no entanto, uma vasta gama de valores de concentração de radônio medidos em diferentes países. No Brasil, o radônio é ainda muito pouco estudado. O objetivo desta pesquisa é medir os níveis de concentração de radônio no ambiente em municípios selecionados da Região Metropolitana de Salvador (RMS), BA. Foram utilizados três métodos distintos de medição de níveis de concentração ambiental de radônio. São eles: Método I: A medição dos níveis de concentração atmosférica de radônio utilizando-se da instalação de Câmaras de Ionização de Eletretos (EIC) em exposição de curto prazo; Método II: Medição dos níveis de concentrações de radônio no solo e em uma amostra de água coletada de uma fonte de água subterrânea pública de Salvador, BA, mediante a utilização de um monitor contínuo de radônio Alphaguard PQ-2000, da Genitron; Método III: Medição de níveis de concentração atmosférica de radônio, mediante a instalação de Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido – SSNTD no modo de exposição de médio prazo. Os resultados obtidos por cada um dos métodos empregados foram considerados como toleráveis quando comparados com valores limites estabelecidos pela United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). O Brasil tem a sexta maior reserva de minério de urânio do mundo e considerado que o radônio é um dos principais descendentes do urânio que é consideravelmente prejudicial à saúde humana, recomenda-se que estas técnicas sejam utilizadas nas pesquisas para verificar os níveis de concentrações de radônio nas áreas de produção uranífera do Brasil.

Palavras-chave: Radônio. Urânio. Saúde. Radioatividade. Ambiente.

ABSTRACT

Radon is the most important and widely studied radioactive environmental pollutant worldwide. Radon is a noble gas derived from the radioactive decay of radium, which, in its turn, results from the radioactive decay of uranium. The products of the decay of radon present in the form of dust particles in the air which, once inhaled can adhere to the bronchial epithelium where alpha decays may cause high local radiation doses. Alpha particles can alter DNA leading to the development of cancer. Exposure to radon has become a public health issue for nearly 25 years. Studies show that mortality from lung cancer is associated to exposure to radon. There is, however, a wide range of radon concentration values measured in different countries. In Brazil, radon is still very little studied. The objective of this research is to measure the concentration levels of radon in the environment in selected municipalities in the Metropolitan Region of Salvador (RMS), BA. Three different methods for measurements of environmental concentration levels of radon were used: Method I: The measurement of atmospheric concentration of radon by use of Electret Ionization Chambers (EIC) in short-term exposure mode; Method II: Measurement of levels of radon concentrations in the soils and in a sample of collected water from a groundwater public well in Salvador, Bahia, by using an Genitron Inc., made Alphaguard KP-2000 continuous radon monitor; Method III: Measurement of levels of atmospheric radon concentrations, by installing Solid State Nuclear Track Nuclear Detectors – SSNTD in medium term exposure mode. The results obtained by each of the methods were interpreted as tolerable when compared with the limit values established by the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Due to Brazil status as the sixth largest uranium ore reserve in the world and taking as a basis that radon is one of the main descendants of uranium to pose a considerable risk to human health it is recommended that these techniques come to be put in use in programs to survey the levels of radon concentrations in the uranium ore exploration and benefit areas all over Brazil.

Keywords: Radon. Uranium. Health. Radioactivity. Environment.

Objetivos

Geral

Medir níveis de concentração de radônio no ar, na água e no solo de áreas, prédios públicos e residências selecionadas da Região Metropolitana de Salvador (RMS), Bahia.

Específicos

1. Verificar níveis de concentração de radônio no ar mediante o uso de Câmaras de Ionização de Eletreto (EIC) em exposições de curto prazo (Método I);
2. Verificar níveis de concentração de radônio no solo e na água de alguns pontos de Salvador e Região Metropolitana, mediante o uso do Alphaguard PQ-2000, monitor de medição contínua de níveis de concentração de radônio em solos e na água (Método II);
3. Verificar níveis de concentrações de radônio no ar em alguns pontos de Salvador e Região Metropolitana, mediante uso de Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido – SSNTD, em exposições de médio prazo (Método III);

Apresentação

Esta dissertação surge no contexto de uma discussão maior sobre as opções energéticas brasileiras e a exploração do minério de urânio, tomando como exemplo as atividades de mineração e beneficiamento do urânio na região de Caetité e Lagoa Real, sem o devido esclarecimento da população dos riscos ambientais e à saúde associados a essa atividade. A exploração e o beneficiamento do minério de urânio no Brasil vêm ocorrendo na ausência de uma discussão sobre a saúde e segurança dos trabalhadores das minas e da população residente no seu entorno ao lado da omissão do estado brasileiro no que concerne ao papel que este deve desempenhar neste processo. Tomando a desintegração do urânio como ponto de partida, estudam-se mais detidamente algumas características importantes do seu descendente colocado no foco do interesse dessa dissertação: o radônio. Aspectos quantitativos da desintegração do radônio que fundamentam os métodos de medição usados são abordados como parte da investigação da radioatividade ambiental e sua medição.

A energia nuclear ingressou de forma mais intensa na pauta ambiental mundial após o acidente nuclear de Chernobyl, na Ucrânia, em 1986, e consolidado recentemente, após os acontecimentos em Fukushima, no Japão, em 2011. O acidente de Chernobyl é considerado o pior acidente nuclear da história, e atingiu a União Soviética, Europa Oriental, Escandinávia e Reino Unido, com a liberação de radionuclídeos prejudiciais para o ambiente, em níveis cerca de 400 vezes maior que a contaminação resultante da bomba atômica que foi lançada sobre Hiroshima. Em Fukushima, as medições de iodo-131 e de césio-137 indicaram que os lançamentos radioativos são da mesma ordem de grandeza que os lançamentos de radioisótopos do desastre de Chernobyl em 1986. Por 24 anos, o lobby nuclear privou o mundo de informação científica sobre o acidente nuclear de Chernobyl, o mais grave acidente industrial do mundo. Entretanto, em fevereiro de 2010, a Academia de Ciências de Nova York conseguiu publicar a mais completa coleção de evidências científicas em todo o mundo, realizada de forma independente, sobre as consequências sanitárias e ambientais do acidente de Chernobyl. A Agência Internacional de Energia Atômica, ou AIEA, porta-voz do estabelecimento nuclear, tem coordenado a “não revelação” dessas consequências. A Organização Mundial de Saúde é subordinada à AIEA em matéria de radiação e de saúde e é acusada de não prestar assistência às populações em perigo. Esta publicação aponta todas as dimensões da catástrofe e revela a inadequação

vergonhosa da assistência internacional atual às populações afetadas. O livro pontua que as opções futuras de energia não podem incluir a energia nuclear. (KATZ, A. R., 2010). Muito antes do beneficiamento para a produção da energia nuclear, o urânio e seus descendentes emitem radiação, cujo mecanismo é pouco conhecido pela população em geral ou mesmo pelos técnicos que trabalham nos setores da saúde e do ambiente. Dentre os principais produtos do decaimento do urânio que mais afetam a saúde humana encontra-se o radônio. O radônio é um gás nobre resultante da desintegração nuclear do rádio presente nos materiais de construção, solo e água, que se difunde em ambientes de convívio humano. Sendo também instável, o seu isótopo de meia-vida mais longa, o radônio-222, decai emitindo uma partícula alfa altamente ionizantes e submetendo os ambientes a incrementos nas concentrações de atividade radioativa. A radioatividade devida ao radônio equivale a 54% das radiações a que estamos sujeitos. Este gás é legalmente monitorado nos Estados Unidos onde é apontado como segundo maior fator associado ao câncer de pulmão, perdendo a primeira colocação para o cigarro. No Brasil, pouco se conhece sobre os efeitos do radônio na saúde humana e não há dispositivo legal específico que obrigue a realização de medições periódicas dos níveis de radônio em residências e/ou locais de trabalho.

Relatos da sociedade civil organizada da Região de Caetité e Lagoa Real, produtoras de urânio, apontam a ausência, por parte das autoridades, da implementação dos dispositivos constitucionais pertinentes. Na Constituição do Estado da Bahia, no Artigo 214 do Capítulo VIII, que trata "Do Meio Ambiente", desde o inciso I até o inciso IV, o texto que se lê é o seguinte:

“Art. 214 - O Estado e Municípios obrigam-se, através de seus órgãos da administração direta e indireta, a:

I - promover a conscientização pública para a proteção do meio ambiente e estabelecer programa sistemático de educação ambiental em todos os níveis de ensino e nos meios de comunicação de massa;

II - garantir o amplo acesso da comunidade às informações sobre as fontes e causas da poluição e degradação ambiental e informar sistematicamente à população a qualidade do meio ambiente, os níveis de poluição, a presença de substâncias potencialmente danosas à saúde nos alimentos, água, ar e solo e as situações de riscos de acidente;

III - estabelecer e controlar os padrões de qualidade ambiental;

IV - exigir, na forma da lei, para instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente, estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade...”.

– Constituição do Estado da Bahia, 1989.

Assim, essa Dissertação é fruto do compromisso da comunidade acadêmica em gerar e disponibilizar o conhecimento sobre esse tema com vistas ao resgate do dispositivo da Constituição do Estado da Bahia acima referido, e através do exercício das suas funções de ofício gerar e disponibilizar o conhecimento.

Os poucos estudos realizados com vistas a avaliar os impactos sobre a saúde em consequência das atividades de mineração em Caetité e Lagoa Real tem tomado como uma das variáveis mais significativas, a incorporação de urânio no corpo humano para pessoas que vivem na região de "entorno" da mina. Os trabalhos de Prado (2007), do Greenpeace (2008), de Pezzato (2012), fazem referência ao risco à saúde representado pelo urânio. A presente Dissertação, entretanto, toma como variável as concentrações de atividade radioativa de um dos descendentes do urânio: o radônio. Quando em concentrações elevadas no ambiente o radônio, um gás radioativo, entra em contato com os pulmões por inalação ocasionando contaminação. As partículas alfa, pesadas e altamente ionizantes, são emitidas pelo radônio ao se desintegrar, não conseguem escapar e, inaladas, se depositam no organismo, podendo ocasionar lesões ou patologias diversas.

Espera-se que a medição/monitoração dos níveis de concentrações de radônio nos ambientes domésticos e ocupacionais possa servir de indicador de exposição da saúde ambiental e humana ao urânio. O trabalho de pesquisa vai testar três diferentes métodos para medir o radônio.

O objetivo geral desta dissertação é medir concentração de radônio no ar, na água e no solo em prédios públicos e residências de áreas selecionadas da Região Metropolitana de Salvador, Bahia. Este objetivo geral se desdobra em três objetivos específicos, a saber: 1) Método I: Medir concentrações de radônio no ar mediante o uso de Câmaras de Ionização de Eletreto (EIC) em exposições de curto prazo; 2) Método II: Medir concentrações de radônio no solo e na água de alguns pontos de Salvador e Região Metropolitana, mediante o uso do Alphaguard PQ-2000, monitor de medição contínua de níveis de concentração de radônio em solos e na água; 3) Método III: Medir concentrações de radônio no ar em alguns pontos de Salvador e sua Região Metropolitana, mediante uso de Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido – SSNTD, em exposições de médio prazo.

As respectivas aplicações compõem a dissertação sob o formato de cinco artigos:

O Artigo 1, cujo título é “A cadeia de decaimentos do urânio no ambiente e os riscos para a saúde humana”, apresenta as características físicas e químicas mais importantes do urânio e do radônio, incluindo o estudo teórico das suas respectivas cadeias radioativas de decaimentos naturais. A proposta do texto é o aprofundamento didático-científico da abordagem da desintegração radioativa dos radionuclídeos interessantes, vez que se constitui parte do esforço pela aproximação dos setores acadêmicos da Física afins às questões ambientais e a Medicina Preventiva e Social. Esse Artigo se adiantou em relação à defesa da presente dissertação (prevista para Abril de 2013) e foi resumido, adaptado para uma linguagem simples e transformado em um capítulo do livro “Questões Ambientais em Saúde Coletiva”. Esse Artigo adaptado busca esclarecer para o público em geral a relação entre urânio e radônio e os riscos a saúde humana. O livro foi publicado em 2012 pela Editora da Universidade Federal do Mato Grosso, Edufmat, e está registrado sob ISBN N° 978-85-327-0469-6, conforme cópia da comunicação por e-mail e da declaração comprobatória colocadas na seção de anexos dessa dissertação.

O Artigo 2 cujo título é “Uso de câmaras de ionização em experimento de medição de níveis de radônio-222 em residências e em uma escola pública situadas nas proximidades da Refinaria de Petróleo Landulfo Alves – RLAM”. Este artigo foi inscrito, aceito no XXX Encontro de Físicos do Norte de Nordeste – XXX ENFNNE, e foi apresentado pelo Autor, conforme certificados apresentados no ANEXO B.

O Artigo 3 cujo título é “Medição de atividades de Concentrações Atmosféricas de Radônio no Ar de Ambientes Interiores de Salvador e Região Metropolitana (RMS)”, amplia o teste do Método I utilizado nos trabalhos relatados no Artigo 2, ao estender as medições das atividades de concentrações de radônio a 33 (trinta e três) ambientes interiores de Salvador, e das cidades de Lauro de Freitas e Camaçari ambas integrantes da Região Metropolitana de Salvador (RMS). Este Artigo se encontra em fase avançada de tradução para o Inglês sob o título “Study of radon concentrations in the air of indoor environments in the Metropolitan Region of Salvador (MRS), Bahia, Brazil” e foi submetido em 26/02/2013 e aprovado para apresentação oral em 11 de março de 2013, durante o “International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2013”, que acontecerá em Recife entre 24 e 29 de Novembro de 2013, conforme ANEXO C. Nesse ANEXO C está também o certificado de participação no INAC 2011 quando o Autor foi recebido na comunidade nuclear do Brasil e a ela integrado, iniciando aí também a parceria LFNA-FAMEB-CDTN.

O Artigo 4 cujo título é “Medição de Atividade de concentrações de radônio em solos e em uma amostra de água da Região Metropolitana de Salvador (RMS)”, utiliza o Método II, que tem como base o uso de um monitor contínuo de radônio do tipo Alphaguard PQ-2000, da Genitron Instruments. O monitor Alphaguard PQ-2000 é um instrumento fundamental para o desenvolvimento dos trabalhos de medição de radônio no solo e na água.

O Artigo 5, cujo título é “Medição de Atividades de Concentrações Atmosféricas de Radônio em Ambientes Interiores da Região Metropolitana de Salvador (RMS)” mediante o uso de Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido – SSNTD descreve o Método III. Este método, conforme o título do Artigo se refere tem como base o uso dos Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido (em Inglês, Solid State Nuclear Track Detectors) – SSNTD. É um dos métodos de mais baixo custo e que conta com o apoio do CDTN para o desenvolvimento de futuras pesquisas envolvendo números bem maiores de amostras.

O CDTN se torna assim um parceiro importante para a efetivação de um desdobramento profissional efetivo no qual os conhecimentos adquiridos durante o desenvolvimento dos trabalhos que dão base a essa dissertação terão campo de aplicação.

Finalizando, a presente dissertação se restringe a abordar três métodos de medição de (concentrações de) radônio, haja vista a importância desse pré-requisito para o desenvolvimento da capacidade de avaliação ambiental dos efeitos das concentrações ambientais de radônio sobre a saúde humana do ponto de vista da Epidemiologia. O conjunto de variáveis que determina a influência das concentrações de radônio sobre a saúde humana tanto do ponto de vista da vigilância sanitária quanto do ponto de vista ambiental é formado pelas concentrações de radônio-222 em convivência simultânea com os seus RDPs no ambiente humano. Ou seja, é isso que é medido do ponto de vista da epidemiologia e da vigilância ambiental. Aqui nessa dissertação a abordagem se restringe ao estudo e aplicação de três dentre os métodos de medição das concentrações de radônio, visto que a avaliação do potencial de risco para a saúde provocado pelo conjunto radônio+RDPs foge ao presente escopo.

Artigo 1

A cadeia de decaimentos do urânio no ambiente e os riscos para a saúde humana

Adelson Silva de Brito¹
Rita de Cássia Franco Rego²

Introdução

Este capítulo surge no contexto de uma discussão maior sobre as opções energéticas brasileiras e a exploração do minério de urânio, tomando como exemplo as atividades de mineração e beneficiamento do urânio na região de Caetité e Lagoa Real, sem o devido esclarecimento da população dos riscos ambientais e à saúde associados a essa atividade. Em 2000, poucos meses após entrar em operação, ocorreu um dos primeiros acidentes ambientais na usina de beneficiamento de urânio em Caetité, com o rompimento de uma das mantas de isolamento das piscinas, liberando para o solo grande volume de concentrado de urânio. Após vários outros acidentes e várias denúncias de vazamento na mina de urânio de Caetité, a sociedade civil organizada da região vem solicitando estudos epidemiológicos e ambientais independentes para apurar essas denúncias e as eventuais consequências. Entretanto, as Indústrias Nucleares do Brasil (INB), empresa responsável pelo complexo uranífero que envolve a mina e a usina de beneficiamento de urânio, prefere manter a população dessa região, desinformada quanto aos resultados advindos de monitoramentos ambientais, os quais se presumem, estejam sendo implementados. Assim, por um lado, na face do desconhecimento da população, quanto aos riscos à saúde humana, associados à extração e beneficiamento deste minério, e por outro lado o histórico de terror e tragédia irremediavelmente associados à energia nuclear, a população se sente insegura frente aos potenciais e desconhecidos desdobramentos de acidentes e eventos mais

¹ Físico. Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Saúde, Ambiente e Trabalho da Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia, Brasil. Email: adelsondebrito@gmail.com

² Médica. Professora e do Programa de Pós-Graduação em Saúde, Ambiente e Trabalho da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e professora associada da Faculdade de Medicina da Bahia da UFBA. Doutora em Saúde Pública pelo Instituto de Saúde Coletiva da UFBA. Salvador, Bahia, Brasil. E-mail: ritarego@ufba.br.

sérios, caso eventualmente aconteçam. Com base nesta demanda social, este capítulo buscou sistematizar e trazer ao conhecimento do público em geral e de parcela de pesquisadores brasileiros, alguns esclarecimentos sobre o urânio, o radônio e os riscos à saúde humana.

O Brasil tem a sexta maior reserva de urânio do mundo na classe “Razoavelmente Assegurada” e a terceira maior reserva na classe “Recursos Adicionais Estimados” (MATOS & RUBINI, 1999). A mina baiana situada entre os municípios de Caetité e Lagoa Real, microrregião de Guanambi que integra as Bacias Hidrográficas do Rio de Contas e do São Francisco possui a segunda maior reserva do Brasil. O projeto básico da mina foi concluído em 1996, indicando uma lavra a céu aberto na Jazida de Cachoeira, a 45 km da sede municipal, entre os distritos de Maniaçu (Caetité) e São Timóteo, com teor médio de urânio de 3000 ppm. As atividades da mineração foram iniciadas em março de 2000 e, o Distrito Uranífero de Caetité – Lagoa Real é hoje, responsável pelo suprimento de combustível nuclear para o consumo doméstico, com previsão de produção de cerca de 400 toneladas por ano de diuranato de amônio (DUA ou yellow cake). A exploração do urânio busca a autossuficiência na produção da matéria prima para o incremento do Programa Nuclear Brasileiro. As reservas geológicas são suficientes para suportar a produção de 100.000 toneladas de U_3O_8 (trióxido de urânio) e a autossuficiência em produção de combustível nuclear (MATOS et al, 2003).

Segundo projeções da INB, as atuais reservas geológicas brasileiras de urânio somam 309 mil toneladas (MATOS & RUBINI, 1999). Além dessas reservas, o Brasil quase domina totalmente a tecnologia do ciclo de produção do combustível nuclear, e recentemente passou a fazer parte do grupo de países que conhecem o processo de enriquecimento isotópico do urânio por ultracentrifugação.

Os municípios de Caetité, com população aproximada de 47.000 habitantes, e Lagoa Real, com aproximadamente 14.000 habitantes (IBGE, 2010), ficam localizados a mais de 760 km de Salvador, capital da Bahia e vivem sob a influência do complexo mineiro-industrial de extração e beneficiamento de urânio em atividade no país. Atualmente Lagoa Real é um importante centro mineiro do estado da Bahia e além do urânio, são explorados também na região quartzo, ametista, manganês e existe ainda uma promissora jazida de minério de ferro.

A mineração do urânio causa impactos ambientais, entre os quais a poluição do ar, decorrente da movimentação dos solos e do desmonte de rochas na lavra, na

britagem e rebitagem do minério; e da água, por causa da liberação de radionuclídeos e outros poluentes nos lençóis subterrâneos durante a extração e tratamento do minério de urânio. Nesses processos pode ser gerada poeira radioativa e o gás radônio, descendente do urânio, que também é transferido para a atmosfera pela mineração e pela difusão das rochas e rejeitos. Os recursos hídricos também podem ser contaminados pela dispersão de urânio e seus produtos de decaimento, tais como: tório, rádio e chumbo. Os riscos da utilização dos resíduos das atividades de mineração, em obras civis, aterros e construções de residências e prédios diversos, devem ser monitorados tendo em vista o potencial de impacto sobre a saúde humana. O pó radioativo, ao ser dissipado pelo vento, deposita-se na cobertura vegetal das áreas vizinhas, podendo causar a contaminação.

As denúncias oriundas da sociedade civil sinalizam que, apesar da população urbana se localizar relativamente distante da influência do complexo da INB, não está claro se a população que consome parte dessa água pode estar sendo afetada pelas atividades mineradoras e de beneficiamento do minério de urânio. A água que é utilizada na área do empreendimento origina-se de mananciais que vertem para a Bacia Hidrográfica do Rio de Contas que abrange dezenas de municípios baianos, e deságua em Itacaré, no sul da Bahia. Portanto, a população pode não estar *a priori* livre dos riscos à saúde gerados pela mineradora. A população dos municípios vizinhos em geral e os trabalhadores, em particular, podem ser diretamente afetados pela poeira do minério gerada pelas explosões que fazem parte do processo de beneficiamento do urânio. Além disso, os trabalhadores e moradores de Caetité e Lagoa Real podem ser afetados pela exposição ao radônio liberado na atmosfera pelas atividades de extração e beneficiamento primário (britagem, moagem, etc.), que somada à exposição natural a este gás radioativo pode configurar um quadro de elevação dos níveis de concentração desse agente cancerígeno a valores acima dos limites, e desencadear processos carcinogênicos em indivíduos ou grupos de indivíduos da população. Todos os aspectos acima compõem uma conjuntura que exige da INB a divulgação dos resultados das análises da água, do solo, da vegetação e da saúde dos funcionários da indústria (VILASBOAS, 2008).

Características do urânio, aplicações, e efeitos sobre o ambiente

O urânio é um elemento químico radioativo metálico da série dos actinídeos. Tem como símbolo a letra “U” e o seu número atômico é 92, ou seja, o átomo de urânio tem 92 prótons no seu núcleo e 92 elétrons na sua camada eletrônica. Todos os seus isótopos são instáveis, porém, o urânio é fracamente radioativo. Os isótopos de urânio mais comuns são o urânio-238 (que tem 146 nêutrons no seu núcleo) e o urânio-235 (que tem 143 nêutrons). Segundo o Argonne National Laboratories (2012) dos EUA o urânio tem o segundo maior peso atômico dentre os elementos da Tabela Periódica sendo quase duas vezes mais denso que o chumbo. Esse elemento ocorre naturalmente e, em geral se apresenta em baixas concentrações, ou seja, em valores de poucas partes por milhão em rochas, solos e águas. O urânio é extraído comercialmente de minerais tais como a uranita. Na Natureza, o urânio é encontrado como: o urânio-238 (^{238}U) (com uma abundância relativa que varia entre 99,2739-99,2752%); o urânio-235 (com uma abundância relativa que varia entre 0,7198-0,7202%); e uma pequena quantidade de urânio-234 (entre 0,0050-0,0059%), como mostra o Quadro 1.1. O urânio decai lentamente emitindo uma partícula alfa. A meia-vida do urânio-238 é de cerca de 4,47 bilhões de anos e a de urânio-235 é 704 milhões de anos. Segundo ainda o Argonne National Laboratories, por todo o planeta Terra, isótopos do elemento químico urânio (U) ocorrem naturalmente, e são encontrados ao menos, em baixas concentrações ou quantidades vestigiais, da ordem de algumas partes por milhão (ppm) em todos os tipos de solos, rochas, águas superficiais e águas subterrâneas do planeta.

Muitos usos contemporâneos do urânio exploram suas propriedades nucleares únicas. São essas propriedades que propiciam tanto o funcionamento dos métodos de prospecção do urânio, quanto o funcionamento dos métodos de medição/monitoração do radônio usados para o desenvolvimento dos trabalhos dessa dissertação (medições de radônio na atmosfera, no solo e na água). O Quadro 1.1, apresenta, além dos números da respectiva abundância relativa, os dados sobre as propriedades radioativas dos principais isótopos do urânio e de seus primeiros descendentes.

Naturalmente radioativo, o urânio “decai” ao longo do tempo se transmutando em vários outros elementos, denominados "filhos/filhas", os quais se sucedem acontecendo uma de cada vez e formando uma estrutura sequencial denominada cadeia

Quadro 1.1. Propriedades radioativas dos isótopos do urânio e suas e dos seus primeiros descendentes e distribuição relativa das abundâncias naturais

Isótopo	Meia-vida	Abundancia Natural (%)	Atividade específica (Ci/g)	Decai Em modo	Energia da radiação (MeV)		
					Alfa (α)	Beta (β)	Gama (γ)
U-232	72 a	0	22	α	5,3	0,017	0,0022
U-233	160,000 a	0	0,0098	α	4,8	0,0061	0,0013
U-234	240,000 a	0,0055	0,0063	α	4,8	0,013	0,0017
U-235	700 milhões a	0,72	0,0000022	α	4,4	0,049	0,16
<i>Th-231</i>	26 h		540,000	β	–	0,17	0,026
U-236	23 milhões a	0	0,000065	α	4,5	0,011	0,0016
U-238	4,5 bilhões a	> 99	0,00000034	α	4,2	0,010	0,0014
<i>Th-234</i>	24 dias		23,000	β	–	0,060	0,0093
<i>Pa-234m</i>	1,2 min		690 milhões	β	–	0,82	0,012

Legenda: Ci = Curie, g = grama, E MeV = Milhão de elétron-Volt. Um traço (–) significa que o item não se aplica. As propriedades do *tório-231*, do *tório-234* e do *protactínio-234m* aparecem nessa tabela pelo fato de serem esses produtos que acompanham o decaimento do urânio. Os valores dados na tabela incluem dois algarismos significativos. A letra “m” no *protactínio-234* simboliza a sua condição de “metaestável”.

ou série de decaimentos radioativos. Ao se referir ao urânio como sendo um elemento radioativo se enfatiza a sua instabilidade nuclear. Isso significa que o urânio se degrada naturalmente ao longo do tempo, se transformando em outros elementos químicos enquanto emite radiação. Essa característica lhe confere um status especial entre os elementos químicos. O urânio e todos os elementos químicos que emitem radiação são por isso denominado “radionuclídeos”.

O urânio pode ser utilizado sob a forma de “urânio enriquecido”, para a produção de energia nuclear, ou “empobrecido”, na indústria bélica, seja na confecção de blindagens militares para proteger tanques e outros veículos bélicos ou na fabricação de balas e mísseis.

O urânio é um metal radioativo duro, denso, maleável, flexível (dúctil) de cor prata esbranquiçada. É um metal cuja densidade é muito elevada e quando finamente fragmentado, pode reagir com água fria. Ao se apresentar em suspensão no ar atmosférico este metal assume a composição de óxido de urânio.

Závodská (2008) assinala que o urânio é um elemento químico auto pirofórico, isto é, pode entrar em combustão espontânea na presença de ar, oxigênio e água. Em ambientes nos quais as temperaturas possam variar na faixa de 200 °C a 400 °C, o urânio pode entrar em combustão espontânea em atmosferas compostas por dióxido de carbono (CO₂). O urânio pode formar sólidos em suspensão nas soluções e compostos intermetálicos em associações com muitos outros metais.

Em dezembro de 1942, o físico ítalo-americano Enrico Fermi (1901 – 1954), criou a primeira reação de desintegração nuclear em um reator, e em 1945, já havia uma quantidade de urânio-235 (²³⁵U) puro o suficiente para a preparação de um artefato bélico, ou seja, uma bomba. A primeira bomba atômica, usada em uma guerra era uma bomba de urânio. Esta bomba continha uma quantidade suficiente de isótopo do urânio-235 (²³⁵U) para iniciar e manter uma reação de transmutação nuclear em cadeia, provocando a fissão de um grande número de átomos e uma concomitante liberação de uma grande quantidade de energia em forma de uma bola de fogo incontrolável.

O principal uso civil do urânio se dá na preparação de combustível para usinas nucleares comerciais. Isso requer que o urânio seja enriquecido, ou seja, que passe por um processo de filtragem de modo que este se apresente como uma mistura com alta porcentagem relativa do isótopo urânio-235. A porcentagem do urânio-235 no “combustível nuclear ”usado nos reatores das usinas nucleares varia entre 4 a 5%,

enquanto nos “artefatos bélicos usados como armas nucleares” a porcentagem de urânio-235 no “combustível/explosivo” é de cerca de 90%.

O ponto focal de todas as preocupações sanitárias relativas ao urânio é o risco a saúde em consequência das diversas rotas de exposição a esse radionuclídeo, traduzido pela possibilidade de aumento das chances de desenvolvimento de doenças, principalmente de câncer, em consequência da exposição humana à radiação. As evidências levantadas por estudos mais recentes em mamíferos apontam para uma baixa absorção do urânio ou dos seus compostos pelo trato gastrointestinal (quando inalado ou ingerido) e conseqüente baixa toxicidade. Mais adiante veremos que o urânio em si não é o agente mais importante enquanto fator de risco à saúde humana, cabendo esse papel a um de seus descendentes: o radônio.

No ar atmosférico, as concentrações de urânio são geralmente muito baixas. Mesmo em concentrações superiores as usuais, há tão pouco urânio presente no ar que as concentrações giram em torno de 1 (hum) átomo de urânio por metro cúbico.

O urânio presente no ar na forma de pó cai na superfície da água, nas plantas ou no solo, por sedimentação ou por precipitação, podendo penetrar até as camadas inferiores do solo, onde ele se mistura com o urânio aí já presente. A atividade de extração e moagem na mineração do urânio produz resíduo os quais adicionam compostos de urânio ao meio ambiente.

Os compostos do urânio no solo irão combinar com outros compostos e podem permanecer no local durante anos sem se mover para a água subterrânea. As concentrações de urânio são muitas vezes mais elevada em solos ricos em fosfatos, mas isto não chega a ser um problema, porque mesmo assim, as concentrações de urânio, geralmente, não excedem as faixas de valores considerados normais para solos não contaminados.

A maior parte do urânio presente na água encontra-se dissolvido e origina-se de rochas e solos que servem de leito para acumulação aquífera. Em alguns casos, o urânio se apresenta em suspensão, dando a essa água uma textura lamacenta. Apenas uma pequena parte do urânio se apresenta imerso em partículas de água em suspensão no ar. A quantidade de urânio encontrada na água potável é geralmente muito baixa, o mesmo acontecendo em relação ao urânio encontrado em solos de um modo geral.

A Agência de Proteção Ambiental Americana (Environmental Protection Agency - EPA) estabelece um valor denominado “nível máximo de contaminantes” (em Inglês “Maximum Contaminant Level - MCL) para assegurar a qualidade da água potável.

Quanto à presença de urânio, o MCL foi estabelecido pela EPA com o valor de 30µg/L, em 8/12/2003 (EPA, 2012). Devido à sua natureza, é pouco provável que o urânio se acumule em peixes ou vegetais. Algumas pesquisas indicam que após ser absorvido, esse metal é eliminado rapidamente através da urina e fezes. Enfim, a ação antrópica é a principal responsável pela acumulação excessiva de urânio no meio ambiente e seus potenciais efeitos danosos.

O urânio e o ambiente

A erosão de rejeitos de minas e usinas pode dar origem ao lançamento de grandes quantidades de urânio no meio ambiente. Todos os seres vivos estão permanentemente expostos a quantidades de urânio, quer seja presente nos alimentos, no ar, ou na água. Vegetais do tipo raízes podem conter concentrações de urânio mais elevadas do que o habitual. Quando os vegetais são lavados o urânio é removido. As concentrações de urânio em frutos do mar são geralmente tão baixas que podem ser ignoradas.

O urânio penetra no corpo humano a partir do ambiente através da ingestão de comida e de bebida e por inalação de partículas respiráveis no ar, denominadas comumente de aerossóis, contendo pó de urânio. O consumo diário de urânio na comida e água varia entre cerca de 1 µg a 5 µg de urânio em regiões não contaminadas, e entre 13 µg a 18 µg ou mais, em zonas de extração de urânio. Uma pessoa de 70 kg, que desenvolva suas atividades em zonas isentas da exposição ocupacional ao urânio, apresenta um teor de urânio total estimado no corpo de cerca de 20 µg. O urânio é absorvido a partir do intestino ou do pulmão, entra na corrente sanguínea e, rapidamente, é depositado nos tecidos, predominantemente nos rins e ossos, ou é excretado na urina. Na corrente sanguínea, a depuração do urânio é relativamente rápida. A toxicidade renal é o principal efeito do urânio no organismo humano, mas o metal apresenta também efeitos tóxicos sobre o sistema cardiovascular, fígado, músculos e sistema nervoso. Qualquer possível risco direto de câncer ou outros efeitos na saúde por ação química ou da radiação induzida pelo urânio depositado no corpo humano é, provavelmente, menor que 0,005%, em contraste com um risco esperado indireto de 0,2% a 3% associado à inalação do gás radônio, que é produzido pelo decaimento do urânio-238. Este gás está presente nas rochas e no solo, bem como em

materiais que são usados para construir habitações e edifícios em geral, onde as pessoas vivem e trabalham.

Na esteira do uso de munições contendo urânio empobrecido (referido em Inglês como Depleted Uranium ou DU) durante a Guerra do Golfo em 1991 e nos Balcãs na década de noventa, uma controvérsia surgiu na opinião pública sobre os alegados efeitos do DU sobre a saúde humana e no meio ambiente. Relatórios oficiais, principalmente de origem militar, são fortemente questionados pela opinião pública. Esta controvérsia atingiu o seu pico no final do ano de 2000, quando o DU foi considerado responsável pela incidência de leucemia em soldados da força de manutenção de paz italiana (STOA, 2001). A radiotoxicidade do urânio empobrecido é próxima a do urânio natural. Em epidemiologia das radiações ionizantes, a contaminação por urânio é frequentemente citada como um fator de risco para câncer. Esse mesmo estudo realizado sob o patrocínio do Parlamento Europeu relata que nem por experiências com animais, nem por meio de estudos epidemiológicos sobre o homem, uma associação entre a incorporação de urânio natural ou DU e a incidência de leucemia foi encontrada (STOA, 2001).

As pessoas estão naturalmente expostas à radiação associada ao urânio e seus descendentes, formados durante o seu decaimento radioativo, e podem desenvolver câncer. Entretanto, as chances de contrair câncer são bem maiores quando as pessoas são expostas ao urânio enriquecido, que é uma forma de mistura de isótopos de urânio, na qual a porcentagem de urânio-235 é alta, e se constitui uma das formas mais radioativa do urânio. O urânio enriquecido emite uma radiação que pode levar as pessoas a desenvolverem câncer em poucos anos. O urânio-235, assim como alguns de seus descendentes não naturais, pode escapar para o meio ambiente durante acidentes em usinas nucleares. Um dos exemplos de radionuclídeos gerados pela fissão do urânio-235 é o iodo-131 (cujo acúmulo em excesso no organismo pode provocar câncer na tireoide), que foi liberado acidentalmente para o ambiente pelo acidente nuclear de Chernobyl.

Um dos produtos do decaimento do urânio-238 é o rádio-226, o qual, por sua vez, decai para o radônio-222, que é o radionuclídeo que está no foco dessa dissertação. Entretanto, para uma melhor compreensão dos efeitos do radônio, torna-se necessário estudar a sua origem e o seu comportamento desde a instabilidade nuclear e consequente desintegração do urânio-238, até a desintegração do seu quinto descendente, o rádio-226, este sim, gerador direto do radônio-222.

A origem e o comportamento do radônio

O radônio é um gás nobre, invisível insípido e inodoro naturalmente associado aos depósitos de urânio em solos, rochas e águas subterrâneas, e é o único descendente do urânio a se apresentar nas condições usuais de temperatura e pressão sob a forma de um gás. Foi descoberto entre 1898 e 1900 na Alemanha por Friedrich Ernst Dorn (1848 – 1916) que inicialmente o descreveu como uma substância “emanada” do rádio. Os químicos ingleses William Ramsay (1852 – 1916) e Robert Whytlaw-Gray (1877 – 1958) isolaram o radônio em 1908 e o (re) nomearam “niton”, a partir da palavra “nitens” do latim que significa “brilhante”. Tem um ponto de fusão de -71°C , ponto de ebulição de $-61,8^{\circ}\text{C}$. A sua densidade de gás é de $9,73\text{ g/L}$, a gravidade específica do estado líquido é de $4,4$ a -62°C . Com Valência zero (0), o radônio forma, contudo, alguns compostos (como o fluoreto de radônio, por exemplo). O radônio é um gás incolor em temperaturas normais, e é o mais pesado dos gases. Quando resfriado abaixo do seu ponto de congelamento ele exibe uma fosforescência brilhante. A fosforescência se torna mais e mais amarela como a redução da temperatura, tornando-se vermelho-alaranjado à temperatura de ar líquido. Estima-se que cada metro quadrado do solo a uma profundidade de seis polegadas ($15,24\text{ cm}$), contém aproximadamente 1 g de rádio, que libera radônio para a atmosfera.

O radônio se apresenta na Natureza sob trinta e nove (39) isótopos diferentes, que vão desde o radônio-193 (^{193}Rn) até o radônio-231 (^{231}Rn). Dentre todos esses o isótopo mais estável, ou seja, aquele que têm meia-vida considerável é o isótopo radônio-222 (^{222}Rn), com uma meia-vida de 3,82 dias. Nessa dissertação além do isótopo radônio-222, mais outros dois isótopos de radônio serão citados. São eles: o radônio (^{219}Rn) também conhecido como actinônio, e o radônio-220 (^{220}Rn) também conhecido como torônio. Entretanto, devido às suas respectivas meias-vidas relativamente curtas, não serão alvo de maiores preocupações. O actinônio tem uma meia-vida de $3,9\text{ s}$ e o torônio tem uma meia-vida de 56 s . Assim, os níveis de atividade das concentrações desses dois gases no ambiente são extremamente baixos, de modo que suas contribuições para a exposição humana à radiação são negligenciáveis, e assim, não há informações disponíveis sobre suas respectivas carcinogêneses (EPA, 2003). O radônio no foco do interesse dessa dissertação é o radônio-222.

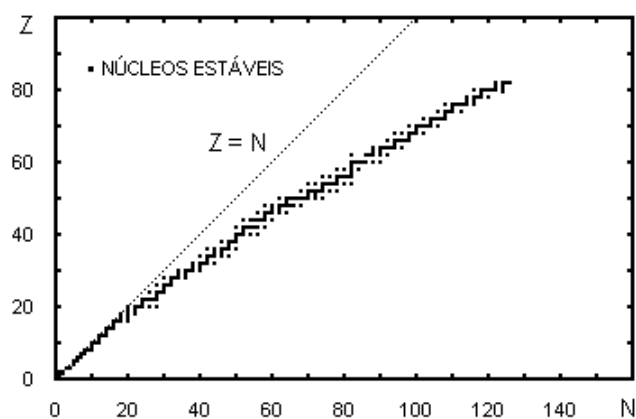
O radônio-222 é um importante **emissor alfa** (grifo nosso), ou seja, se desintegra emitindo uma partícula alfa. Devido a sua meia-vida de 3,82 dias, o radônio-222

permanece por mais tempo em suspensão no ar atmosférico e, uma vez inalado pode facilmente se depositar nas vias aéreas e no pulmão (EPA, 2003). Ao se desintegrar, o radônio-222 decai para o seu primeiro RDP: o polônio-218, que é outro importante **emissor alfa**, ou seja, o polônio-218 se desintegra emitindo uma partícula alfa. Os produtos do decaimento do radônio são denominados “Progênie do Decaimento do Radônio”, ou “Radon Decay Progeny”, ou melhor, RDPs. Outro importante **emissor alfa** presente na cadeia de desintegração do radônio-222 é o polônio-214, conforme será abordado no subitem “Equilíbrio secular” mais adiante nesse Artigo. Quando esta desintegração e consequente emissão alfa acontecem no pulmão, a radiação pode danificar as células que revestem as vias respiratórias, levando em última análise, ao câncer. O decaimento nuclear dos RDPs também libera energia sob a forma de partículas beta e radiação eletromagnética composta por fótons de alta energia (emissão gama), porém se acredita que os danos biológicos resultantes a partir dessas emissões sejam pequenos quando comparados com aqueles provocados pelas partículas alfa.

Estabilidade nuclear

Porque que certos átomos são estáveis e outros não o são?

Gráfico 1.1 Plotagem: n^o de nêutrons x n^o de prótons de isótopos da Tabela Periódica.



Fonte: PPC, 2013

Uma resposta completa a esta pergunta ainda não pôde ser dada muito em consequência do conhecimento apenas parcial da natureza exata das forças que mantêm juntas as partículas componentes dos núcleos atômicos. Pode-se, no entanto, apontar para alguns

fatores que afetam a estabilidade nuclear. Dentre esses, o mais obvio é a relação número de prótons/número de nêutrons. Ao se plotar o número de nêutrons x o número de prótons para os elementos da Tabela Periódica, se obterá algo como o Gráfico 1.1. Nesse Gráfico se nota que os elementos estáveis estão confinados a uma área específica do gráfico, a qual é denominada de “zona de estabilidade”. Para números atômicos baixos a maioria dos núcleos estáveis apresenta uma “relação número de nêutrons/número de prótons”, ou razão entre o número de nêutrons e o número de prótons, muito próxima de um (1). Porém, o interesse desse Artigo recai sobre os elementos instáveis mais pesados e que tendem a decair em modo alfa, como é o caso do urânio.

Outro fator que influi na estabilidade de um núcleo é a paridade do número de prótons e do número de nêutrons. Entre os trezentos e cinquenta e quatro (354) isótopos estáveis conhecidos, cento e cinquenta e sete (157), ou seja, quase a metade tem números pares de prótons e números pares de nêutrons. Apenas cinco (5) tem números ímpares dessas partículas nucleares. Com exceção do hidrogênio nota-se em todo o universo, que os elementos cujos referidos números são pares são muito mais abundantes do que aqueles cujos números são ímpares. Ou seja, existe uma estabilidade particular associada aos núcleos cujos números (sejam de nêutrons, sejam de prótons) são iguais a um dos denominados “números mágicos”: 2; 8; 20; 28; 50; 82 e 126. Esses números correspondem ao preenchimento de “camadas da estrutura nuclear”. As estruturas dessas camadas são semelhantes, em princípio, as estruturas das camadas eletrônicas, porém são consideravelmente diferentes nos detalhes. Enquanto um escrutínio mais detido dessas “estruturas” foge ao escopo do presente trabalho, citam-se alguns exemplos da referida associação e de expressiva abundância dos elementos aqui dados como exemplos: ${}^4_2\text{He}$; ${}^{16}_8\text{O}$; ${}^{40}_{20}\text{Ca}$; ${}^{208}_{82}\text{Pb}$.

(ou nominalmente: hélio;oxigênio;cálcio;chumbo)

Desintegrações nucleares naturais e tipos de radiação

Os processos químicos através dos quais os elementos instáveis se transformam em outros são espontâneos. Esses processos tem sido objeto da especulação dos estudiosos afins a essa área desde os primórdios dos estudos sobre o fenômeno. De um modo geral, a referida “transformação” acontece alheia à capacidade humana de previsão. Ou seja, é impossível antever quando um núcleo se desintegrará, se

transformando em um novo núcleo. Há, contudo, uma ferramenta matemática que se mostra essencial para o cálculo relativo à probabilidade da ocorrência da referida transformação: A Estatística. Daí, usando agora uma terminologia típica do jargão dessa área, diz-se que o decaimento radioativo é “estocástico”, ao nível de núcleos atômicos isolados. A Teoria Quântica toma como base a estatística e expressa essa mesma impossibilidade de previsão, completando a análise da situação, considerando que a chance de decaimento de um nuclídeo é constante no tempo. Para um grande número de átomos idênticos (ou seja, do mesmo nuclídeo), é possível determinar a taxa de decaimento para o conjunto desses átomos com base em uma teoria estatística denominada “Lei dos Grandes Números”.

A única forma de transformar um elemento químico em outro é através da alteração do número de prótons no seu núcleo atômico, visto que os elementos são definidos e diferenciados pelo número de prótons nos seus respectivos núcleos. Essas transformações ou “transmutações” podem ocorrer sob as mais variadas formas, dentre as quais, aquelas reconhecidamente mais usuais e que serão apresentadas mais adiante. Uma vez ocorridas, essas transmutações são irreversíveis – o átomo jamais voltará a ser o que era antes.

Os átomos cujos núcleos estão sujeitos às referidas transmutações são denominados “isótopos instáveis”. Todos os átomos encontrados na Natureza são isótopos de um elemento ou outro. O Dicionário Oxford define o termo isótopo como:

[...] substantivo:
Química:
cada uma das duas ou mais formas do mesmo elemento que contêm números iguais de prótons mas diferente número de nêutrons no seu núcleo e, portanto, diferem em massa atômica relativa, mas não nas propriedades químicas. Em particular, uma forma de um elemento radioativo. Alguns elementos tem apenas um único isótopo estável.

(DICIONÁRIOS OXFORD, 2012)

Porém, o jargão científico-técnico da área nuclear costuma se referir aos isótopos instáveis de certos elementos apenas como “isótopos”. O número associado ao isótopo é o número de massa (número de prótons + número de nêutrons). Por exemplo, o chumbo-206 (^{206}Pb) tem 82 prótons +124 nêutrons no seu núcleo atômico.

A fim de ilustrar o conceito original de isótopo analisa-se aqui o caso do oxigênio: Todos os átomos de oxigênio têm no núcleo oito (8) prótons. Daí o número atômico do oxigênio ser oito (8). Porém, isótopos do oxigênio podem ter entre oito (8)

a dez (10) nêutrons no núcleo, e assim esse elemento químico apresenta isótopos com diferentes massas atômicas. Essas massas são respectivamente 16 u.m.a do oxigênio-16 (^{16}O) 17 u.m.a do oxigênio-17 (^{17}O) e 18 u.m.a do oxigênio-18 (^{18}O), onde u.m.a. é abreviatura de unidade de massa atômica.

Dentre os exemplos mais notórios de isótopos instáveis estão os isótopos do urânio, como o urânio-238 (^{238}U), e o urânio-235 (^{235}U); e do tório-232 (^{232}Th), etc..

Um fato é notório com relação às transmutações: Em geral, acontecem acompanhadas de emissões sob a forma de **radiação** (grifo nosso). Deve-se atentar, entretanto, para o fato de que pode haver emissão sob a forma de radiação a partir de um núcleo atômico, sem que isso se faça acompanhar necessariamente de uma transmutação desse núcleo, como se pode ver mais adiante no subitem de título “*A transição isomérica e a emissão de radiação gama (γ)*”. As emissões associadas a qualquer tipo de reação nuclear podem ser compostas por partículas ou não. Entretanto, de um modo geral, as transmutações nucleares estão associadas às emissões radioativas e vice-versa.

O termo “radioatividade” se refere primariamente à emissão de partículas e/ou de radiação (que nada mais é que energia sob a forma de ondas eletromagnéticas) pelo núcleo atômico em consequência da sua instabilidade.

O tipo de decaimento radioativo que interessa essencialmente aos trabalhos que servem aos objetivos dessa dissertação é o **decaimento alfa** (grifo nosso). Entretanto, para que o conhecimento desse tipo de decaimento seja bem fundamentado, serão abordados também o decaimento beta e a emissão gama.

Assim os principais tipos de decaimento e respectivas radiações são então: o decaimento alfa; o decaimento beta e a emissão gama.

O decaimento e a radiação alfa

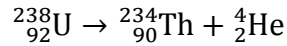
De longe, um dos tipos de decaimentos mais frequentes na Natureza. É aquele decaimento radioativo no qual o núcleo emite uma partícula de carga positiva denominada de **partícula alfa** (grifo nosso). O núcleo original se transmuta em um núcleo de um novo elemento, agora com número atômico $Z_1 = Z_0 - 2$ e número de massa $A_1 = A_0 - 4$. Assim o chamado “decaimento alfa”, é representado matematicamente pela expressão:



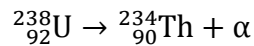
Nesse tipo de representação, X é o átomo progenitor (a) e Y é o átomo filho (a), enquanto Z é o número atômico e A é a massa atômica. A partícula alfa é representada

por um núcleo de Hélio-4 (${}^4\text{He}$), elemento que tem número atômico 2 e número de massa 4.

A Figura 1.1 ilustra um exemplo de decaimento alfa: o decaimento do urânio-238 para o tório-234, que é dado matematicamente pela expressão:



que pode também ser escrito como:



A emissão da partícula alfa também é conhecida como “radiação alfa”. Diferentemente do decaimento beta, o decaimento alfa é resultante da interação de forças nucleares e forças eletromagnéticas agindo sobre o núcleo. Em tese o decaimento alfa é a forma de decaimento preferencial em núcleos iguais ou mais pesados que o telúrio (${}_{52}\text{Te}$), o qual possui cinco isótopos estáveis: telúrio-122; telúrio-123; telúrio-124; telúrio-125; telúrio-122, e três isótopos instáveis: telúrio-120; telúrio-128; telúrio-130.

Devido a sua massa relativamente grande e sua velocidade relativamente baixa a partícula alfa tende a interagir mecanicamente com átomos ao longo da sua trajetória e com isso perder energia. Dessa forma o seu avanço é barrado por até mesmo alguns centímetros de ar. Entretanto, a perda de energia para o ambiente resulta na ionização deste, uma das características mais preocupantes com relação às partículas alfa.

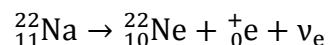
O decaimento e a radiação (β)

O decaimento beta é o tipo de decaimento radioativo no qual o núcleo atômico decai emitindo uma partícula beta (um elétron ou um pósitron). Essa emissão também é conhecida como radiação beta. É um decaimento intermediado pela força fraca. Existem então dois tipos de decaimento beta: o “decaimento beta +” e o “decaimento beta -”.

O decaimento beta + (${}^+\beta$): O decaimento beta+ (beta mais) é aquele no qual o núcleo emite uma partícula beta positiva (um pósitron). É simbolizado como ${}^+\beta$ (ou ${}^+_0e$), que se lê “partícula beta mais”.

Decaimento Beta menos (β^-):

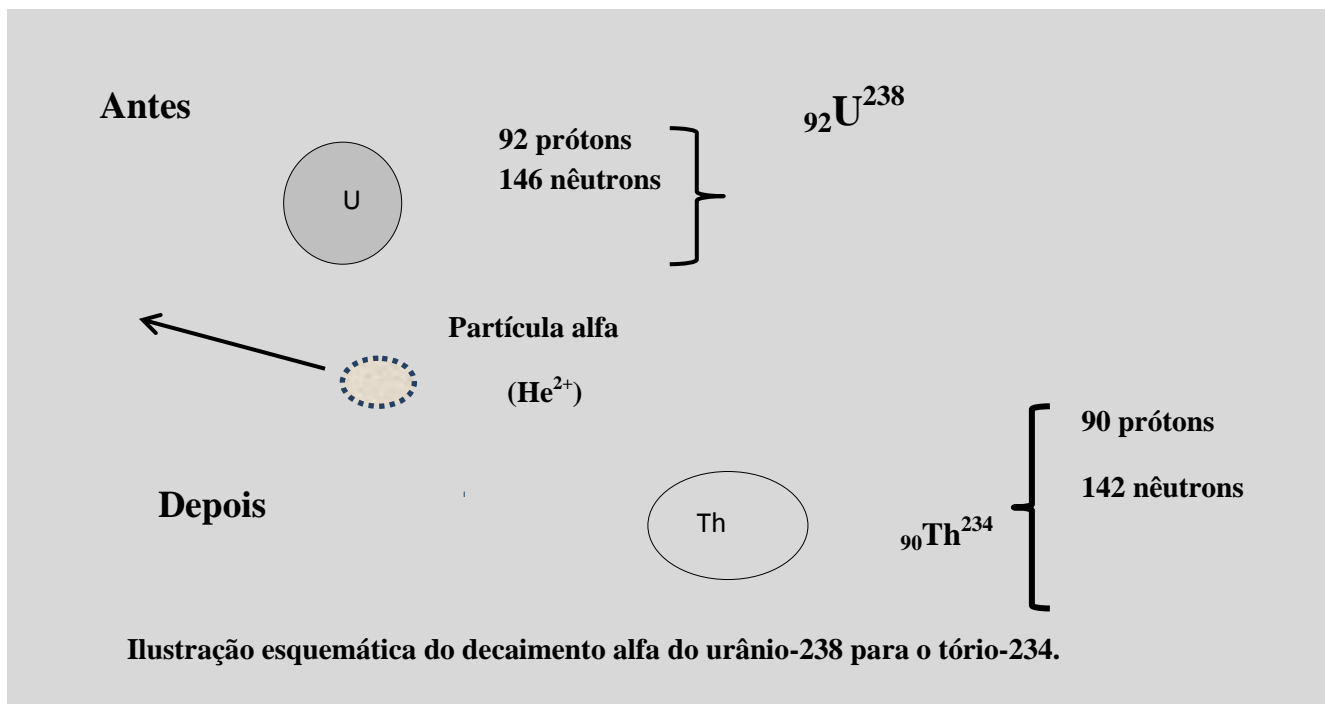
Um exemplo de decaimento ${}^+\beta$: O decaimento do sódio-22 para o neônio-22:



Onde ν_e representa um neutrino do elétron, que é uma partícula subatômica.

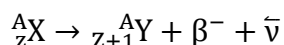
Do ponto de vista da física nuclear, o decaimento beta é a resposta preferencial a instabilidade associada ao excesso de nêutrons no núcleo atômico.

Figura 1.1 Ilustração esquemática do decaimento alfa de um núcleo de urânio-238 para um núcleo de tório-234.

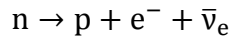


Construção do Autor, 2013.

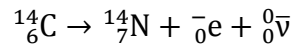
Quando a razão nêutron/próton é muito alta, um nêutron se “transforma” em um próton e um elétron é então ejetado do núcleo atômico. Esse modo de decaimento é denominado “decaimento beta menos”, (simbolizado β^-) e o elétron emitido é denominado partícula beta (simbolizado pela letra grega β , ou “beta”). A emissão de uma partícula β é acompanhada pela emissão de um antineutrino. A expressão matemática que representa esse decaimento é:



A letra grega que aparece no último termo da direita é ν (que se pronuncia “ni”) e é usada para representar o neutrino. As partículas β (beta) tem um espectro contínuo de energia que vão desde o zero (0) até o valor máximo de energia disponível (Q). O valor depende dos estados nucleares do núcleo pai/mãe e do núcleo filho/filha envolvidos na reação. Esse é um dado importante usado na construção de protocolos de identificação de radionuclídeos. Um típico valor Q gira em torno de 1 MeV, mas pode variar desde alguns keV até dezenas de MeV. Sendo a massa de repouso do elétron equivalente a 511 keV, as partículas betas mais energéticas são ultrarrelativísticas (partículas com velocidades próximas a velocidade da luz). Nesse tipo de decaimento a força fraca converte um nêutron em um próton, emitindo um elétron e um antineutrino do elétron:



Um exemplo de decaimento $\bar{\beta}$: O decaimento do carbono-14 em nitrogênio-14.

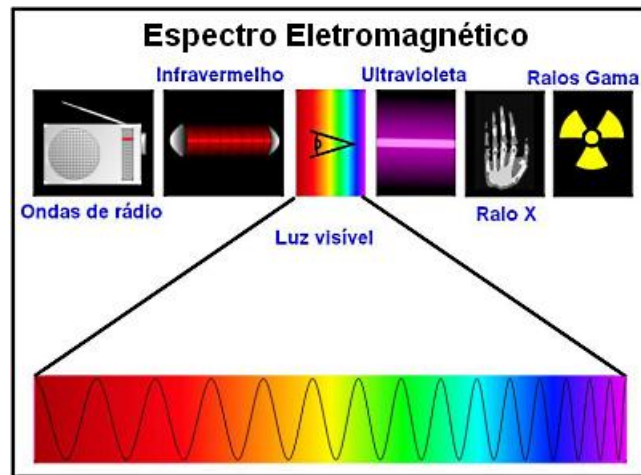


A transição isomérica e a emissão de radiação gama (γ)

Os radionuclídeos produzidos por decaimentos alfa ou por emissões de elétrons (decaimentos $\bar{\beta}$) de um modo geral se apresentam em estado excitado. A energia em excesso é então liberada sob a forma de um fóton, simbolizado pela letra grega γ (gama). Caracteristicamente, esse fóton, ou “raio gama”, ou ainda, raio- γ , é emitido dentro de um intervalo de tempo de 10^{-12} s, ou seja, um (1) pico segundo depois da emissão da partícula. A “radiação gama” não é composta por partículas a semelhança dos casos da emissão alfa ou da emissão beta. Ou seja, **não existe uma “partícula gama”** (grifo nosso). O que se verifica é a emissão de fótons de alta energia. A emissão gama por si só, ou seja, isolada, não é responsável pela transmutação de um núcleo instável em um novo núcleo (instável ou não). Então, um processo no qual o núcleo emite radiação gama, sem, contudo, transmutar-se em outro núcleo novo, é denominada “transição isomérica”. Como o próprio nome sugere, trata-se de um processo de “decaimento” no qual um núcleo atômico em um estado excitado ou “metaestável” (ou seja, quase estável), emite um raio gama perdendo assim energia, e alcançando um estado de energia mais baixa, ou eventualmente, o seu estado fundamental.

Os raios gama são como os raios X (ou como a luz visível), pacotes de energia sem massa, denominados “fótons” ou ainda “quanta”, e apresentam as mesmas propriedades físicas comuns às ondas eletromagnéticas (capacidade de transportar momento e força). A diferença fundamental entre essas duas formas de manifestação eletromagnética está nas suas respectivas origens. Os raios X são gerados a partir de processos de interação entre cargas elétricas e a matéria que tomam lugar em locais exteriores ao núcleo atômico. Os raios gama têm origem no interior do núcleo atômico. Os raios gama são de comprimento de ondas menores que os raios X e muito mais penetrantes que estes. Uma fonte natural de raios gama é o potássio-40 (${}^{40}\text{K}$). O teor de potássio-40 na constituição do corpo humano é de 0,2%. Assim, uma pessoa que pesa 70 kg, estará associada a uma atividade radioativa em forma de emissão gama de cerca de 4.000 Bq, ou seja, 4 kBq.

Figura 1.2. Espectro eletromagnético com destaque para a faixa da luz visível. O comprimento de onda decresce com o avanço para a direita.



Fonte: PCE, 2013

Algumas “transmutações” interessantes são acompanhadas por emissões gama e essa característica é utilizada na configuração de protocolos de identificação de radionuclídeos que formam a base, por exemplo, do processo de prospecção geológica do urânio por métodos radiométricos.

O comprimento de onda da emissão gama (radiação- γ) está na parte mais a esquerda em relação à faixa de luz visível do espectro eletromagnético (veja a Figura 1.2).

Como parte da cadeia de decaimento do urânio-238, existem alguns decaimentos alfa e decaimentos beta, que ocorrem concomitantes com expressivas emissões gama. É importante notar que tanto o urânio-238 (^{238}U) na série do urânio, quanto o tório-232 (^{232}Th) na série do tório, **não são emissores gama significativos** (grifo nosso). Por essa característica os métodos usados para avaliar as suas respectivas concentrações na Natureza, tomam como base as medições das emissões gama dos seus respectivos produtos radiogênicos, esses em geral, emissores gama significativos. Na série de decaimento do urânio-238, o rádio-226, que tem uma meia-vida de 1.620 anos, decai emitindo uma partícula alfa e um raio gama para formar o radônio-222 (^{222}Rn).

A Lei fundamental do decaimento radioativo

“O decaimento radioativo é uma transformação nuclear espontânea que tem demonstrado ser independente da influência da pressão, temperatura, composição química (exceto em alguns

crístais muito especiais). Essa insensibilidade às condições extranucleares permite caracterizar os núcleos radioativos pelo período, pelo modo e pela energia de decaimento, a despeito das condições físicas ou químicas.”

– CHOPPIN et al., 2001

A lei fundamental do decaimento radioativo toma como base o fato de que uma transmutação de um núcleo atômico da condição de “núcleo progenitor (a)” para a condição de “núcleo filho (a)” é um evento resultante de um processo puramente estatístico. A probabilidade de desintegração é uma propriedade fundamental do núcleo atômico que permanece inalterada no tempo. Há, portanto uma formulação matemática que pode expressar essa lei:

$$dN = -\lambda N dt \quad 1.1$$

ou

$$\lambda = \frac{-(dN/dt)}{N} \quad 1.2$$

onde N representa o número de núcleos radioativos presentes em uma “amostra”, e dN representa um decréscimo infinitesimal dessa quantidade N. Matematicamente, o decréscimo infinitesimal dN ocorre em um intervalo de tempo de ordem infinitesimal que será simbolizado por dt. A letra grega λ (lambda) representará a probabilidade constante de decaimento por núcleo por unidade de tempo.

A taxa de decaimento é, então, definida como o número de decaimentos por unidade de tempo, ou seja, matematicamente esse evento é expresso pela igualdade:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad 1.3$$

onde o sinal negativo indica decréscimo. Partindo dessa formulação é possível prever resultados práticos que tornam possível trabalhar quantitativamente com os nuclídeos radiogênicos.

Aqui se faz uma análise resumida do desenvolvimento das ferramentas primordiais para a previsão quantitativa das características interessantes do decaimento radioativo. Inicia-se a tarefa, integrando a relação 1.3, e aplicando as condições de fronteira.

$$t = 0 \rightarrow N = N_0,$$

obtem-se:

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \quad 1.4$$

e conseqüentemente a “equação do decaimento exponencial”.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad 1.5$$

Guardado que tanto o número original de átomos da amostra N_0 quanto a sua atividade original A_0 decaem segundo a mesma lei, pode-se fazer referencia a atividade radioativa (A) e escrevê-la como:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad 1.6$$

onde A_0 representa a atividade inicial da amostra radioativa. Assim, o tempo t decorrido para que A_0 tenha decrescido para A , (ou seja, a idade do material da amostra) é dado pela relação:

$$t = -\left(\frac{1}{\lambda}\right) \ln\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad 1.7$$

As relações 1.5 e 1.6 indicam as medidas do decaimento do número original N_0 de núcleos radioativos e da atividade radioativa original A_0 .

“Meia-vida” e vida-média

A prática usual para fazer referencia ao grau de instabilidade ou a taxa de decaimento de um núcleo radioativo é rotulá-lo pela sua “meia-vida” ($t_{1/2}$), ou seja, o período de tempo no qual a metade da radioatividade original, ou a metade dos nuclídeos presentes na amostra original desapareceu. Tomando como base a expressão 1.7 acima é fácil verificar que esse tempo será dado por:

$$t_{1/2} = \left(\frac{\ln 2}{\lambda}\right) \quad 1.8$$

Do valor conhecido da meia-vida é possível calcular a constante de decaimento λ :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{t_{1/2}} \quad 1.9$$

A “vida-média” de um nuclídeo é definida por meio da estatística regular. Dado uma população de elementos (certo número de nuclídeos) cujo número inicial decai paulatinamente até zero, a vida média, τ , é o valor esperado do intervalo de tempo após o qual o elemento deixa de existir. Especificamente, se o tempo de vida individual de cada elemento é a diferença entre um tempo de referencia e a remoção/desaparecimento desse elemento do conjunto original, a vida média é a média aritmética das vidas individuais. Assim, tomando a população $N = N_0 e^{-\lambda t}$, se introduz um fator de

normalização “c”, com vistas a transferir o procedimento para o espaço das probabilidades.

$$1 = \int_0^{\infty} c \cdot N_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{cN_0}{\lambda} \therefore c = \frac{\lambda}{N_0}$$

$$\tau = \langle t \rangle = \int_0^{\infty} c \cdot t \cdot N_0 e^{-\lambda t} dt = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad 1.10$$

(Observação: A última integral foi resolvida mediante o método de integração por partes).

O crescimento de produtos radioativos

Considere-se o caso genérico da formação de uma nova substância radioativa, em consequência do decaimento de outra substância radioativa previamente existente. Admita-se que essa substância seja o conteúdo de uma “amostra” de certo isótopo instável que aqui se denominará “amostra 1”, composta inicialmente por uma quantidade N_1 de átomos. E que esses N_1 átomos decaem para formar, depois de um intervalo de tempo t , uma “nova amostra” composta por uma quantidade N_2 de átomos de uma segunda espécie de isótopo, que aqui se denominará “amostra 2”. O estudo matemático do desenvolvimento temporal da formação da “amostra 2”, toma como ponto de partida, uma “Equação Geral”.

Equação geral do decaimento radioativo

A fórmula geral do decaimento dos N_1 átomos da “amostra 1” acima referida será:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \text{ ou } \frac{dA_1}{dt} = -\lambda_1 A_1 \quad 1.11$$

onde λ_1 , é a constante de decaimento relativa aos núcleos (dos átomos) da “amostra 1”. O sinal negativo no segundo membro da equação acima representa a diminuição temporal da quantidade de átomos na amostra 1. Integrando a expressão 1.11 tem-se

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \text{ ou } A_1 = A_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad 1.12$$

onde o símbolo N_1^0 foi usado para representar o número de átomos N_1 no instante $t = 0$. A mesma fórmula se aplica a atividade A_1 da “amostra 1”. Em todas as reações

nucleares referidas nessa dissertação, as constantes de decaimento radioativo serão representadas pela letra grega λ (lambda). Sendo assim para o decaimento da “amostra 1”, tem-se a constante de decaimento radioativo para os N_1 átomos, representada por λ_1 . Para a “amostra 2”, tem-se a constante de decaimento radioativo dos N_2 átomos, representada por λ_2 .

Na relação 1.12 estão apresentadas as expressões matemáticas que regem o decrescimento da amostra do radionuclídeo pai/mãe, seja do ponto de vista do número de átomos existentes na “amostra 1” (N_1), seja do ponto de vista da sua atividade (A_1).

O número de átomos N_2 na “amostra 2” cresce na medida em que o número de átomos N_1 da “amostra 1” decresce (decai). Contudo esse número N_2 é também influenciado pelo próprio decaimento da “amostra 2”, no caso em que os seus N_2 átomos sejam ainda instáveis, como, aliás, é muito comum. Isso é representado matematicamente pela seguinte equação diferencial linear de primeira ordem:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad 1.13$$

A solução da equação diferencial linear de primeira ordem em 1.13 é

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t} \quad 1.14$$

Essa solução (encontrável através de métodos tradicionais do cálculo diferencial) pode ser testada mediante sua substituição na equação 1.13. Na expressão 1.14 o primeiro termo da direita representa o crescimento da “amostra 2” associado ao decaimento da “amostra 1” enquanto o segundo termo representa o decaimento da “amostra 2” em consequência da sua própria atividade radioativa. Vale notar que se $\lambda_2 = 0$, ou seja, se a “amostra 2” é formada por átomos estáveis, então se tem como expressão da quantidade de átomos na “amostra 2”, a expressão:

$$N_2 = N_2^0 + N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad 1.15$$

Dois aspectos característicos desses decaimentos sucessivos são dignos de nota e interesse específico, visto suas aplicações nos cálculos relativos aos decaimentos do rádio-226 e do radônio-222. São eles:

- i) o cálculo da atividade da “amostra 2”, e;
- ii) a razão λ_1/λ_2 .

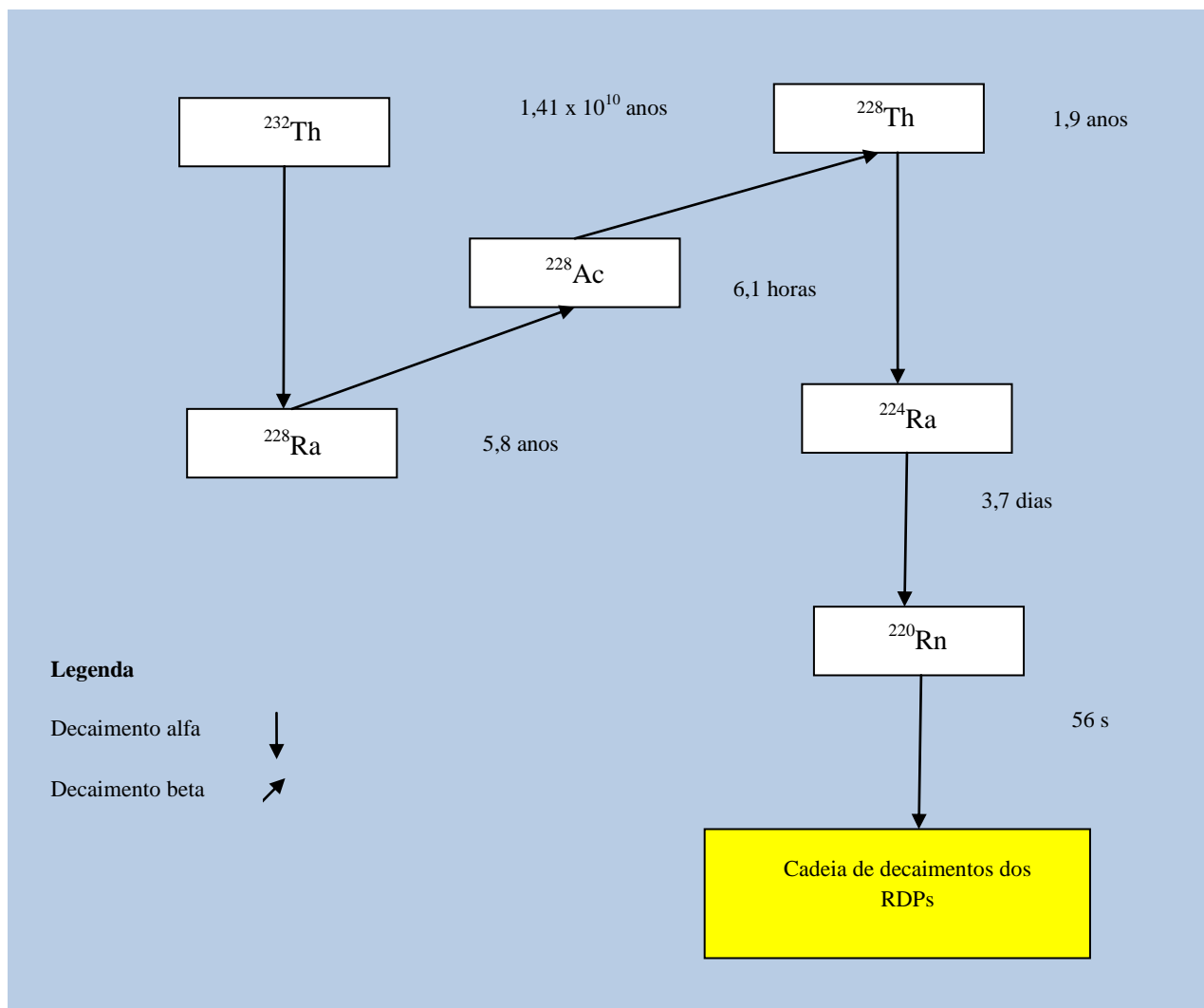
É óbvio que essa razão é o fator dominante da atividade do radionuclídeo filho (a) no tempo. Por isso os detalhes dessa relação estão desenvolvidos na seção de título “Cadeia de decaimentos do radônio-222 e de seus RDPs: Equilíbrio secular” a qual

abordará as relações matemáticas entre as quantidades de átomos pais/mães e filhos (as), visto a partir da variação da razão entre as constantes de decaimento das “amostras” 1 e 2, λ_1/λ_2 .

As desintegrações naturais do tório-232, do urânio-238 e do urânio-235

O conhecimento básico da física nuclear que descreve as transmutações dos elementos que compõem as séries radioativas formadas pelas respectivas cadeias de desintegração do tório-232, do urânio-238 e do urânio-235, é essencial para o desenvolvimento técnico dessa dissertação.

Figura 1.3. Diagrama esquemático da cadeia de desintegrações sucessivas características da série do tório-232.



Assim, essas séries e suas respectivas transmutações são apresentadas abaixo.

A série do tório-232 (^{232}Th)

A série do tório (conhecida como cadeia 4n), e é encabeçada pelo tório-232 (^{232}Th) um elemento químico de ocorrência natural. Entre o tório-232 até o radônio-220, essa série inclui os seguintes elementos: actínio, bismuto, chumbo, polônio e rádio. A Figura 1.3 mostra um diagrama esquemático da cadeia de decaimentos do tório-232.

Figura 1.4 Diagrama esquemático da cadeia de desintegrações sucessivas características da série do urânio-238, ou série do rádio.

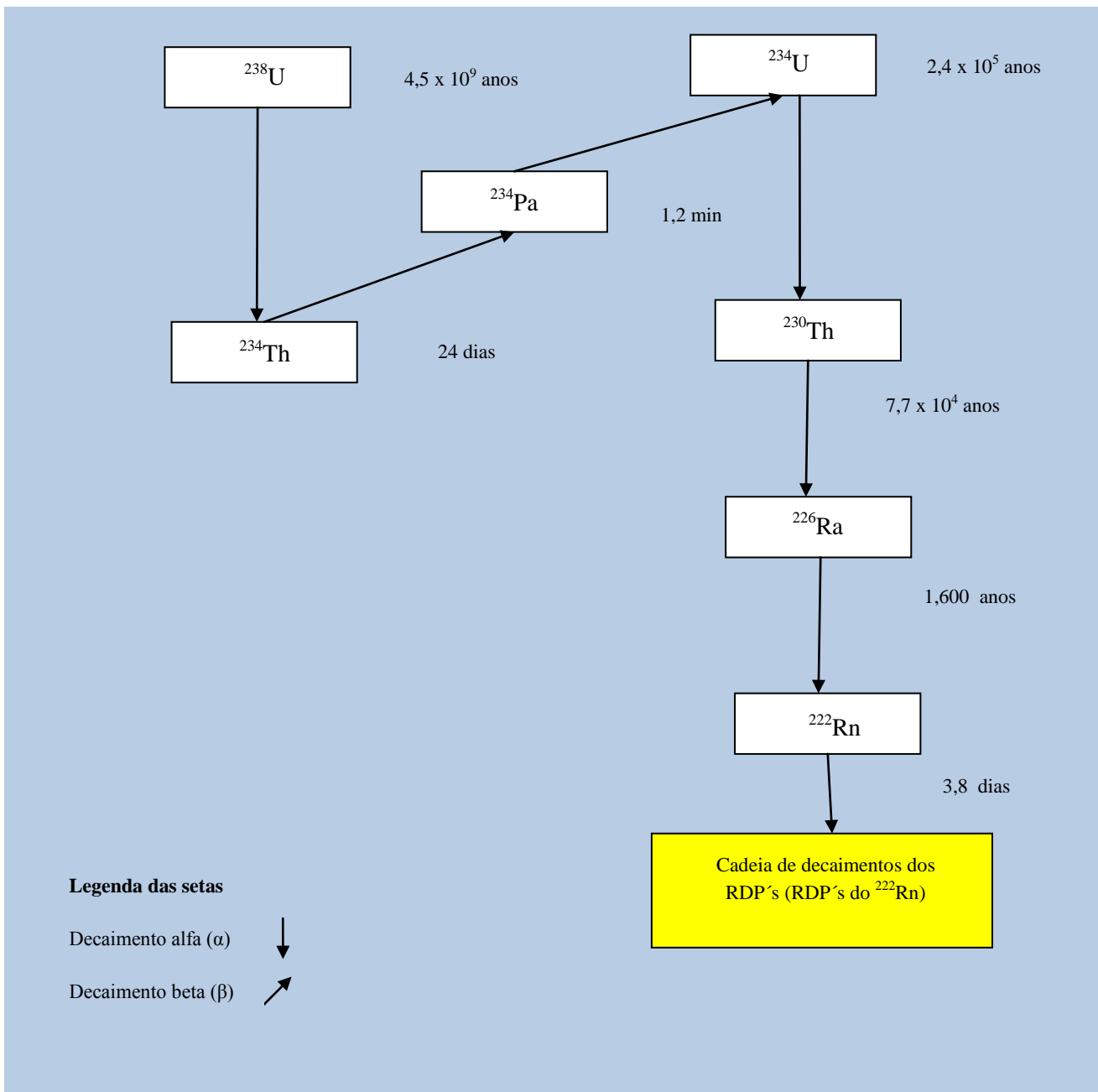
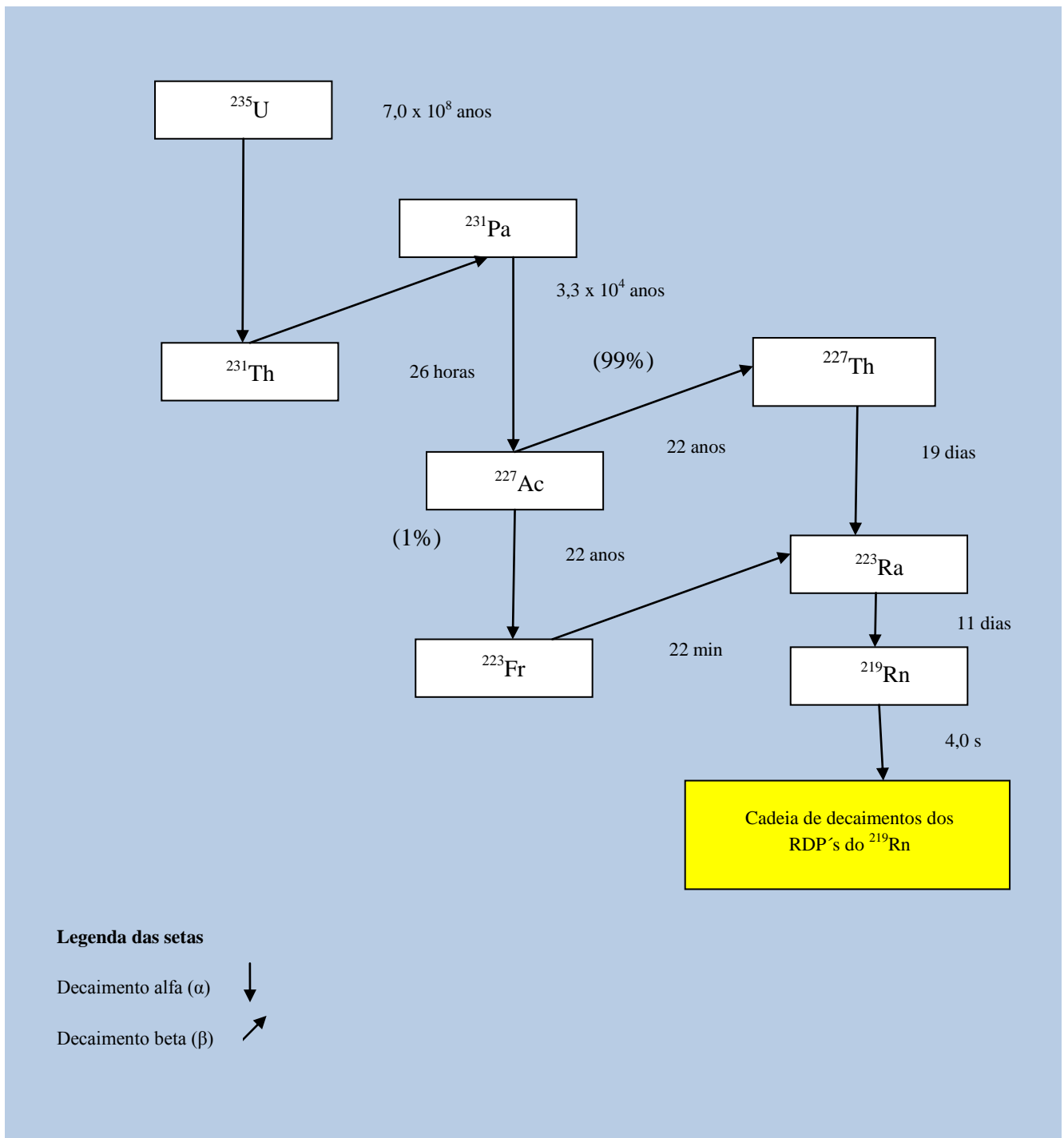


Figura 1.5. Diagrama esquemático da cadeia de desintegrações sucessivas características da série do urânio-235, ou série do actínio.



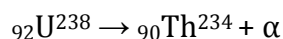
Construção do Autor, 2013.

A série do urânio-238 ou série do rádio

A série do urânio ou série do rádio (também conhecida como série $4n+2$) é encabeçada pelo urânio-238. Essa série de decaimentos radioativos é aquela que está no foco dos trabalhos dessa dissertação, em virtude da presença do radônio-222, em decorrência do decaimento alfa do rádio-226. O resultado da desintegração do rádio-226 é previsto pela equação ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$. O termo ${}^4_2\text{He}$ representa a partícula alfa que, como já se sabe, é um núcleo do elemento hélio (He), também representado como ${}^4_2\text{He}^{+2}$. O decaimento do urânio-238 é o primeiro exemplo de decaimento alfa, nessa série. O urânio-238 decai, se transmutando em tório-234. Esse decaimento é dado pela relação:



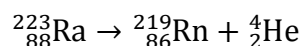
ou



A Figura 1.4 mostra um diagrama esquemático da série de decaimentos do urânio-238.

A série do actínio

A série do urânio-235 (também referida como série $4n + 3$) é comumente denominada de série do actínio. Nessa cadeia de desintegração, o rádio-223 decai dando origem ao radônio-219. O resultado dessa desintegração é previsto pela equação



O radônio-219 é também conhecido como actinônio, tem uma meia-vida de 4,0 s, ou seja, extremamente curta e não será tratado em detalhes nessa dissertação.

Cadeia de decaimentos do radônio222 e de seus RDPs: Equilíbrio secular

O radônio-222 é um importante **emissor alfa** (grifo nosso), ou seja, se desintegra emitindo uma partícula alfa. Devido a sua meia-vida de 3,82 dias, o radônio-222 permanece por mais tempo em suspensão no ar atmosférico e, uma vez inalado pode facilmente se depositar nas vias aéreas e no pulmão (EPA, 2003). Ao se desintegrar, o radônio-222 decai para o seu primeiro RDP: o polônio-218, que é outro importante emissor alfa, ou seja, o polônio-218 se desintegra emitindo uma partícula alfa. Os produtos do decaimento do radônio são denominados “Progênie do Decaimento do Radônio”, ou “Radon Decay Progeny”, ou melhor, RDPs.

Na discussão acima na qual foi abordada a influencia da razão λ_1/λ_2 sobre o quadro final da concentração de amostras de radionuclídeos relacionados entre si pela relação pai-mãe /filho(a), e os átomos da amostra 1 decaem muito lentamente quando essa velocidade de decaimento é comparada com a velocidade de decaimento dos átomos da amostra 2, para um período de tempo longo, a quantidade $e^{-\lambda_1 t}$ vai se tornar muito maior que a quantidade $e^{-\lambda_2 t}$ e incluindo a condição inicial $N_2 = 0$ no momento $t = 0$ e podemos então escrever a equação:

$$N_2 \sim \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \rightarrow \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad 1.16$$

Isso significa dizer que as atividades das amostras 1 e 2 se igualaram, ou ainda, dizer que as atividades da amostra 1 e da amostra 2 estão em equilíbrio.

Outro importante emissor alfa presente na cadeia de desintegração do radônio-222 é o polônio-214. Quando esta desintegração e consequente emissão alfa acontecem no pulmão, a radiação pode danificar as células que revestem as vias respiratórias, levando em última análise, ao câncer.

Equilíbrio secular radônio/RDPs e a ameaça para os pulmões

Nas condições acima descritas um equilíbrio pleno é alcançado em cerca de 30 horas e então o ar é denominado “completamente maduro”. O conceito de amadurecimento do ar é importante para compreender a influência do decaimento do radônio na construção do equilíbrio secular radônio/RDPs. A Figura 1.4 ilustra o esquema de decaimento do radônio-222 e de seus principais RDPs, com suas respectivas meias-vidas. No equilíbrio secular o número de átomos de cada um dos RDPs é proporcional à sua respectiva meia-vida. As meias-vidas mais curtas dos seus RDPs podem provocar danos ao aparelho respiratório, visto se tornarem emissores alfa bem mais prolíficos agindo no interior do aparelho respiratório (MCPHERSON, 1993). Os RDPs são partículas sólidas e se constituem nos agentes prejudiciais a saúde do aparelho respiratório, pois podem aderir às membranas mucosas, e seguirem retidas dentro do tecido pulmonar. Por conseguinte, os RDPs, ao invés do gás nobre radônio-222 é que são perigosos para a saúde visto que suas respectivas desintegrações acontecem com taxas muito maiores que a taxa de desintegração do radônio.

Vale ressaltar que a alta incidência de câncer de pulmão em mineiros de urânio é atribuída aos RDPs.

Atividade das concentrações de radônio

Durante o desenvolvimento dos trabalhos de campo o conceito de **atividade das concentrações de radônio** será continuamente aplicado devido a sua importância definitiva para efeito da contabilização dos dados coletados por meio das atividades de medição/monitoração. Em termos práticos para essa dissertação será usado termo “concentração” para se referir aos níveis das atividades das concentrações de radônio. Essa terminologia foi adotada em função da facilidade comparação rápida no campo entre os valores medidos e os valores limites de tolerância estabelecidos pela UNSCEAR e pela EPA.

Os níveis de concentração de radônio (ou concentrações de radônio) podem ser medidos mediante duas unidades que se relacionam. São elas: o Becquerel e o Curie.

O Becquerel (símbolo Bq) é a unidade de medida de desintegração nuclear no Sistema Internacional (SI), e equivale a uma desintegração por segundo, referida como s^{-1} . Essa unidade é assim denominada em homenagem a Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908), descobridor da radioatividade e ganhador do Prêmio Nobel de Física de 1903, juntamente com o casal Pierre (1859 – 1906) e Marie Curie (1867 – 1934). Para fins de representação dessa unidade em cálculos, é mais comum o uso do símbolo Bq.

O Curie (símbolo Ci) é uma unidade não-SI de medida de radioatividade, concebida em homenagem ao casal Pierre (1859 – 1906) e Marie Curie (1867 – 1934).] Ele é definido como:

$$3,7 \times 10^{10} Bq$$

Um curie é a medida aproximada da atividade de 1 grama do isótopo rádio-226, uma substância estudada pelo casal Curie.

Nas medições desenvolvidas nos trabalhos dessa dissertação usou-se o Bq/ m³ (Becquerel por metro cúbico) e o pCi/ L. Vale lembrar que 1 pCi equivale a 10^{-12} Ci. E a relação entre os valores dos níveis de concentração do radônio medidos em Becquerel por metro cúbico, ou Bq/m³, e o seu correspondente em picocurie por litro, ou pCi/L, é dada pelo cálculo abaixo:

$$1 \text{ Ci} \rightarrow 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$4 \text{ pCi} / \text{L} \rightarrow 4 \times 10^{-12} \text{ Ci} \rightarrow x$$

$$x = 3,7 \times 4 \times 10^{10} \times 10^{-12}$$

$$= 1,48 \times 10^{-1} \text{ Bq} = 0,148 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ L} = 0,001 \text{ m}^3 \rightarrow \frac{0,148 \text{ Bq}}{0,001 \text{ m}^3} = \frac{1,48 \times 10^{-1} \text{ Bq}}{1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3} = 1,48 \times 10^2 = 148 \text{ Bq} / \text{m}^3$$

Radônio e Riscos à saúde humana

A inalação de radônio representa um risco à saúde, por ser esse elemento o único produto de decaimento do urânio a se apresentar na natureza sob a forma de um gás radioativo (ANL, 2005).

Tabela 1. 1. Principais características físicas do radônio

Classificação do Elemento	Características
Densidade (g / cc)	4,4 (@ -62 ° C
Ponto de fusão	202 ⁰ K
Ponto de Ebulição	211,4 ⁰ K
Aparência	Gás radioativo pesado
Calor específico (@ 20 ° C J / g mol	0,094
Calor de evaporação (kJ / mol):	18,1
Primeira energia ionizante (kJ / mol):	1036,5
Estrutura cristalina	Cúbica de face centrada

Construção do Autor, 2013.

Essa propriedade é motivo das preocupações ambientais e de saúde associadas ao radônio. Como um gás esse elemento é capaz de migrar a partir da localização do átomo de urânio original para o gás do solo circundante. Em todo o mundo, uma média de cerca de dois átomos de radônio são emitidos por cada centímetro quadrado de solo da Terra por segundo por dia (ANL, 2005). É por essa razão que praticamente todas as casas do planeta sempre tiveram seus ambientes internos e externos permeados por radônio, e sempre haverá ocorrência de radônio em casas e prédios. Pelas suas características nucleares o radônio se constitui uma forma de radiação ionizante sendo classificado, pela Organização Mundial de Saúde, como um agente cancerígeno (EPA, 2012).

O acúmulo do radônio é importante item nocivo a ser considerado quando se trabalha em ambientes onde estão presentes os radionuclídeos como rádio, tório, etc. O radônio é por isso um problema sanitário potencial em minas, de um modo geral e em minas de urânio, em especial.

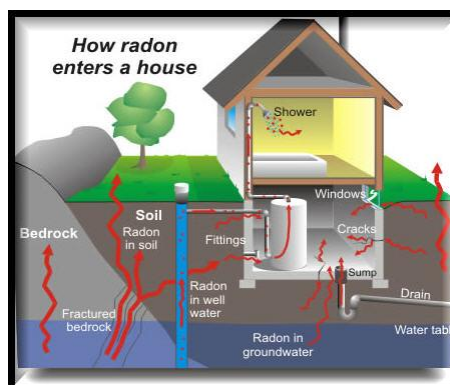
A principal fonte geradora do radônio presente no ambiente é o solo. Outra fonte importante de geração de radônio para o ambiente interior de um domicílio é a água subterrânea e, a ingestão dessas águas, com altos teores de rádio e/ou radônio, também é prejudicial à saúde.

A concentração de radônio ocorre naturalmente em algumas águas de nascentes. Estima-se que a água potável usada contribui com 1 a 7% do radônio presente no ambiente interno de uma residência.

Qualquer atividade que exponha água ao contato com o ar atmosférico tais como banho, lavagem de roupa, lavagem de louça, etc., libera radônio. Assim, estima-se que cada 10.000 pCi/L de radônio na água, gera 1 pCi/L para o ambiente.

Ao se dispersar pelo ar atmosférico dos ambientes abertos, ou ao ar livre, o radônio é considerado inofensivo, mas pode se tornar uma ameaça à saúde, quando aprisionado nos ambientes interiores de habitações e edifícios em geral, especialmente se a sua concentração alcançar níveis elevados.

Figura 1.6. O radônio tem acesso ao interior de imóveis, migrando do subsolo através de fendas e fissuras naturais e da construção.



Fonte: Premier Radon, 2012.

Na Figura 1.6, as setas sinuosas ascendentes representam o radônio migrando do solo para a superfície. Este gás penetra no interior dos imóveis através de fendas, fissuras e falhas naturais e da construção. As diferenças de pressão no interior da casa, provocadas pelo movimento ascendente do ar quente e outros efeitos naturais, sugam o radônio do solo para o interior dos ambientes. A termodinâmica elementar pode

explicar o mecanismo que se instala naturalmente no ambiente o qual traz como resultado o acesso do gás radônio: o ar quente presente no ambiente interior das residências sobe tendendo a se acumular nas partes mais altas. Quando isso acontece, é criado um vácuo nas áreas mais baixas da casa o qual estabelece uma diferença de pressão que suga os gases do subsolo, através das fendas e falhas no solo, nas emendas da construção, juntas, frestas entre canos e paredes, falhas nos blocos, no reboco, etc., obedecendo à tendência natural de reequilíbrio da pressão interna do ambiente.

A vedação pode ser uma parte necessária do processo de redução dos índices da concentração de radônio no interior dos domicílios, mas a EPA recomenda que, além da vedação, seja estabelecido um programa de monitoramento das concentrações de radônio no ar dos ambientes residenciais e ocupacionais, com vistas à manutenção dos níveis de concentração desse gás em valores aceitáveis.

Radônio e câncer de pulmão

A detecção do radônio tem como uma das bases funcionais a detecção da partícula alfa emitida pela sua desintegração.

O grau de instabilidade ou a taxa de decaimento de um núcleo radioativo é identificado pela sua meia-vida ($T_{1/2}$). Este é o período de tempo no qual a metade da radioatividade original, ou a metade do número original de radionuclídeos idênticos presentes na amostra, desaparece. Como já foi visto acima a meia-vida é dada por:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

onde λ é um número denominado de constante de decaimento e é específica para cada modo de decaimento e para cada radionuclídeo.

Estudos na área ambiental e de saúde constataram que a inalação de radônio no ar é a segunda maior causa de câncer de pulmão nos EUA, perdendo apenas para o tabagismo. Segundo os dados da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, a EPA, cerca de 21.000 pessoas morre por ano nos EUA devido a este tipo de câncer, induzido pela concentração de radônio em ambientes das residências (EPA, 2003). Esses estudos indicam também que os efeitos do radônio e do cigarro são sinérgicos, portanto para os fumantes, os riscos de desenvolvimento de câncer de pulmão são maiores (EPA, 2012). Nos Estados Unidos da América, os níveis de concentração de atividade de radônio no ar são medidos em picocuries por litro (pCi/L). Já na Europa

ocidental, esses mesmo níveis são medidos e expressos em unidades de Becquerel por metro cúbico (Bq/m^3) (EPA, 2003).

A medicina do trabalho há muito reconheceu o radônio como associado ao câncer de pulmão, especialmente entre os mineiros que trabalham no subsolo. Entretanto, até recentemente, pouca evidência científica estava disponível sobre o risco para a população em geral causado pelo acúmulo de radônio nos ambientes interiores das construções. Em uma revisão de literatura recente os autores identificaram que a exposição ao radônio e aos produtos resultantes do seu decaimento no interior dos prédios, é um dos principais contribuintes para a exposição da população em geral à radiação. Na Alemanha, a exposição à radiação média devido ao radônio presente nas salas de estar e quartos de dormir, é de 49 Bq/m^3 . Está bem documentado na literatura científica que o acúmulo de radônio em ambientes interiores aumenta significativamente o risco de câncer de pulmão, provavelmente em uma relação dose-resposta linear. Cada aumento de 100 Bq/m^3 na concentração de radônio, eleva o risco relativo de cancer do pulmão em 8% a 16%. Do ponto de vista da saúde pública é importante identificar edifícios com concentrações elevadas de radônio e iniciar as medidas de mitigação adequadas, para minimizar a exposição a esse radionuclídeo, particularmente em edifícios novos.

Radônio e RDPs no ambiente

Os objetivos dessa dissertação se referem a medições de concentrações ambientais de radônio em um contexto preliminar relativo ao conhecimento e aplicação de três métodos distintos. Entretanto, se torna oportuno citar que as concentrações ambientais de radônio medidas em outro contexto no qual o tratamento dos dados se dá sob a ótica da epidemiologia, as concentrações de radônio são medidas em conjunto com os seus RDPs, e são comumente expressas em uma unidade denominada “Working Level”, ou WL que significa “níveis de trabalho”. Uma WL é definido como qualquer combinação de RDPs do radônio em 1 litro de ar que resulte na libertação final de $1,3 \times 10^5 \text{ MeV}$ de energia alfa.

Se o radônio é adicionado constantemente ao interior de um volume fechado, a sua concentração e a concentração dos RDPs em curto prazo irão aumentar até que as taxas de desintegração do radônio e dos RDPs sejam igualadas, ou seja atinjam um equilíbrio (como será melhor observado adiante). Sob estas condições, cada pCi/L de

radônio vai dar origem a (quase precisamente) 0,01 WL . Na prática estas condições ideais não são verificadas, ou melhor não acontecem. Daí, os cálculos levam em consideração uma fração dessa taxa ideal, denominada **fração de equilíbrio** (grifo nosso) que é tipicamente de 40%; ou seja, haverá 0,004 WL de RDPs para cada pCi/L de radônio no ar.

Exposições cumulativas aos RDPs são medidos em uma unidade derivada da WL e denominada Working Level Month, ou WLM que significa “nível de trabalho-mês” e é uma unidade concebida originalmente para aplicações profissionais. A exposição é proporcional a concentração (WL) e ao tempo de exposição, com a exposição a um WL durante um período de 170 h sendo definido como 1 WLM. Para converter de exposições residenciais expressa em pCi/L, o comitê BEIR VI assumiu que a fração de tempo gasto dentro de casa é de 70%. Daqui resulta que uma concentração de radônio de 1 pCi/L em um ambiente interior produziria como resultado médio uma exposição de 0,144 WLM/ ano = (1 pCi/L) [(0,7) (0,004) WL / (pCi/L)] (51,6 WLM/WL-ano) (BEIR VI, 2006).

O radônio tem sido detectado em níveis elevados em casas de praticamente todos os estados dos Estados Unidos da América (EUA) e a EPA estima que 1 (hum) em cada 15 (quinze) lares em todo os EUA têm níveis elevados de concentrações de radônio em seus ambientes (EPA, 2011). O radônio no ar é ubíquo. Logo, é encontrado no ar dos ambientes exteriores e interiores de casas e edifícios de todos os tipos, ou seja, ninguém tem como escapar da exposição ao radônio em maior ou menor grau.

Limites estabelecidos para as concentrações ambientais de radônio

Nos Estados Unidos da América, onde a conscientização dos riscos a saúde associados ao radônio apresenta um alto nível de popularização, os níveis da concentração de atividade de radônio nos ambientes são alvo de constante aferição. O Centro de Controle e Prevenção de Doenças, ou CDC, recomenda que as casas nas quais os níveis de radônio medidos sejam iguais ou acima de 4 pCi/L, tenham esse valor corrigido para menor (EPA, 2013). Ou seja, a EPA recomenda que nas casas residenciais, o nível do radônio seja mantido abaixo dos 4 pCi/L (EPA, 2012). Por não haver nenhum nível seguro conhecido de exposição ao radônio, a EPA também recomenda que os norte-americanos considerem mitigar o nível de radônio nas suas casas para os níveis entre 2 pCi/L e 4 pCi/L (EPA 2012). A concentração média de

radônio no ar em ambientes interior das casas dos EUA é de cerca de 1 pCi/L (EPA, 2012). É este nível que a EPA toma como base para projetar sua estimativa de 20.000 mortes por câncer de pulmão relacionado ao radônio a cada ano.

Tabela 1.2. Energias características do decaimento alfa do radônio-222 e do polônio-218, com suas respectivas energias de ionização.

Radionuclídeo	Energ. Alfa	Energ. Ioniz.
^{222}Rn	5.489,52	98,91
^{218}Po	7.686,72	141,04

Fonte: ERNBO, H., 2006

É por esta razão que a EPA recomenda que os americanos considerem programar métodos de mitigação do radônio em suas casas quando o nível desse gás estiver entre 2 pCi/L e 4 pCi/L. A concentração média de radônio no ar dos ambientes exteriores está na faixa de 0,4 pCi/L ou (ou seja, 1/10 do valor 4 pCi/L) (EPA, 2012).

A detecção de partículas alfa

As partículas alfa são capazes de produzir ionizações expressivas na matéria. Se essas partículas atravessam, por exemplo, o seio de uma massa gasosa, os elétrons liberados em consequência do processo de ionização podem ser coletados por um eletrodo carregado positivamente e colimados na forma de pulsos de tensão ou de corrente elétrica. A Tabela 1.2 mostra valores medidos da energia de ionização associadas aos decaimentos alfa do radônio-222 e do polônio-218 (são relativamente altos se comparados com os valores das energias das ligações químicas são, em geral, < 5eV).

As “Câmaras de Ionização”, como as E-Perm usadas nesse projeto e os “contadores proporcionais” são instrumentos de detecção de partículas alfa que funcionam com base nesse princípio. As partículas alfa ao interagirem com a matéria geram excitação molecular que pode resultar em “fluorescência”. No caso dos

contadores proporcionais essa “fluorescência” é que conhecida no jargão técnico como “cintilação” e se constitui o princípio usado na detecção individual de partículas.

O Artigo 2 dessa Dissertação apresenta uma descrição detalhada do funcionamento de uma Câmara de Ionização de Eletreto do tipo E-Perm.

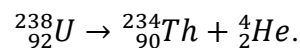
A energia de decaimento alfa pode ser calculada com base nos dados relativos a variações nas massas atômicas envolvidas, devido ao fato de que as reações de desintegração nuclear espontâneas são sempre acompanhadas de alterações energéticas. Uma redução da massa corresponde à energia de ligação liberada. Essa energia é denominada de **Q-Valor** (grifo nosso) dessa reação e vale

$$Q \text{ (Mev)} = - 931.5(\Delta M) \quad 1.17$$

O sinal negativo associado a constante na equação 1.17 representa o decréscimo associado ao Q-Valor, significando liberação de energia nos casos de decaimento espontâneo (CHOPPIN et al., 2011) . O Q-Valor é dado em MeV é o símbolo de milhão de eltron-volt enquanto ΔM corresponde a variação da massa. Para o decaimento alfa o Q-Valor é definido como:

$$Q \text{ (Mev)} = -931.5(M_{Z-2} + M_{He} - M_Z)$$

É possível, por exemplo, calcular o *Q-Valor* correspondente ao decaimento alfa do urânio-238 (^{238}U) ao se transmutar em tório-234 (^{234}Th). A reação é dada pela equação:



As massas dos elementos urânio-238 e tório-234, e do hélio-4 (partícula α) com os seguintes valores respectivamente:

^{238}U : 238.0508 u.m.a; ^{234}Th : 234.0436 u.m.a; e ${}^4\text{He}$: 4.0026 u.m.a. (WCAS, 2013)

A unidade de massa atômica (u.m.a) vale 1.66054×10^{-27} Kg. Por força de uma convenção internacional a u.m.a vale 1/12 da massa de um (1) núcleo do átomo de carbono-12 (WCAS, 2013). O *Q-Valor* procurado então é:

$$\begin{aligned} Q_{\alpha} &= -931.5(234.0436 + 4.0026 - 238.0508) = -931(-4,6 \times 10^{-3}) \\ &= 4.285 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Caso os produtos formados pelo decaimento alfa se apresentem nos seus respectivos estados fundamentais, em Inglês "ground state", o que é comum nesse tipo de decaimento, a energia de decaimento é partilhada entre a energia cinética do elemento resultante (filha/filho) e a partícula alfa.

$$Q_\alpha = E_{Z-2} + E_\alpha \quad 1.18$$

onde E_{Z-2} é a energia cinética da filha/filho e E_α é a energia da partícula alfa.

Pela conservação da energia ($E_1 + E_2 = E_3 + E_4$) e pela conservação do momento linear ($p_1 + p_2 = p_3 + p_4$), pode-se escrever:

$$E_{Z-2} = Q_\alpha \frac{M_\alpha}{M_Z} \quad 1.20$$

e

$$E_\alpha = Q_\alpha \frac{M_{Z-2}}{M_Z} \quad 1.21$$

A partir da equação 1.20 se pode calcular a energia cinética do tório-234 resultante do decaimento alfa do urânio-238:

$$E_{Z-2} = Q_\alpha \frac{M_\alpha}{M_Z} = 4.285 \times \frac{4.0026}{238.0508} = 0,072 \text{ MeV} = 72000 \text{ eV}$$

Observa-se que comparada com o valor de energia cinética da partícula alfa, a energia cinética do tório-234 é 72 keV. Esse valor de energia que é muito grande se comparado com os valores das energias das ligações químicas. Assim, o tório resultante do decaimento alfa tem energia mais que suficiente para quebrar ligações químicas pelas quais estaria ligado a outros átomos.

Conclusão

Os trabalhos de campo envolvendo medições dos níveis das concentrações de radônio-222 conduzem à necessidade do desenvolvimento de uma formação técnica profissional de nível superior que requer o domínio dos conhecimentos teóricos específicos da física nuclear e da química nuclear, relativas às desintegrações radioativas naturais. Torna-se fundamental ao profissional o conhecimento e a habilidade, no manuseio dos equipamentos de medição e suas peculiaridades, as quais só podem ser adquiridas mediante o estudo e o contato direto com profissionais experientes e pesquisadores que fazem do ato de medir/monitorar concentrações atmosféricas de radônio, concentrações de radônio em solos e concentrações de radônio em águas subterrâneas e superficiais um conjunto coeso e robusto de atividades que, seguramente, norteiam uma atuação profissional de nível superior. O conteúdo dessa

breve abordagem teórica se constitui um balizamento bastante para os primeiros contatos com a realidade das atividades de medição/monitoração de níveis de concentração de radônio.

REFERÊNCIAS:

AL-MOSA, T. M. A. **Indoor Radon Concentration In Kindergartebns, Play- And Elementary Schools In Zulfi City (Sudi Arabia)** (2007). Disponível em <www.faculty.ksu.edu.sa/23499/.../Zulfi%Thesis.pdf>. Acesso em 02/02/2012

ACS – AMERICAN CANCER SOCIETY, **Learn about Cancer: Find Information and resources for a specific cancer topic**, 2012. Disponível em: <www.cancer.org/CancerCauses/OtherCarcinogens/Pollution/radon>. Acesso em 10/10/12.

ANL – ARGONNE NATIONAL LABORATORY, **Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas; Human Health Fact Sheet: Uranium**, 2005.

Disponível em:

<www.ead.anl.gov/pub/doc/ANL_ContaminantFactSheets_All_070418.pdf. 2005>. Acesso em: 10/10/12

CCOHS – CANADIAN CENTER FOR OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY, **Radiation – Quantities and Units of Ionizing Radiation**, 2011. Disponível em: <www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/ionizing.html>. Acesso em: 10/08/12.

CASSARETI. L. J. , KLAASEEN, C. D., DOULL, J. , **Doull's toxicology: the basic science of poisons, Chapter 21: Toxic Effects of Radiation and Radioactive Materials**, by Naomi H. Harley, 2001, pg. 723 – 72; McGraw-Hill Medical Pub. Division, 1236 pg.

CHEMISTRY ABOUT; acesso: <http://chemistry.about.com/od/elementfacts/a/radon.htm>;

CPT – COMISSAO PASTORAL DA TERRA, Regional da Bahia, **Caetité se solidariza com vítimas de Fukushima**, 2011. Disponível em: <www.cptba.org.br> Acesso em: 09/09/12.

ENVIRONMENTAL FACT SHEET, *Radium, Radon and Uranium: Health Information Summary*, New Hampshire Environmental Services, 2011; (ARD-EHP-22).

Disponível em:

<www.des.nh.organization/commissioner/pip/factsheets/ard/documents/ard-ehp-22.pdf 2007. Acesso em: 1/10/12.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA, **Radiation Protection: Relative Abundance of Uranium Isotopes**, 2012.
<<http://www.epa.gov/rpdweb00/radionuclides/uranium.html>>. Acesso em: 02/10/2012.

GREENPEACE, **Ciclo do Perigo: IMPACTOS DA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR NO BRASIL: Denúncia: contaminação da água por urânio em Caetité, Bahia**, 2008. Publicação do Greenpeace/Relatório, p. 40, 2008.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Censo 2010**. Disponível em < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/amostra/>>. Acesso em: 05/10/2012.

LENTECH; **Water Treatment Solutions Uranium**. Disponível em:
<<http://www.lenntech.com/periodic/elements/u.htm> > 2012. Acesso em: 06/10/2012.

MATOS, E. C.; RUBINI, L. A, **Reservas Brasileiras de Urânio e sua Capacidade de Atendimento à Demanda Interna**, 2000; VII Congresso Geral de Energia Nuclear (Proc. Conf., Belo Horizontes, 1999) pg. 1; Ano 2000, Biblioteca do Instituto de Pesquisas Nucleares – IPEN

MATOS, E. C. de, SILVA, J. R. de A., RUBINI, L. A. , **Província de Lagoa Real – Garantia de Fornecimento de Concentrado de Urânio (DUA) Para As Necessidades Brasileiras**, 2003; Revista de Geologia; Vol 16, N°. 2, 111 – 120, 2003, pg. 111.

MCPHERSON, M. J., *Part Three; Chapter 13: Radiation and Radon Gas* (1993); Chapman & Hall (1993). Acesso: <www.mvsengineering.com/filelibrary/file_16.pdf>. (acessado em: 06/09/2012);

PRADO, G. R., *Estudo de Contaminação Ambiental por Urânio no Município de Caetité, Bahia, Utilizando Dentes Humanos como Bioindicadores*, 2007; Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Santa Cruz. Disponível em:
<http://www.uesc.br/cursos/pos_graduacao/mestrado/mdrma/teses/dissertacao_georgia.pdf>. (acessado em: 10/10/12);

PREMIER RADON TESTING AND MITIGATION, 2012. Acesso:
<<http://premieradon.net/what-is-radon/how-radon-enters-a-home/>>; (acessado em: 07/10/2012);

RADON, *Molecular Action and Genetic Effects*, Division of Environmental Health Sciences, 2007; University of Minnesota. Disponível em < <http://enhs.umn.edu/hazards/hazardssite/radon/radonmolaction.html>>. Acesso em: 08/10/12.

RADONSEAL, *Lung Cancer Risks from Radon: The annual death toll of radon in homes*, 2012. Disponível em: <www.radonseal.com/radon-health-risks.htm> 2012. Acesso em: 09/09/12.

SCHMIDT, K.; KWERT, T. et al. *Radon in indoor spaces: an underestimated risk factor for lung cancer in the environmental medicine*. **Dtsch Arztebl Int**, v. 107, n. 11, p. 181-186, 2010.

STOA 100 EN (05-2001), – Scientific and Technological Options Assessment Series, European Parliament Directorate-General for Research, Luxembourg, 2001. Disponível em: <http://www.labor-spiez.ch/de/the/as/pdf/stoa100en.pdf>> (acessado em: 4/08/12);

TAYLOR, D. M.; TAYLOR, S. K. *Environmental uranium and human health*. Rev Environ Health, v. 12, n. 3, p. 147-57, Jul-Sep 1997.

THE ARTS, SCIENCES AND MEDICINE; Acesso <<http://jedismedicine.blogspot.com.br/2011/04/radiation-and-humanity.html>>: (acessado em 07/10/2012);

TIRMARCHE, M. et al. *Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon*. Ann ICRP, v. 40, n. 1, p. 1-64, Feb 2010.

USA/EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Assessment of Risks from Radon in Homes*, Office of Radiation and Indoor Air, 2003. Acesso: <www.epa.gov/radon/healthrisk.html>.:(acessado em: 22/12/11);

VILASBOAS, Z. , *Mineração do urânio em Caetité/BA: os custos socioambientais da energia nuclear*, 2008; Acesso: <www.ecodebate.com.br/2008/11/05 > (acessado em: 09/06/ 2012);

ZÁVODSKÁ, L.; KOSRÍNOVA, E; LESNY, J.; BODIS, J. , *Environmental Chemistry of Uranium*; Faculty of Natural Sciences, Comenius University in Bratislava, Mylinska dolina 842 15 Bratislava 4, Slovakia; e-mail zavodskalucia-centrum@centrum.sk , HU ISSN 1418-7108, HEJ, Manuscript ENV 081221-A. Acesso: <<http://heja.szif.hu/ENV/ENV-081221-A/env081221a.pdf> >. (acessado em: 08 /06/ 2012);

ARTIGO 2

Uso de câmaras de ionização em experimento de medição de níveis de radônio-222 em residências e em uma escola pública situadas nas proximidades da Refinaria de Petróleo Landulfo Alves – RLAM

RESUMO

O radônio é um gás inerte radioativo, invisível, inodoro e insípido, ubiquamente presente em todos os pontos geográficos da superfície do planeta. Esse gás está presente na cadeia de decaimento de isótopos de urânio e tório. O isótopo radônio-222 tem meia-vida de 3,8 dias e por isso é o isótopo que está no centro das preocupações. Atividades de extração e processamento de petróleo e gás natural podem gerar resíduos contaminados por isótopos de urânio e tório, assim como de outros isótopos gerados pelos seus respectivos decaimentos. Neste artigo são analisados os resultados de uma pesquisa realizada em Caípe, uma localidade situada no município baiano de São Francisco do Conde, pertencente à Região Metropolitana de Salvador, localizada na vizinhança da Refinaria de Petróleo Landolfo Alves – RLAM. Concentrações atmosféricas de radônio-222 foram medidas mediante a instalação de Câmaras de Ionização de Eletreto (EIC do tipo E-Perm da Radelec, Inc em seis (6) habitações e uma (1) escola municipal). Alguns dos valores medidos se mostraram valores baixos. Porém o valor obtido pela medição realizada em um dos pontos se apresentou superior a 1 pCi/L enquanto a medição realizada em mais outro ponto se apresentou superior a 4 pCi/L, ou seja, superior ao limite máximo recomendado pela EPA.

Palavras-chave: NORM. Radônio. Contaminação. Petróleo. Câmara de Ionização. EIC.

Abstract

Radon is a radioactive inert gas, invisible, odorless and tasteless, ubiquitously present in all geographical points of the planet's surface. It is in the decay chain of uranium and thorium isotopes. The isotope radon-222 has a half-life of 3.8 days and thus, is the isotope that is of central concern. Extraction and processing of oil and natural gas can generate wastes contaminated with isotopes of uranium and thorium, as well as other isotopes generated by their decays. This paper analyzes the results of a survey conducted in Caípe, a town located in the municipality of São Francisco do Conde, Bahia and belongs to the Metropolitan Region of Salvador, located in the vicinity of the Refinery Landolfo Alves - RLAM. Atmospheric concentrations of radon-222 were measured by installing Electret Ionization Chambers (EIC type of E-PERM Radelec, Inc in six (6) houses and one (1) school hall. Some of the measured values are relatively low. However, the value obtained by the measurement performed at one of the points showed a value above 1 pCi/L while the measurement performed at another point showed a value above 4 pCi/L, or above the maximum value recommended by the EPA.

Keywords: Radon. NORM. Contamination. Petroil. Electret Ion Chamber. EIC.

Introdução

Elementos radioativos estão presentes em rochas, solos e corpos aquíferos em concentrações variadas. Como consequência, muitas das atividades de extração e beneficiamento de minérios assim como atividades de extração e processamento industrial de petróleo e gás natural tendem a gerar e acumular resíduos denominados “Materiais Radioativos de Ocorrência Natural”, ou NORM. Durante o processo de formação do petróleo a matéria orgânica é aprisionada em rochas cujas composições geológicas incluem isótopos de urânio e de tório (primariamente o urânio-238 e tório-232). Estes estão presentes em concentrações variadas nas formações subsuperficiais nas quais o petróleo e gás natural são formados. Por essa razão esses isótopos instáveis são transferidos aos hidrocarbonetos componentes do petróleo e do gás natural constituindo assim traços de material radioativo que podem permanecer no produto atravessando toda a cadeia industrial do seu processamento. Isótopos do urânio-238 e do tório-232 são pouco solúveis e por conta dessa propriedade permanecem relativamente imobilizados nas referidas formações. Ambos os isótopos decaem sucessiva e paulatinamente transmutando-se em outros elementos igualmente instáveis.

De um modo geral, os isótopos do rádio são ligeiramente mais solúveis que seus respectivos pais e podem ser mobilizados durante a fase de formação do petróleo, da rocha para os hidrocarbonetos componentes das referidas formações. Teles et al.(2010) observou que esses isótopos tendem a se acumular na água que acompanha a massa de hidrocarbonetos, ou água de formação de onde são trasladados para a superfície juntamente com o conteúdo industrialmente útil extraído durante a fase “up stream”, ou seja, fase de extração e processamento primário. A cadeia de atividades industriais do petróleo gera resíduos radioativos NORM, dentre os quais o rádio-226 é o que mais preocupante devido à larga faixa de variação que sua atividade pode apresentar, desde níveis indetectáveis até a faixa dos 40.000 pCi/g (SMITH, 1992). Como exemplos de NORM que são também fontes de preocupações, citamos o chumbo-210 (^{210}Pb) e o radônio-222 (^{222}Rn) especialmente em áreas nas quais ocorre o processamento de gás natural. Parte desses isótopos de rádio dissolvida na água de formação pode coprecipitar juntamente com bário (Ba), estrôncio (Sr) ou cálcio (Ca) e formar lamas de compostos silicatos ou carbonáceos, e até acumular em forma de escamas mais ou menos rígidas. São essas lamas e escamas que, de modo geral, apresentam as atividades radioativas interessantes.

Depósitos de lamas e escamas radioativas

Escamas formadas pela consolidação de lamas e resíduos são encontradas em equipamentos utilizados no tratamento e separação da água de produção, tais como: tubos, filtros, separadores, aquecedores, equipamentos de descarte de salmouras (ou águas hipersalinas), equipamento de re-injeção nos poços, tanques de armazenagem de água de produção, etc. As superfícies internas desses equipamentos costumam ser as áreas preferenciais de acúmulo dessas escamas. Equipamentos de produção e processamento podem estar contaminados em consequência desse acúmulo. O problema começa quando esses equipamentos são descomissionados temporária ou permanentemente. Por exemplo, em uma parada de manutenção de um desses equipamentos existe a possibilidade de elevação do risco de exposição ocupacional para os trabalhadores envolvidos devido à atividade dos radionuclídeos citados. No caso do descarte permanente do equipamento essa contaminação pode gerar riscos para a saúde das populações, caso o descarte seja procedido sem que os respectivos critérios reguladores de salvaguarda ambiental sejam adotados.

Vazamentos acidentais ocasionais de produtos para o meio ambiente e a consequente contaminação ocupam uma parte importante das preocupações ambientais e de saúde, especialmente quando a legislação não prevê a possibilidade desses riscos.

No que se refere às legislações ambientais em vigor, pode se tomar como exemplo o caso dos Estados Unidos da América, onde a maioria das regulamentações em nível federal não faz referência a contaminação por NORM associada às atividades de exploração e refino de petróleo. Apenas alguns Estados norte-americanos têm desenvolvido programas regulatórios que abordam essa contaminação (SMITH, 1992). Dados disponibilizados por pesquisas específicas sugerem que a presença dos NORM no ambiente e a consequente elevação dos riscos a saúde constituem uma conjuntura preocupante o suficiente para justificar criação e adoção de regulamentações efetivas. Os estudos de Smith (1992) sugerem que antes do desenvolvimento de regulamentações específicas, mais pesquisas precisam ser desenvolvidas no sentido de: i) conhecer e mapear a ocorrência e a distribuição dos NORM nos vários setores industriais; ii) quantificar os danos associados aos NORM em trabalhadores e no público em geral ; iii) desenvolver métodos efetivos de tratamento dos resíduos com o objetivo de reduzir os riscos associados ao descarte de resíduos contaminados com NORM assim como os reduzir também os respectivos custos (SMITH, 1992). No

Brasil a norma ABNT NBR 10004:2004 em vigor desde 30 de novembro de 2004, que classifica os resíduos quanto à periculosidade não faz referência explícita ao lodo (lama) associado ao tratamento e separação da água de produção como resíduo perigoso.

Os indivíduos de uma população podem estar expostos à radiação associada aos NORM característicos dos rejeitos gerados pelas atividades de produção e refino de petróleo. Essa exposição poderá ser mais preocupante quando expõem os trabalhadores que desenvolvem suas atividades em campos de exploração e produção de petróleo e em áreas de manutenção que incluem limpeza em equipamentos utilizados nessas atividades. As principais vias de exposição à radiação associada aos contaminantes NORM são a exposição à radiação gama, a exposição à radiação beta, a inalação de poeira contaminada com NORM, e a inalação do gás radônio. A exposição à radiação gama pode ocorrer caso a atividade radioativa das escamas e lamas acumuladas na parte interna dos equipamentos e estruturas tubulares alcancem valores capazes de vencer a “blindagem natural” associada aos invólucros intrínsecos (encapsulamentos e carcaças metálicas, corpos tubulares, etc.), e alcançar o ambiente exterior. A inalação de poeira contaminada e a exposição à radiação beta são fatores que acentuam o risco de exposição associado à disposição inadequada no meio ambiente de resíduos da limpeza desses equipamentos, assim como ao descarte dos mesmos (SMITH, 1992). Um exemplo específico de situação de exposição pode ocorrer durante a remoção de escamas e lamas de tubos e equipamentos mediante raspagem manual ou mecânica (com o uso de lixadeiras), atividades primárias de manutenção e limpeza, que, em geral, gera poeira em suspensão que percola o ar atmosférico e pode ser inalada pelos trabalhadores. Desta forma os riscos de exposição ocupacional para trabalhadores que atuam em áreas de disposição e descarte desses resíduos devem se encontrar entre os mais elevados. A ausência de números que quantificam os níveis dessa exposição é consequência direta da mentalidade vigente a qual não inclui os resíduos NORM associados às atividades petrolíferas nas listas dos resíduos perigosos de natureza radioativa. O presente trabalho pretende adicionar mais um pequeno esforço ao movimento na direção da reversão dessa mentalidade.

O descarte inadequado dos resíduos pode contaminar o solo, e a água e conseqüentemente elevar os níveis de radônio nos ambientes internos de habitações e imóveis situados nas áreas circunvizinhas (SMITH, 1992). Neste sentido, este trabalho busca identificar evidências da contaminação NORM, medindo concentrações

atmosféricas de radônio nos ambientes interiores e exteriores das habitações e outros prédios de uma localidade próxima a uma grande refinaria de petróleo denominada RLAM, situada no município de São Francisco do Conde, Bahia, Brasil. Pela sua vizinhança com a refinaria, Caípe pode estar servindo como área preferencial de decantação para o material particulado e gasoso emitido pela refinaria RLAM durante as suas atividades de processamento de petróleo e gás. Os resíduos radioativos descritos acima podem penetrar na população de Caípe e sua vizinhança, seja por inalação, seja por ingestão. Nesse aspecto é que, em outros países, um dos radionuclídeos associados a esse tipo de contaminação tem merecido uma atenção efetiva e especial por parte das autoridades sanitárias e ambientais.

Dentre o radionuclídeo mais frequentemente associado à contaminação NORM é isótopo radônio-222 (^{222}Rn), mais comumente referido apenas como radônio. Produto direto do decaimento do rádio-226, o radônio é um agente carcinogênico humano reconhecido como um problema de saúde pública por instituições tais como: Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América, em Inglês, “United States Environmental Protection Agency”, a EPA; o Centro de Controle de Doenças, em Inglês, “Center for Disease Control”; a Associação Americana do Pulmão, em Inglês, “American Lung Association”; a Associação Médica Americana, em Inglês, “American Medical Association”; e a Associação Americana de Saúde Pública, em Inglês, “American Public Health Association” (EPA, 2003). A EPA, no seu relatório anual de 2003, estima que cerca de 21.000 (EPA, 2003) mortes por câncer de pulmão nos EUA foram causadas pelo radônio (EPA, 2003). A inalação dos produtos do decaimento do radônio tem sido associada ao crescimento do risco de câncer de pulmão. Projeções de risco colocam o radônio como a segunda causa de mortes por câncer de pulmão depois do fumo (EPA, 2000). Cerca de 90% da dose anual de exposição do homem a radiação pode ser atribuída a fontes naturais e, desse total, a metade pode ser atribuída aos produtos do decaimento do radônio (EPA, 2011).

Materiais e Métodos

Sete Câmaras de Ionização de Eletretos (EIC) foram distribuídas em sete (7) pontos distintos da região urbana de Caípe, São Francisco do Conde, BA. Dentre os quais seis (6) habitações e uma (1) escola municipal.

População e área de estudo

Caípe é uma antiga vila de pescadores e atualmente é um distrito do município de São Francisco do Conde, Região Metropolitana de Salvador (também conhecida como Grande Salvador e pelo acrônimo RMS). Caípe está situada ao lado da Refinaria Landulfo Alves-Mataripe – RLAM, uma das unidades da empresa petrolífera brasileira denominada PETROBRAS. A RLAM é uma refinaria de grande porte que transformou a vida econômica da região, originalmente voltada para a pesca e a agricultura, com vistas a atender a infraestrutura necessária para manter o funcionamento da refinaria. A população de Caípe e de suas vizinhanças podem estar exposto à referida contaminação NORM, via inalação de radônio, ingestão de águas superficiais (rios e lagos), de águas subterrâneas contaminadas com NORM, e ingestão de alimentos contaminados com NORM.

A população de Caípe é estimada em cerca de 7.000 habitantes. Hoje, mais de 60 anos depois de inaugurada, a RLAM tem capacidade de processamento de mais de 323 mil barris/dia, sendo a segunda maior refinaria instalada e em funcionamento no Brasil. Diariamente, essa unidade de produção coloca no mercado dezenas de derivados do petróleo incluindo gasolina, diesel, GLP (gás de cozinha), nafta, óleos lubrificantes, parafinas, n-parafina, solventes e querosene de aviação (PETROBRÁS, 2010). A RLAM tem 3500 empregados terceirizados e 1250 empregados próprios e contribui com R\$ 750 milhões/ano em Imposto de Circulação de Mercadoria e Serviços (ICMS) (EBAH, 2012).

Procedimentos empregados

Concentrações atmosféricas de radônio foram medidas entre os dias 10 e 14 de janeiro de 2012. Os trabalhos foram supervisionados por um pesquisador sênior do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Foram escolhidos por conveniência sete (7) pontos distribuídos entre interiores de habitações e um Escola pública de Caípe, nos quais foi instalada uma (1) câmara de ionização da Radelec, Inc, em cada.

Dos critérios de conveniência

Os principais critérios de conveniência usados para a escolha de todos os locais nos quais foram instalados os detectores de radônio (câmaras EIC, SSNTD-CR-39 e o Alphaguard PQ-2000) para a consecução dos objetivos dessa dissertação estão apresentados no Artigo 3.

A Câmara Iônica de Eletreto, em Inglês, “Electret Ion Chamber” do tipo E-Perm, ou EIC, é um monitor passivo de radônio constituído por um eletreto altamente estável

montado dentro de uma pequena câmara fabricada em plástico condutor de eletricidade. O eletreto nada mais é que um disco de Teflon que serve como fonte de íons e como sensor. A desintegração do radônio no interior da câmara produz pares de íons. Os íons negativos são coletados pelo eletreto (carregado positivamente), e esse fenômeno causa a diminuição da carga elétrica superficial do eletreto.

A medição da carga perdida (ou seja, o empobrecimento da carga original do eletreto) durante o período da exposição dá uma medida da ionização integrada durante a referida exposição. A carga do eletreto é lida antes (V_i) e depois (V_f) da exposição mediante o uso de uma leitora especial de voltagem (que não entra em contato físico com o eletreto para realizar a leitura) desenvolvida pela Radelec, Inc e denominada Leitora de Tensão Elétrica SPER (SPER Electric Voltage Reader) (RADELEC, 2011). Usando a medida da diferença entre a carga elétrica inicial e a carga elétrica final em volts ($CV=V_f - V_i$), como dado de entrada em uma fórmula apropriada é possível determinar a atividade de radônio relativa ao período da medição (RADELEC, 2011).

Figura 2.1. A câmara E-Perm vista nas posições: “aberta” (centro) e “fechada”. A esquerda aparece a Leitora SPER (Electric Voltage Reader)



Fonte: Radelec, Inc, 2012

O método usado para a coleta de dados incluiu a exposição das E-Perm durante cerca de sessenta (60) horas. A instalação das E-Perm requer uma série de cuidados expressamente recomendados pelo fabricante.

O princípio de funcionamento da Câmara de Ionização de Eletreto EIC do tipo E-Perm ilustrado na Figura 2.1 pode ser resumido da seguinte forma: Para que a exposição do eletreto ao ar atmosférico do ambiente tenha início, “desenrosca-se” completamente a tampa do conjunto para permitir a penetração desse ar no interior da câmara. Assim o ar atmosférico penetra no interior da EIC, então o radônio contido no ar se desintegra, emitindo partículas alfa que provocam a ionização (criação de pares de íons) dessa massa de ar. Os íons negativos que incidem sobre a superfície do eletreto (carregado positivamente), a qual no instante inicial tem o valor V_i , provocam a redução da carga superficial do mesmo. Ao fim do período previsto de exposição, d , a câmara é então, fechada, mediante o “enroscamento” da tampa (contra a mola expansora), que é colocada de volta a sua posição inicial. A EIC é levada para o laboratório onde se procederá então uma nova leitura da tensão do eletreto, ou seja, a leitura da tensão V_f .

Ao se fechar a EIC, deve-se tomar o cuidado de assegurar que a mesma ficou completamente vedada, ou seja, certifique-se que não haverá exposição acidental do eletreto, em um momento posterior ao período determinado.

O período de exposição recomendado para o caso de uma exposição de curto prazo é entre dois (2) a sete (7) dias (OSHA, 2010). No presente estudo, o período de exposição dos eletretos (das câmaras E-Perm) foi de aproximadamente dois dias e meio (2,5 dias, ou seja, cerca de 60 horas).

Foram tomadas todas as precauções relativas à conservação do eletreto antes e depois da exposição, no sentido de evitar a corrupção dos dados.

Cálculos empregados

As concentrações de radônio (C) relativas a cada uma das medições foram calculadas mediante a seguinte fórmula:

$$C = \frac{CV}{(k)(d)} - B$$

onde;

C = concentração média de radônio em pCi/L;

k = $1,88 + (0,006 \times (CV/2))$, é o fator de correção fornecido pelo fabricante;

CV = diferença aritmética entre a carga inicial e a carga final dadas em Volts;

d = número de dias de exposição (que vamos considerar 2,5 para o “experimento piloto”);

B = fator de correção relativo à radiação gama natural (geralmente de 1 pCi/L^4 (OSHA, 2010).

Vantagens e limitações das EIC em atividades de medição de radônio

A utilização de Câmaras EIC E-Perm constitui um método eficiente e de baixo custo para a medição de níveis de concentração atmosférica de radônio. Dentre os detectores de radônio que utilizam a tecnologia dos eletretos, as câmaras EIC E-Perm são reconhecidamente aquelas que guardam a melhor relação custo-benefício quando comparados os custos relativos à sua manutenção e instalação com a sua capacidade de prover resultados confiáveis. Isso é o que EPA concluiu após testar o desempenho das EIC E-Perm. Os custos dos programas de medição de concentrações de radônio variam com o número de testes, os quais, por sua vez, são uma função da duração das coletas (modo de exposição) e da concentração de radônio no ambiente. Na maioria das situações, as EIC E-Perm apresentam menor custo efetivo por medida do que qualquer um dos outros métodos aplicáveis. São muitas as empresas de engenharia espalhadas pelos mais variados pontos do globo terrestre que especificam o uso das EIC E-Perm para as suas necessidades de medição de radônio. Por isso as EIC E-Perm estão entre as especificações vencedoras campeãs de concorrências em todo o mundo (BIOMATION, 2013). Em uma lista preparada pela Radelec, fabricante das câmaras EIC E-Perm (usadas em consonância com o respectivo objetivo específico dessa dissertação) as seguintes vantagens e desvantagens do uso das EIC são:

Vantagens:

Podem ser usadas tanto para longos períodos de exposição quanto para períodos curtos de exposição;

Os eletretos podem ser re-usados até que a voltagem superficial caia abaixo da tensão de operação que é 200 volts;

Desvantagens:

Sensíveis a radiação gama externa e por isso as medidas lidas devem ser corrigidas levando em conta essa influência (veja a fórmula na subseção “cálculos empregados”);

Sensíveis a mudanças de altitude e por isso as medidas lidas devem ser corrigidas levando em conta essa influência (veja a fórmula na seção “cálculos empregados”);

Os eletretos podem sofrer danos na sua superfície por conta de toques (manuseio incorreto), contaminação e/ou impactos;

As voltagens iniciais e finais devem ser medidas na mesma temperatura;

Não fornecem indicação de como se processam as mudanças nas concentrações do radônio durante o período da medição.

Por que usar as EIC nos trabalhos dessa dissertação?

O uso das câmaras EIC E-Perm nos trabalhos dessa dissertação se deveu a conjunção de eventos que tornou conveniente a sua escolha e uso. Entre esses eventos destacam-se:

A hipótese de que a Região Metropolitana de Salvador é zona de baixo radônio;

A hipótese de que a Região Metropolitana de Salvador é zona de baixa radiação gama de fundo;

As severas restrições financeiras e temporais que impedem a utilização de uma infraestrutura sofisticada;

A coincidência dos períodos de disponibilidade do Professor Zildete Rocha do CDTN, para vir até Salvador, trazendo as EIC e os equipamentos usados na coleta de dados e medidas apresentados nessa dissertação;

Resultados

Segue abaixo uma tabela contendo a identificação das EIC E-Perm e os respectivos dados coletados.

Tabela 2.1 Tabela composta com os valores de tensão inicial (V_i) e tensão final (V_f), medidas com o auxílio da Leitora de Tensão SPER, nos eletretos das EIC E-PERM® expostas em Caípe.

Ordem (#)	Conjunto Eletreto e Câmara	V_i (Volt)	V_f (Volt)	$V_f - V_i$ (Volt)	Altitude
1	SFZ 048 - S23	562	555	7	0
2	SFZ 042 - S11	484	478	9	0
3	SFZ 077 - S36	698	690	8	0
4	SFC 021 - S35	656	647	9	0
5	SFZ 168 - S19	463	455	8	0
6	SFZ 202 - S38	522	511	11	0
7	SFZ 228 - S05	670	640	30	0

Os resultados dos cálculos seguem na tabela 2.2 abaixo:

Tabela 2.2 Tabela composta com os resultados dos cálculos das concentrações de radônio determinadas com base nos dados da Tabela 2.1.

Ordem (#)	Conjunto Eletreto e Câmara	Vi (Volt)	Vf (Volt)	CV (Volt)	Concentrações de radônio (pCi / L)
1	SFZ 048 - S23	562	555	7	0,473
2	SFZ 042 - S11	484	478	9	0,893
3	SFZ 077 - S36	698	690	8	0,683
4	SFC 021 - S35	656	647	9	0,893
5	SFZ 168 - S19	463	455	8	0,683
6	SFZ 202 - S38	522	511	11	1,314
7	SFZ 228 - S05	670	640	30	5,312

Fonte: Resultados da pesquisa, 2012

Segundo a EPA os valores aceitáveis de concentrações de radônio em ambientes abertos devem ser mantidos no intervalo de

0.4 ~1.3 pCi/L

Quanto aos níveis de concentração de radônio nos ambientes internos das habitações, prédios, garagens, etc., devem (ser mantidos) estar no entorno de:

~ 4.0 pCi/L.

Entretanto, é recomendado que esses níveis fossem mantidos no entorno de ~ 2.0 pCi/L

Discussão

Os resultados encontrados no presente estudo podem ser comparados com os resultados obtidos no estudo realizado por Darko et al. (2011) de uma pesquisa feita no

entorno da Refinaria Tema, localizada a 25 km a leste de Acra, capital da República de Gana, onde, apesar da referida refinaria se encontrar em funcionamento por cerca de quarenta anos, jamais se havia feito um levantamento dos riscos à saúde da população, representados pela exposição aos radionuclídeos rádio (^{226}Ra), radônio (^{222}Rn) e potássio (^{40}K). As concentrações de atividade de radionuclídeos foram determinadas através de uma análise não-destrutiva, utilizando um sistema informatizado de espectrometria de raios-gama (espectrometria gama), com a utilização de um espectrometro gama provido de um detector de germânio de alta pureza e eficiência relativa de 25% com resolução de 1,8 keV a (ao nível de) 1,33 MeV de ^{60}Co (DARKO et al., 2011). Esse método de medição requer a utilização de uma tecnologia mais afeita a medições mais sofisticadas e seguramente mais caras que aquela associada à utilização das EIC, a qual compõe uma tecnologia bastante eficaz para os propósitos dessa pesquisa, focada na medição da radiação associada a desintegração do radônio. O estudo feito por Darko et al. (2011) não encontrou níveis preocupantes de concentração de radionuclídeos, no entanto recomenda a medição periódica desses níveis (DARKO et al. 2011).

Singh et al. (2003) realizaram um estudo em prédios nas áreas de uma refinaria de petróleo localizada na cidade de Mathura, no estado de Uttar Pradesh, Índia. Nesse estudo, concentrações de radônio e de seus descendentes foram medidas em 71 desses prédios, em 39 habitações situadas na cidade de Mathura e em 36 habitações situadas na cidade de Agra. Os níveis de concentração de radônio foram medidos através da utilização de Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido, os SSNTD do tipo LR-115. Os valores medidos nos prédios da refinaria foram comparados com valores medidos em habitações nas cidades de Mathura e Agra. As médias geométricas (MG) de concentrações de radônio nos prédios da refinaria, das habitações da cidade de Mathura, e habitações da cidade de Agra foram 97, 91 e 75 Bq. m^{-3} , respectivamente (SINGH et al., 2003). Os métodos de medição com base nos SSNTD são de baixo custo, porém, necessitam de uma infraestrutura de laboratório a qual não se faz necessário quando se usam as EIC.

Até a presente data não foram encontrados na literatura estudos similares aos mencionados acima, que tenham sido realizados no Brasil para que se pudesse proceder a comparações com dados nacionais.

Conclusão

Alguns dos valores obtidos a partir das medições se mostraram baixos quando comparados aos padrões recomendados pela EPA. O valor obtido pela medição realizada em um dos pontos se apresentou superior a 1 pCi/L enquanto a medição realizada em outro ponto se apresentou superior a 4 pCi/L, ou seja, superior ao limite máximo recomendado pela EPA.

É oportuno enfatizar, contudo, que na condução desse estudo algumas recomendações expressas do fabricante não foram efetivamente guardadas. Por exemplo, a recomendação de manter fechado o ambiente interno no qual se pretende medir a concentração atmosférica de radônio durante o tempo de exposição (OSHA, 2010) não foi guardada. A movimentação de moradores e usuários dos imóveis pode ter influenciado as concentrações medidas. Nesse aspecto em particular, o ponto onde as medições apresentaram valores mais altos, foram os menos afetados pelas movimentações de pessoas. Os resultados encontrados sugerem a necessidade de realização de mais pesquisas relacionadas a esta forma de contaminação utilizando as Câmaras de Ionização de Eletreto (*Electret Ion Chamber*) E-. É necessário também ampliar o alcance do método de pesquisa com vistas à melhor entender a correlação entre níveis de concentração atmosférica de radônio e provável contaminação ambiental por NORM associada a eventos envolvendo resíduos gerados pelas atividades de refino e processamento de petróleo e gás.

Com base apenas nos resultados apenas desta pesquisa não é possível afirmar que o radônio possa ser considerado um elemento de importância à saúde pública nos domicílios de Caípe. Entretanto, recomenda-se a realização deste tipo de estudo em ambientes que envolvam atividades de extração e beneficiamento de minérios assim como atividades de extração e processamento industrial de petróleo e gás natural, pois estes tendem a gerar e acumular resíduos “Materiais Radioativos de Ocorrência Natural”, NORM gerar excessos de concentração de radônio nos ambientes. Recomenda-se ainda medições específicas da radiação gama de fundo para melhorar a qualidade da medição das concentrações de radônio e seus resultados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio e colaboração da coordenação do Programa de Pós-Graduação em Saúde Ambiente e Trabalho (PP-GSAT) do Departamento de Medicina Social e Preventiva da Faculdade de Medicina da Bahia – FAMEB, Universidade Federal da Bahia – UFBA, aos Professores Dr. Paulo Geovane Pena, ao Dr. Fernando Martins Carvalho. Agradecemos aos Professores Dr. Alexandre Barreto Costa, Dra. Maria do Rozário Zucchi, e Dr. Antonio Expedito Gomes de Azevedo, ao tempo em que agradecemos também aos técnicos e estudantes do Laboratório de Física Nuclear Aplicada – LFNA, do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia – UFBA. Agradecemos a população de Caípe, e agradecemos igualmente ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN pelo apoio infraestrutural representado pela participação instrumental e definitiva do Professor Zildete Rocha, sem o qual não seria possível realizar o experimento.

REFERÊNCIAS

1. SMITH K. P. ; **An overview of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the Petroleum Industry**; Environmental Assessment and Information Science Division ; Argonne National Laboratory ; ANL/EAIS-7 ; December, 1992: Disponível em: www.evs.anl.gov/pub/doc/ANL_EAIS_7.pdf (acessado em: 12/03/2012);
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT; **Norma Brasileira**; ABNT NBR 10004, segunda edição Resíduos Sólidos – Classificação ; Disponível em: [www.aslaa.com.br/legislacoes/NBR n 10004-2004.pdf](http://www.aslaa.com.br/legislacoes/NBR_n_10004-2004.pdf) (acessado em 12/06/2012);
3. PETROBRÁS; **Refinaria Landulpho Alves completa 60 anos**; Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/noticias/refinaria-landulpho-alves-completa-60-anos/> (acessado: 12/06/2012);
4. EBAH; **O caso da Indústria Petroquímica**; Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAUhUAI/caso-industria-petroquimica> (acessado em 24/03/2013)
5. UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION – UNSCEAR ; **Exposure to radon and thoron and their decay products** ; Disponível em: www.unscear.org/doc/reports/1982/1982-D_unscear.pdf (acessado em: 12/06/2012);
6. DARKO E. O. et al ; **Radiation doses and hazard from crude oil processing in Ghana**: Oxford Journals: Radiat. Prot. Dosimetry (2011) doi: 10.1093/rpd/ncr088 First published online: April 11, 2011; Disponível em: <http://rpd.oxfordjournals.org/content/early/2011/04/11/rpd.ncr088.full> (acessado: 12/06/2013)
7. SINGH A. K. ; KHAN A. J. ; PRASAD R. ; **Study of radon concentrations in oil refinery premises and city dwellings**: Institute of Physics Publishing: Journal of Radiological Protection: J. Radiol. Prot. **21** (2001) 163–170: Disponível em: www.iop.org/Journals/jr
8. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA; **Assessment of Radon in Homes** ; Office of Radiation and Indoor Air United States Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460 ; June 2003; Disponível em: www.epa.gov/radiation/doc/assessment/402-r-03-003.pdf (acessado: 12/06/2013);
9. RADELEC; **How E-PERMs® Work**; Rad Elec Inc. ;Disponível em: www.radelec.com (acessado em: 12/06/2012);
10. OCCUPATIONAL SAFETY & ADMINISTRATION – OSHA; (2010); Radon in Workplace Atmospheres; United States Department of Labor;Disponível em: www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id208/id208.html (acessado em: 12/06/2012);

11. COSTA, A. B.; **Radioatividade Alfa e Radiocarbono em Águas Subterrâneas no Estado da Bahia.**; Dissertação de Mestrado”. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador (2001);

12. BIOMATION; **Electret Ion Chamber – Decision Maker Fact Sheet**; Disponível em: http://www.biomation.com/radon/fact_sheet.htm (acessado em 24/03/2013);

* Autor Correspondente: Adelson S. de Brito, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Saúde Ambiente e Trabalho – PPGSAT
Faculdade de Medicina – Departamento de Medicina Preventiva Universidade Federal da Bahia
Praça XV de Novembro - s/n, Largo do Terreiro de Jesus, Centro Histórico
40025-010 Salvador, BA
adelsonsb@gmail.com

Artigo 3

Medição de concentrações atmosféricas de radônio no ar de ambientes interiores de Salvador e Região Metropolitana (RMS)

Resumo

No Brasil, diferentemente de vários países do mundo, o monitoramento dos níveis de concentrações ambientais de radônio não é realizado. Este estudo tem como objetivo medir as concentrações de radônio no ar em ambientes interiores de 33 imóveis incluindo casas e prédios públicos localizados em Salvador e municípios da Região Metropolitana de Salvador (RMS). Um conjunto de 33 Câmaras de Ionização de Eletreto (ou Electret Ion Chamber, EIC) foram distribuídas entre 33 ambientes convenientemente selecionados. Assim, uma delas foi colocada em um ambiente na cidade de Camaçari, duas delas foram colocadas na cidade de Lauro de Freitas, enquanto as 30 restantes foram distribuídas em vários ambientes selecionados por alguns dos bairros na cidade de Salvador. As EIC utilizadas na presente pesquisa são Câmaras de Ionização de Eletreto (EIC) do tipo E-Perm © de exposição de curto prazo, fabricadas pela Radelec, Inc, e foram expostas por uma média de 48 horas. A média aritmética (MA) das concentrações medidas foi de $2,06 \pm 2$ pCi/L, enquanto os resultados das medições variaram de 0,30 a 2,00 pCi/L. O presente estudo testou métodos de medição de radônio em ambientes interno visando a inclusão dessas medições em programas de vigilância ambiental e de saúde.

Palavras-chave: Radioatividade. Radônio. Exposição ao radônio. Concentrações. Vigilância. Trabalho.

Abstract

In Brazil, unlike many other countries, monitoring the levels of environmental concentrations of radon is not performed. This study aims to measure the concentrations of radon in indoor air of 33 dwellings including houses and public buildings located in Salvador and the Metropolitan Region of Salvador (RMS). A set of 33 Electret Ionization Chambers or EIC were distributed among 33 selected environments. Thus, one was placed in an environment in the city of Camaçari, two of them were placed in the city of Lauro de Freitas, while the remaining 30 were distributed in various environments among different the neighborhoods in the city of Salvador. The EIC used in this research are Electret Ionization Chambers (EIC) of the E-Perm © type of short-term exposure, manufactured by Radelec, Inc, and were exposed by an average of 48 hours. The arithmetic mean (AM) of the measured concentration was 2.06 ± 2 pCi/L, while the results of measurements ranged from 0.30 to 2.00 pCi/L. The present study tested methods for measurement of radon in indoor environments as part of an effort to include these measurements in monitoring programs and environmental health.

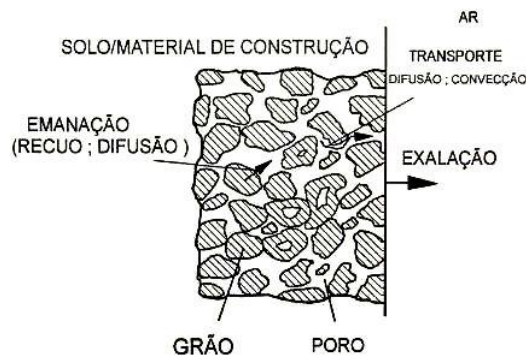
Keywords: Radioactivity. Radon. Exposure to radon. Concentrations. Surveillance. Sanitary.

Introdução

O radônio é um gás inerte radioativo, invisível, inodoro e insípido, ubiquamente presente em todos os pontos geográficos da superfície do planeta. Esse gás está presente na cadeia de decaimento de isótopos de urânio e tório. O isótopo radônio-222 tem meia-vida de 3,8 dias e por isso é o isótopo que está no centro das preocupações ambientais e de saúde pública. Apesar da importância do radônio no âmbito mundial, é importante observar que a medição de concentrações de radônio por si só, não se constitui em elemento suficiente para traduzir o nível de risco para a população exposta. O cálculo do risco para a saúde associado a elevadas concentrações de radônio no ambiente envolve, além dos níveis de concentrações de radônio, o nível de convivência entre o radônio e seus RDPs. A medição das concentrações de radônio, entretanto, é um item fundamental para o referido cálculo e para desencadear ações de avaliação ambiental e verificação dos efeitos das concentrações ambientais de radônio sobre a saúde humana do ponto de vista da Epidemiologia. Nesse Artigo são apresentados os resultados das primeiras medições do radônio ambiental realizados em alguns pontos da Região Metropolitana de Salvador, mensurados com o auxílio de câmaras de ionização EIC do tipo E-Perm, fabricadas pela Radelec, Inc.

Alguns átomos de radônio são liberados da matriz sólida por recuo direto quando o rádio decai. Apenas os átomos gerados na superfície ou nas microfissuras das fases minerais têm a capacidade de se libertar; os produzidos no interior dos minerais ficam aprisionados na malha cristalina (Veja a Figura 3.1).

Figura 3.1. Exalação do radônio a partir de solos e materiais de construção



Fonte: Santos, 2010

Assim, para que o átomo de radônio escape do grão mineral para o espaço intersticial (poros), o decaimento deve ocorrer a certa distância de recuo da superfície do grão e assumir essa direção. Segundo a UNSCEAR (2000) as distâncias de recuo para o radônio são: 20-70 nm em minerais comuns, 100 nm em água e 63µm no ar.

Em todo o mundo, uma média de cerca de dois átomos de radônio são emitidos por cada centímetro quadrado de solo da Terra por segundo por dia (ANL, 2005). É por essa razão que praticamente todas as casas do planeta sempre tiveram seus ambientes internos e externos permeados por radônio, e sempre haverá ocorrência de radônio em casas e prédios. Pelas suas características nucleares o radônio se constitui uma forma de radiação ionizante sendo classificado, pela Organização Mundial de Saúde, como um agente cancerígeno (EPA, 2012).

O processo pelo qual o radônio escapa do material sólido é chamado de emanação. Para a maioria dos solos, somente de 10 a 50% do radônio produzido escapa do grão mineral e entra nos poros. O coeficiente de emanação, fator de emanação ou poder de emanação é a fração de átomos de radônio liberada no espaço intersticial por um grão contendo rádio. Santos (2010) assinala que valores típicos do coeficiente de emanação para rochas e solos variam de 0,05 a 0,7. A emanação do radônio é influenciada, pela granulometria dos materiais, pela distribuição mineralógica do rádio e pelo teor de água nos interstícios dos grãos (umidade). Geralmente, o fator de emanação do radônio é inversamente proporcional ao tamanho do grão. Quanto à distribuição mineralógica, o rádio se encontra disperso irregularmente na superfície do grão, ao invés de estar uniformemente distribuído, aumentando assim o poder de emanação.

Alguns Aspectos Físicos da Região Metropolitana de Salvador

A Região Metropolitana de Salvador (RMS) encontra-se inteiramente inserida no Orógeno Salvador-Esplanada e foi subdividida por Barbosa *et al.* (2005) em três domínios geológicos principais:

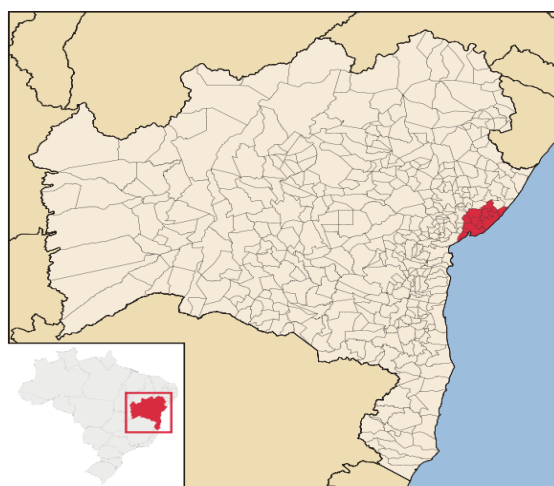
(i) Bacia Sedimentar do Recôncavo, constituída por rochas sedimentares mesozoicas, faz parte de um sistema maior denominado Recôncavo-Tucano-Jatobá e limitada a leste pela Falha de Salvador;

ii) Margem Costeira Atlântica, formada por depósitos terciários e quaternários, os quais são constituídos por acumulações pouco espessas de sedimentos não consolidados

de natureza argilosa, arenosa e areno-argilosa, que foram modelados por flutuações climáticas e do nível relativo do mar;

(iii) Alto de Salvador, que representa um *Horst* de rochas cristalinas arqueanas e/ou paleoproterozóicas, metamórficas de alto e médio grau, que separa a Bacia Sedimentar do Recôncavo do Oceano Atlântico (SOUZA, 2008). Em resumo, do ponto de vista estrutural geológico, as rochas que embasam a cidade de Salvador ainda carecem de estudos por que os seus afloramentos rochosos ocorrem de forma descontínua e/ou estão cobertos por vegetação (SOUZA, 2008).

Figura 3.2. Mapa mostrando a localização da Região Metropolitana de Salvador, no Estado da Bahia, Brasil.



Fonte: Wikipédia, 2013

Figura 3.3. Mapa da Região Metropolitana de Salvador (RMS) mostrando as cidades de Salvador, Lauro de Freitas, e Camaçari, cidades nas quais as medições foram realizadas.



Centrada na cidade de Salvador, cujas coordenadas de localização geográfica são 12° 58' 16''S e 38° 30' 39' W (GEO-HACK, 2013), a Região Metropolitana de Salvador, RMS, foi instituída pela Lei Complementar Federal número 14, de 8 de junho de 1973. Com 3.642.682 habitantes (IBGE, 2012), é a terceira região metropolitana mais populosa do Nordeste brasileiro, depois da Região Metropolitana do Recife e de Fortaleza e a sétima do Brasil, além de ser a 109ª mais populosa do mundo..

Materiais e Métodos

Nesta pesquisa, trinta e cinco Câmaras de Ionização de Eletreto (EIC) foram instaladas em 35 pontos distintos escolhidos da Região Metropolitana de Salvador, BA. Entretanto duas (2) EIC foram extraviadas e suas informações não perdidas.

A pesquisa foi realizada entre os dias 5 e 12 de Dezembro de 2012.

As medições foram realizadas com base em critérios de conveniência. Entretanto, na escolha dos locais nos quais as EIC foram instaladas tomou-se por base os seguintes aspectos:

- i) Consultas prévias com profissionais experientes do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, sobre os locais potenciais de concentrações significativas de radônio na Região Metropolitana de Salvador (RMS);
- ii) Ajuste da disponibilidade do equipamento pertencente ao CDTN (que fica em Belo Horizonte) em tempo simultâneo com a disponibilidade do Professor pesquisador sênior do CDTN, quanto a se deslocar de Belo Horizonte para Salvador. Este permaneceu por períodos de uma semana, cada uma das três vezes em que veio a Salvador, trazendo toda a infraestrutura técnica necessária à instalação, armazenagem, leitura, manutenção, etc.: das EIC usadas na coleta de dados;
- iii) Coincidência entre as regiões escolhidas e a moradia de professores, alunos, e técnicos do Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da UFBA, que se dispuseram a assumir a responsabilidade quanto a instalar as EIC, e realizar os procedimentos necessários para o efeito de uma coleta de confiável de dados;

As EIC foram instaladas nos ambientes (cômodos) interiores das residências e prédios, guardando a distância de aproximadamente 1m acima do nível do solo e de 1 a 1,5 m de distância das paredes. Os cômodos onde foram instaladas as câmaras foram

escolhidos segundo informações fornecidas pelos responsáveis dos respectivos imóveis, sempre orientados no sentido da melhor garantia possível quanto à inacessibilidade (não abertura da porta de acesso ao cômodo) de pessoas aos interiores dos referidos ambientes durante o período de exposição da EIC ao bombardeio dos íons produzidos pelas partículas alfa resultantes da desintegração do radônio atmosférico. Tais procedimentos tinham como objetivo reduzir a probabilidade de ocorrências alterações na concentração real de radônio no interior do ambiente, o que produziria como efeito uma leitura pela EIC que não corresponde à realidade.

Passado o intervalo de tempo pré-determinado para a exposição (no presente trabalho, dois dias, ou seja, 48 horas), a tensão final (V_f) do eletreto foi medida mediante a Leitora SPER (Artigo 2, Figura 2.1, pg. 58).

Usando fatores de calibração apropriados e o tempo de exposição T , a concentração de radônio pôde então ser calculada pela fórmula:

$$RnC = \frac{\Delta V}{(KT)} - B_{Gama} \quad (1)$$

onde: RnC é a concentração de radônio em pCi/L; $\Delta V = V_i - V_f$ a diferença entre as tensões final e inicial lidas no eletreto; T é o tempo de exposição dado em número de dias; B_{Gama} é um fator de correção relativo à radiação gama natural de fundo; K é um fator de correção dado como:

$$K = 1,88 + (0,006 \times \Delta V) \quad (2)$$

(OSHA, 2010)

As medições de radônio efetuadas com o auxílio das EIC devem ser corrigidas apropriadamente para compensar a influência da radiação gama de fundo (BG) nos seus resultados (KOTRAPPA et al., 1988).

A tensão média inicial dos eletretos das EICs foi de $691,39 \pm 50,06$.

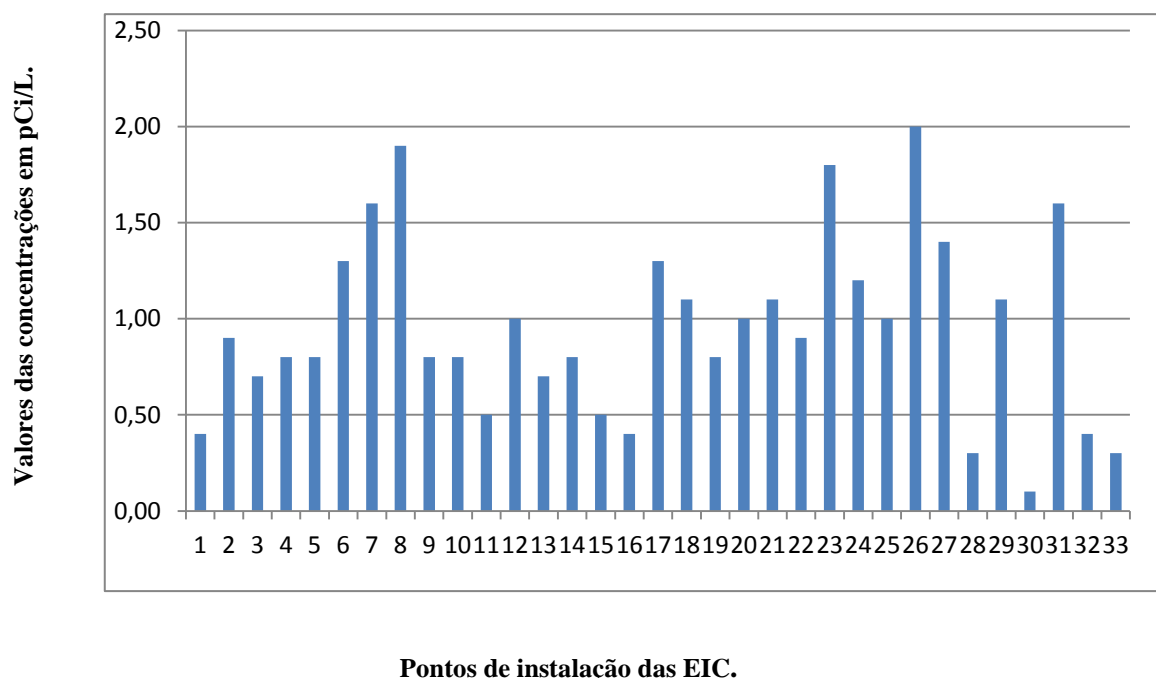
Resultados

Em 33 EICs, as informações necessárias para o cálculo das concentrações de radônio foram recuperadas.

A média aritmética (MA), a faixa de variação das concentrações de radônio e o número de ambientes que apresentaram concentrações de radônio acima de $2,06 \pm 2,20$ pCi/L. O Gráfico 3.1 mostra o conjunto dos valores medidos.

Os níveis de atividade de concentração 2,00 pCi/L e 4,00 pCi/L são dois marcos importantes dentro das recomendações feitas pela Agencia de Proteção Ambiental, em Inglês Environmental Protection Agency, EPA. Para concentrações na faixa entre 1,30 a 2,00 pCi/L a EPA considera como níveis médios (aceitáveis) de radônio em ambientes interiores (EPA, 2013). A EPA considera difícil a tarefa de mitigar níveis de concentração de radônio para níveis inferiores a 2,00 pCi/L (ou seja, 74 Bq/m^3) (EPA, 2013).

Gráfico 3.1. Resultados das medidas das atividades das concentrações de radônio atmosférico em ambientes interiores de Salvador e Região Metropolitana (RMS)



Fonte: Resultados da pesquisa, 2012

Conforme se pode observar no gráfico acima, os resultados apontam

Discussão

De acordo com os resultados do presente estudo a média de concentração de radônio apresentou valores inferiores a 74 Bq.m^{-3} . Ou seja, o valor médio encontra-se abaixo do valor crítico estabelecido pela EPA que é de 148 Bq.m^{-3} . Os resultados deste estudo encontram-se abaixo dos menores valores encontrados em Belo Horizonte BH (Santos, 2010).

Santos (2010), ao medir concentrações de radônio em ambientes de algumas localidades da Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG, encontrou os seguintes valores médios: Baldim (123 Bq.m^{-3}), Belo Horizonte (122 Bq.m^{-3}), Betim (101 Bq.m^{-3}), Caeté (92 Bq.m^{-3}), Florestal (101 Bq.m^{-3}), Igarapé (522 Bq.m^{-3}), Itaguara (265 Bq.m^{-3}), Itatiaiuçu (160 Bq.m^{-3}), Lagoa Santa (218 Bq.m^{-3}), Mateus Leme (111 Bq.m^{-3}), Matozinhos (166 Bq.m^{-3}), Rio Manso (117 Bq.m^{-3}) e Santa Luzia (92 Bq.m^{-3}), etc.:

Conclusão

Os resultados apresentados por esta pesquisa parecem indicar que a Região Metropolitana de Salvador é caracterizada por baixas concentrações de radônio. Entretanto, como se trata de um primeiro estudo na RMS, seria importante a continuidade da pesquisa em um maior número de pontos e em estação do ano diferente da estação característica dessa época atual. Como a técnica utilizada é de fácil aplicação, baixo custo e demonstra validade científica, os autores recomendam a continuidade deste estudo em mais amostras da RMS e novas medidas em outras áreas especialmente as uraníferas do Estado da Bahia, bem como a incorporação desta técnica pelos órgãos ambientais do Estado da Bahia.

Financiamento

Esse trabalho foi financiado pelo Programa de Pós-Graduação em Saúde, Ambiente e Trabalho – PPGSAT do Departamento de Medicina Social e Preventiva da Faculdade de Medicina da Bahia – FAMEB/UFBA

Agradecimentos

Os Autores agradecem ao Professor Zildete Rocha, pesquisador sênior do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, e ao próprio CDTN, pelo suporte representado pelos aparelhos e equipamentos usados durante o desenvolvimento dos trabalhos de campo desenvolvidos. Agradecem também aos Professores Fernando Carvalho e Paulo Giovane Pena (FAMEB/UFBA) e aos Professores Alexandre Costa e Antonio Expedito Azevedo (LFNA/UFBA).

REFERENCIAS

ALLEN, K; KOTRAPPA, P; **E-perm passive integrating electret ionization chambers for measuring radon in air, thoron in air, radon in water and radon flux from surfaces/building materials**; Radon in the Living Environment, 19-23 April 1999, Athens, Greece; Disponível em:

http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/Radon1999/007.pdf (acessado em: 25/09/12);

CHAMLEY, H.; (2003); **Radioactivity**; Geosciences, Environment and Man; pg. 280 – 281; Gulf Professional Publishing; 527 pp. ; ISBN 0444514252, 9780444514257;

COSTA, A. B., **Radioatividade Alfa e Radiocarbono em Águas Subterrâneas no Estado da Bahia**. Dissertação de Mestrado”. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador (2001).

DARKO, E. O. et al ; **Radiation doses and hazard from crude oil processing in Ghana**: Oxford Journals: Radiat. Prot. Dosimetry (2011) doi: 10.1093/rpd/ncr088 First published online: April 11, 2011

<http://rpd.oxfordjournals.org/content/early/2011/04/11/rpd.ncr088.full>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; **EPA Assessment of radon in homes**; Office of Radiation and Indoor Air United States Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460 ; June 2003

Disponível em: www.epa.gov/radiation/doc/assessment/402-r-03-003.pdf (acessado em: 22/10/2013)

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA (2013); **Health Risks: Radon**; Disponível em: <http://www.epa.gov/radon/healthrisks.html> (acessado em 24/01/2013).

GEO-HACK (2013); **Localização Salvador, Bahia, Brasil**;

Disponível em:

http://toolserver.org/~geohack/geohack.php?language=pt&pagenome=Salvador_%28Bahia%29¶ms=12_58_16_S_38_30_39_W_type:city_region:BR_scale:75000

(acessado em: 23/01/2013);

NORMA BRASILEIRA; ABNT NBR 10004, **Resíduos Sólidos-Classificação**; 2ª

Edição;Disponível em: www.aslaa.com.br/legislacoes/NBR_n_10004-2004.pdf (acessado 12/10/2013);

OCCUPATIONAL SAFETY & ADMINISTRATION – OSHA; **Radon in Workplace Atmospheres**; United States Department of Labor; Disponível em:

www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id208/id208.html

(acessado em: 11/04/2012);

PETROBRÁS: **Refinaria Landulpho Alves completa 60 anos**; Notícias; Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/noticias/refinaria-landulpho-alves-completa-60-anos/> (acessado em: 11/04/2012);

RADE ELEC; **How E-PERMs® Work**; Rad Elec Inc. ; Disponível em: www.radelec.com (acessado em: 11/04/2012);

SAMET, J. M. (2011); **Radiation and cancer risk: a continuing challenge for epidemiologists**; *Environmental health : a global access science source* **10 Suppl 1**: S4.

SANTOS, T. de O. , (2010); **Distribuição da Concentração de Radônio em Residências e Outras Construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH**; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – UFMG/BH, Departamento de Engenharia Nuclear

SINGH, A. K. ; KHAN, A. J. ; PRASAD, R. ; **Study of radon concentrations in oil refinery premises and city dwellings**; Institute of Physics Publishing: Journal of Radiological Protection: J. Radiol. Prot. **21** (2001) 163–170: www.iop.org/Journals/jr

SMITH, K. P. ; **An overview of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the Petroleum Industry**; Environmental Assessment and Information Science Division ; Argonne National Laboratory ; ANL/EAIS-7 ; December, 1992 www.evs.anl.gov/pub/doc/ANL_EAIS_7.pdf

SOUZA, J. S. de; (2008); **Mapeamento Geológico da Área do Farol da Barra – Salvador, Bahia, Brasil**; Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação Bacharelado em Geologia; Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia; Disponível em: http://www.twiki.ufba.br/twiki/pub/IGeo/GeolMono20081/jailma_souza_2008.pdf (acessado em 23/01/2013);

TIRMARCHE, M., J. D. Harrison, et al. (2010). "ICRP Publication 115. **Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon.**" *Annals of the ICRP* **40**(1): 1-64.

TRIBUNA DO NORTE – TN (2011), *Pesquisadores debatem sobre efeito do gás radônio à saúde*; 29 de Setembro de 2011; Disponível em: <http://tribunadonorte.com.br/noticia/pesquisadores-debatem-sobre-efeitos-do-gas-radonio-a-saude/232795> (acessado em: 23/01/2013);

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION – UNSCEAR *Exposure to radon and thoron and their decay products* Disponível em: www.unscear.org/doc/reports/1982/1982-D_unscear.pdf (acessado em: 11/04/2012);

YANG, M. (2011). "A current global view of environmental and occupational cancers." Journal of environmental science and health. Part C, Environmental carcinogenesis & ecotoxicology reviews **29**(3): 223-249.

* Autor Correspondente: Adelson S. de Brito, Mestrando
Programa de Pós-Graduação em Saúde Ambiente e Trabalho – PPGSAT
Faculdade de Medicina – Departamento de Medicina Preventiva Universidade
Federal da Bahia
Praça XV de Novembro - s/n, Largo do Terreiro de Jesus, Centro Histórico
40025-010 Salvador, BA
adelsonsb@gmail.com

ARTIGO 4

Medição de atividades de concentrações de radônio-222 em solos, e em uma amostra de água de nascente, de Salvador e Região Metropolitana de Salvador – RMS

Resumo

No Brasil, diferentemente de vários países do mundo, o monitoramento dos níveis de concentrações ambientais de radônio não é realizado. Este estudo tem como objetivo medir as concentrações de radônio no solo de cinco pontos distintos de Salvador e de sua Região Metropolitana (RMS). Essas concentrações foram medidas mediante o uso de um monitor de radônio do tipo Alphaguard PQ-2000 da Genitron Instruments de Frankfurt, Alemanha. O nível médio das atividades de concentração de radônio medidas foi de $1,70 \pm 0,98$ kBq/m³. Valores considerados normais para as atividades de radônio-222 no solo se encontram na faixa de 270 a 675 pCi/L de ar (10.000 a 25.000 Bq/m³) (EPA, 1990). O presente estudo busca contribuir para testar métodos de medição de radônio em ambientes e fortalecer a inclusão dessas medidas como parte de programas de vigilância sanitária, ambiental e de saúde no Brasil.

Palavras-chave: Radônio. Região Metropolitana de Salvador. Vigilância. Sanitária.

Abstract

In Brazil, unlike many countries, monitoring the levels of ambient concentrations of radon is not performed. This study aims to measure the concentrations of radon in soils in five different points of Salvador and its Metropolitan Region (RMS). These concentrations were measured by using a monitor radon-type AlphaGuard PQ-2000 manufactured by Genitron Instruments, Frankfurt, Germany. The average level of radon activity concentration measurements was 1.70 ± 0.98 kBq/m³. Normal values for the activities of radon-222 in soil are in the range from 270 to 675 pCi / L of air (10000-25000 Bq/m³) (EPA, 1990). This study seeks to contribute to include test methods for measuring environments radon concentrations as part of health, and environment surveillance programs in Brazil.

Keywords: Radon. Metropolitan Region of Salvador. Surveillance. Sanitary.

Introdução

A principal fonte geradora do radônio presente no ambiente é o solo. Outra fonte importante de geração de radônio para o ambiente interior de um domicílio é a água subterrânea e quando esta apresenta altos teores de rádio e/ou radônio, também pode ter efeito prejudicial à saúde. A concentração de radônio ocorre naturalmente em algumas águas de nascentes. Estima-se que a água potável usada contribui com 1 a 7% do radônio presente no ambiente interno de uma residência. Qualquer atividade que exponha água ao contato com o ar atmosférico tais como banho, lavagem de roupa, lavagem de louça, etc., libera radônio. Assim, estima-se que cada 10.000 pCi/L de radônio na água, gera 1 pCi/L para o ambiente (AL-MOSA, 2007).

Materiais e Métodos

Técnicas de medição de radiação ambiental

Duas técnicas de medição são comumente aplicadas nos procedimentos relativos à medição do radônio no ambiente atmosférico. A saber;

- i) *Medição atmosférica por dispositivos passivos*: Usa dispositivos que não requerem alimentação elétrica para que possam cumprir as suas funções. Em geral, esses dispositivos depois de colocados nos pontos nos quais se pretende fazer a medição, são expostos ao ambiente mediante a remoção de uma “tampa” ou “capa”. A retirada da “tampa/capa” expõe ao contato com o ar do ambiente o elemento sensível dos detectores: Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido (em Inglês, Solid State Nuclear Track Detector) – SSNTD; Câmaras de Ionização e Eletrômetros; Coletores de absorção por carvão ativado; Detectores Cintiladores; Detectores Termo luminescentes; Detectores eletrônicos de estado sólido; etc.
- ii) *Medição por Dispositivos ativos*: Usa dispositivos que necessitam de alimentação elétrica para que possam desempenhar as suas funções e geralmente envolvem o bombeamento do radônio através de circuitos internos dos seus aparelhos nos quais a desintegração deste estimula o processo de detecção da radiação. Os exemplos mais comuns desses

detectores são: Monitores contínuos de radônio e monitores contínuos de nível de trabalho (em Inglês, continuous working level monitoring,); etc.

Figura 4.1. Monitor de radônio Alphaguarda PQ-2000 em pleno uso – Praia de Jardim de Alah, Salvador, BA



Fonte: Foto tirada por Renato Santiago, 2012

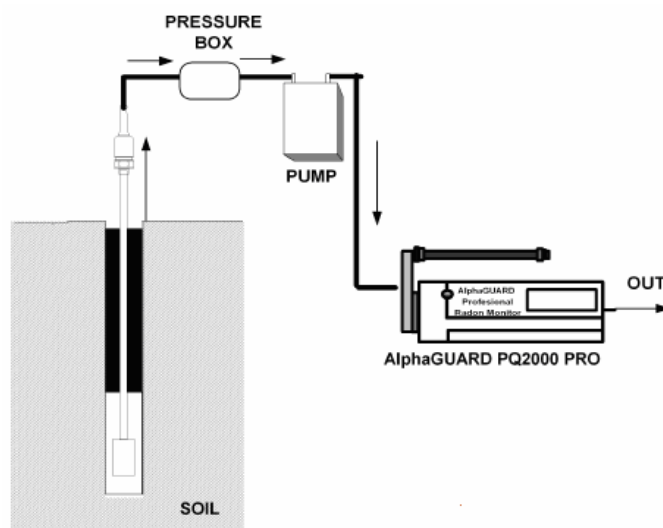
Na presente pesquisa optou-se por usar medidor ativo do tipo Alphaguard PQ-2000, foi usado para medir as concentrações de radônio no solo, por ser o único disponível no momento da realização das medidas. Essa disponibilidade se deveu também as características de robustez, precisão e autonomia desse medidor, equipado com uma bateria de boa performance e é por essas razões usado nos trabalhos de campo pelo CDTN. O Alphaguard PQ-2000 é o monitor que aparece na Figura 4.1.

O Alphaguard PQ-200

O Alphaguard PQ-2000 é um monitor capaz de realizar medições instantâneas e contínuas de radônio. Portátil e movido à bateria, esse monitor é provido de software capaz de armazenar uma grande quantidade de registros. Além da concentração de radônio o Alphaguard PQ-2000 também mede simultaneamente a temperatura, a umidade relativa do solo e a pressão atmosférica, fatores os quais influenciam os níveis

de atividade das concentrações de radônio medidos. Assim, ao combinar os resultados do monitoramento dos níveis de radônio com estes parâmetros ambientais associados é possível tirar conclusões válidas sobre a distribuição temporal e espacial do gás radônio.

Figura 4.2. Circuito de medição de atividade de radônio no solo



Fonte: ABDULFATTAH & AHMED, 2011

Esse monitor é utilizado para a medição de radônio no ambiente, minas, laboratórios e também para investigações complementares em edifícios. As medições das concentrações de radônio no ar, na água, e no solo são realizadas graças a instalação de uma vasta gama de acessórios e sondas externas.

Além dos níveis de radônio o Alphaguard também monitora os níveis de torônio (radônio-220), os quais não se constituem em objeto dos trabalhos dessa Dissertação em função da meia-vida desse descendente do tório-232 que é de 56 s e sua contribuição para a concentração de radônio é irrelevante. Porém valores das concentrações de torônio também estão listados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

A instalação e a operação do Alphaguard PQ-2000 na medição de radônio em solos

A operação do Alphaguard é uma tarefa da qual depende o sucesso das medições. O kit de campo que acompanha o Alphaguard é composto dos seguintes

itens: 1 monitor Alphaguard PQ-2000 PRO; 1 Alphapump (pump) ; 1 filtro, (que na ilustração da Figura 4.2 tem o nome de pressure box); 1 a 2 sondas metálicas. A bomba Alphapump suga o ar continuamente, o qual, ao passar pelo filtro, permite que os RDPs do radônio sejam aí separados. Ao serem conduzidos (radônio+RDPs) para o interior do aparelho, atividade alfa dos RDPs acumulados é medida por uma câmara de ionização alfa (α)-sensível. Então, a atividade alfa é transferida em forma de um sinal TTL (Transistor-Transistor Logic) ao módulo contador interno ao equipamento. Com base nos dados específicos da calibração do instrumento o equipamento determina a concentração de radônio através dos impulsos registrados (CORRÊA, 2011).

Figura 4.3. O Alphaguard PQ-200 medindo radônio no solo de uma residência no bairro do Stiep, Salvador, Ba (2012)



Fonte: Foto tirada por Zildete Rocha, 2012

Esse sistema portátil de monitoramento tem capacidade para realizar medições contínuas de concentrações de radônio e de RDPs e funciona com base o princípio da câmara de ionização pulsada.

Escolha dos locais: A escolha dos locais foi feita com base em critérios de conveniência em já expostos no Artigo 3.

Radônio na água

O radônio raramente é encontrado na superfície da água, devido ao fato de ser rapidamente liberado para o ar atmosférico, quando a água atinge o nível da superfície. No relatório de título “Toxicological Profile of Radon” (em Português, “Perfil Toxicológico do Radônio”), a EPA salienta que, em uma re-análise dos dados publicados, Hess et al. (1985) relatou uma média geométrica (MG) de 187 pCi/L (6,9 Bq/m³) de atividade de radônio-222 para uma população de 6.000 amostras de água

coletadas de fontes de água subterrânea para uso público (EPA, 1990). Em contraste, as amostras coletadas de fontes de água de superfície indicaram que o nível médio de radônio foi de 1 pCi/L ($0,037 \text{ Bq/m}^3$) (EPA, 1990).

Resultados

Concentrações de radônio foram medidas em cinco (5) pontos de solos de da Região Metropolitana de Salvador sendo 4 em Salvador e 1 em Lauro de Freitas, medição da concentração de radônio em em uma amostra de água de uma fonte pública do Centro Histórico de Salvador. Os resultados seguem tabelados abaixo, começando pelo resultado da análise da amostra de água.

Medição de radônio em água de nascente em uma fonte de uso popular no Centro Histórico de Salvador

A Tabela 4.1 apresenta o resultado da medida de radônio-222 em uma amostra de água, enquanto a Tabela 4.2 apresentadas os resultados das medições das atividades de concentrações de radônio-222 em solos.

Tabela 4.1. Valor de atividade de radônio em água medido em amostra colhida na Fonte do Pilar, Salvador, BA

Medidas de concentrações de radônio na água da Fonte do Pilar, Salvador, BA

Local		Concentração em Bq/L		
Cidade	Bairro	Radônio Total	Radônio (^{222}Rn)	Torônio (^{220}Rn)
Salvador	Cidade Baixa (Ponto 1)	$0,71 \pm 0,20$	$0,71 \pm 0,20$	–

Fonte: Resultados da pesquisa, 2012

Valores considerados normais para as atividades de radônio-222 no solo se encontram na faixa de 270 a 675 pCi/L de ar (10.000 a 25.000 Bq/m^3) (EPA, 1990). Na presente pesquisa as medidas de radônio-222 variaram na faixa demarcada pelos valores $0,40 \pm 0,43$ e $3,48 \pm 1,09 \text{ kBq/m}^3$ (ou seja de 400 a 3.400 Bq/m^3), tendo então como valor de média $1,70 \pm 0,98 \text{ kBq/m}^3$.

Tabela 4.2. Pontos de Salvador e da RMS, onde as medidas de solo foram realizadas, e os valores de atividade medidos.

Medidas de concentrações de radônio no solo

Local		Concentração em kBq/m ³		
Cidade	Bairro	Radônio Total	Radônio (²²² Rn)	Torônio (²²⁰ Rn)
Salvador	Ondina (Ponto 1)	20,57 ± 3,09	2,87 ± 1,06	17,70 ± 3,27
Salvador	Centro Histórico (ponto 2)	131,35 ± 4,48	0,49 ± 1,79	130,86 ± 4,82
Lauro de Freitas	Pitangueiras (Ponto 3)	0,42 ± 0,57	0,02 ± 0,32	0,40 ± 0,43
Salvador	Costa Azul (Ponto 4)	3,50 ± 0,93	1,28 ± 0,55	2,22 ± 1,08
Salvador	Horto Florestal (Ponto 5)	25,87 ± 3,40	3,48 ± 1,09	22,39 ± 3,57

Fonte: Resultados da pesquisa, 2012

A EPA afirma ainda que níveis de atividade de radônio-222 medidos em solos podem alcançar valores superiores a 10.000 pCi/L (370.000 Bq/m³), afirmação feita com base em evidências que já foram documentadas (EPA, 1990).

Discussão

As concentrações de radônio-222 no solo medidas nessa pesquisa, ao variar entre os valores da faixa que vai de 400 a 3.400 Bq/m³, com média de 1.700 Bq/m³, estão dentro dos padrões considerados toleráveis, ou seja, na faixa de valores tidos como normais pela EPA (1990), apesar do número pequeno de medições realizadas nessa pesquisa.

Conclusão

Os resultados dessa pesquisa não indicam a necessidade de inclusão da medição das concentrações ambientais de radônio como item de vigilância sanitária e/ou ambiental nos programas de vigilância sanitária e/ou ambiental em Salvador ou na sua Região Metropolitana. Recomenda-se, entretanto, que sejam realizadas mais pesquisas envolvendo um maior número de amostras para confirmar cabalmente o teor dessa conclusão.

Agradecimentos

O Autor agradece ao Professor Zildete Rocha, e a Talita de Oliveira Santos (MsC) do CDTN-BH, ao Programa de Pós-Graduação em Saúde Ambiente e Trabalho (PP-GSAT) do Departamento de Medicina Social e Preventiva da Faculdade de Medicina da Bahia – FAMEB, Universidade Federal da Bahia – UFBA, na pessoa do Professor Dr. Paulo Giovane Pena, ao Professor Dr. Fernando Martins Carvalho, Professor Titular do mesmo PP-GSAT, ao pessoal técnico e estudantes do Laboratório de Física Nuclear Aplicada – LFNA, do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia – UFBA, na pessoa do seu coordenador o Professor Dr. Alexandre Barreto Costa, a Professora Dra. Maria do Rozário Zucchi, e ao Professor Dr. Antonio Expedito Gomes de Azevedo do mesmo LFNA, e a todo o corpo técnico do CDTN-BH e do LFNA/UFBA.

REFERENCIAS

ABDULFATTAH A. A.; BUSHRA A.; *Radon concentration in a specified location in Baghdad city*; Al-Nahrain University College of science and Ministry of environment, 2011 Acesso: <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=41035> (acessado em 22/01/2013)

ARGONNE NATIONAL LABORATORY – ANL; **Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas; Human Health Fact Sheet: Uranium**, 2005. Disponível em: www.ead.anl.gov/pub/doc/ANL_ContaminantFactSheets_All_070418.pdf. 2005>. (acessado em: 10/10/12)

BARBOSA, J. S.F., CORREA-GOMES, L. C., DOMINGUES, J. M. L., CRUZ, S. A. S. e SOUZA, J. S. de (2005); **Petrografia e litogeoquímica das rochas da parte oeste do Alto de Salvador, Bahia**; Revista Brasileira de Geociências 35; Johido Barbosa et al. (4 – suplemento): 9-22 Dezembro de 2005.

CORRÊA, J. N.; **Avaliação dos níveis de concentração de radônio em ambientes e águas de poços no estado do Paraná**; Tese de Doutorado; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Programa de pós-graduação em engenharia elétrica e informática industrial; Curitiba, 2011;

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA; (1990) **Toxicological Profile of Radon**; Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service, in collaboration with: U.S. Environmental Protection Agency, December 1990; Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvstox/i/fulltext/toxprofiles/radon.pdf> (acessado em 22/01/2013);

GEO-HACK (2013); **Localização Salvador, Bahia, Brasil**; Disponível em: http://toolserver.org/~geohack/geohack.php?language=pt&pagename=Salvador_%28Bahia%29¶ms=12_58_16_S_38_30_39_W_type:city_region:BR_scale:75000 (acessado em: 23/01/2013);

RADON FACT SHEET;(2009); **Radon in the workplace**; What is radon; A scientific description; Disponível em: http://www.radon.com/radon/radon_facts.html (acessado em: 29/03/2013)

SANTOS, T. DE O. , (2010); **Distribuição da Concentração de Radônio em Residências e Outras Construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH**; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – UFMG/BH, Departamento de Engenharia Nuclear;

SOUZA, J. S. de; (2008); **Mapeamento Geológico da Área do Farol da Barra – Salvador, Bahia, Brasil**; Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação Bacharelado em Geologia; Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia; acesso: http://www.twiki.ufba.br/twiki/pub/IGeo/GeolMono20081/jailma_souza_2008.pdf

(acessado em 23/01/2013);

THE CHEMISTRY WIKI; *Radon*; Disponível em:
<http://chemistry.wikia.com/wiki/Radon> (acessado em: 10/10/12).

TOXICOLOGICAL PROFILE OF RADON, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service; pg. Disponível em:
<http://www.bvsde.paho.org/bvstox/i/fulltext/toxprofiles/radon.pdf> (acessado em: 29/03/2013);

ARTIGO 5

**Medição de Atividades de Concentrações Atmosféricas de Ambientes Interiores
Mediante o Uso de Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido – SSNTD**

Resumo

O urânio é um elemento radiotóxico encontrada em pequenas quantidades em quase todos os materiais naturais que ocorrem, como o solo, rocha e areia, etc. O radônio é um gás inerte radioativo cujo antecessor imediato é o rádio, e é emitido a partir do solo debaixo da casa e de materiais de construção. Neste Artigo, a teoria básica específica sobre o uso de Detectores Nucleares de Estado Sólido (SSNTD) do tipo CR-39 é apresentada, seguida do trabalho desenvolvido para a instalação e exposição ao radônio atmosférico, coleta e revelação de 30 desses detectores usados na monitoração de concentrações atmosféricas de radônio. Esses detectores foram distribuídos e expostos em cada um dos 30 pontos de coleta previamente selecionados. O sistema completo de detecção de radônio usado nessa pesquisa é composto pela seguinte infraestrutura: detectores de estado sólido, ou SSNTD, do tipo CR-39; um laboratório de revelação química, e; um sistema informatizado de contagem de traços ou trilhas (tracks). O processo de revelação química dos CR-39 expostos ao radônio é feito mediante a colocação dos mesmos em banho-maria, em uma solução aquosa de 6,25M de NaOH +2% a 70°C. O tempo de revelação foi de 14 horas. As imagens foram observadas em um microscópio ótico e contadas coma ajuda do software "Quantikov". Em relação à área analisada por cada detector, a área média analisada foi de 0,77cm². A média de atividade de concentração de radônio obtida nessa pesquisa foi de 17,80 Bq/m³, ou 0,48 pCi/L, o que, de acordo com a EPA caracteriza baixas considerações de radônio.

Palavras-chave: Radônio. Detectores. Nuclear. SSNTD.CR-39.

Abstract

Uranium is a radiotoxic element found in trace quantities in almost all natural occurring materials like soil, rock and sand etc. Radon an inert radioactive gas whose has the radium as its immediate predecessor and is emitted from soil beneath the house and from building materials. In this article, the basic theory for dealing with CR-39 type Solid State Nuclear Track Detectors, or SSNTD is presented, and then, the set of procedures related to the installation, and chemical etching of the 30 ones used for the task of monitoring atmospheric radon concentrations radon after the exposure time is elapsed are described The CR-39 detectors were distributed among the 30 previously selected data collection sites. The complete system for radon concentration measurements used in this chapter of the research consists of the following infrastructure: CR-39 type Solid State Nuclear Track Detectors; a chemical etching laboratory, and; , a Desk top Personal Computer equipped with "Quantikov" image counting software for counting the tracks on the SSNTD surface . The chemical etching process of the exposed CR-39 is done by placing them in a water bath, in an aqueous solution of 6.25 M NaOH +2% at 70 ° C during 14 hours. The images of the tracks were observed under an optical microscope and counted with the help of the "Quantikov" software. The analyzed detectors showed an exposed mean area of 0.77 cm². The average concentration of radon activity obtained in this research was 17.80 Bq/m³, or 0.48 pCi/L, which, according to EPA characterizes low radon concentrations.

Keywords: Radon. Trace Detectors Nuclear Solid State. SSNTD. CR-39.

Introdução

O urânio é um elemento radiotóxico encontrada em pequenas quantidades em quase todos os materiais naturais que ocorrem, como o solo, rocha e areia, etc. O radônio é um gás inerte radioativo cujo antecessor imediato é o rádio, e é emitido a partir do solo debaixo da casa e de materiais de construção. O rádio-226, gerador do radônio-222, é o quinto descendente na cadeia de desintegração do urânio-238. Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido ou SSNTD são fundamentalmente isolantes sólidos, que podem ser tanto de origem natural como produzidos pelo homem.

Esses detectores foram formados pelo resfriamento do material isolante no nosso planeta, ou seja, sempre existiram (KHAN e KHAN, 1989).

Existem vários tipos destes detectores que usam como elemento sensível, diferentes tipos de material que vão desde cristais inorgânicos, até vidros e plásticos, etc.: O uso de detectores de estado sólido em pesquisa nuclear nasceu em 1958, quando D. A. Young descobriu os primeiros “sulcos” em um cristal de fluoreto de lítio (LiF), o qual havia sido previamente colocada em contacto com uma folha de urânio, irradiada com nêutrons lentos e tratada com uma solução química agressiva. Nesse experimento, os nêutrons térmicos provocaram a fissão dos núcleos de urânio e os fragmentos dessa fissão bombardearam o cristal de fluoreto de lítio, “danificando-o”. As “regiões danificadas” se tornariam regiões quimicamente mais ativas que as áreas circundantes (áreas não danificadas) (NICKEZIC, 2004). Um ano mais tarde, Silk e Barnes relataram o achado de “regiões danificadas” em mica. Eles usaram um microscópio eletrônico de transmissão para investigar sulcos gravados na mica por pesadas partículas carregadas na mica.

O primeiro detector de estado sólido de trilhas gravadas por partículas alfa (α -particle) foi construído em nitrato de celulose. Esse material, porém, se mostrou pouco sensível para efeito da respectiva função (KALSI et al., 2005).

Os detectores de policarbonato tais como Lexan e o Makrofol são geralmente utilizados para a gravação de fragmentos de fissão nuclear. Esses detectores têm um tipo de especial de policarbonato que funciona como elemento sensível ao bombardeio iônico.

Princípio de funcionamento e uso dos SSNTD

A técnica de detecção de trilhas nucleares através do uso de Detectores de Traço Nuclear de Estado Sólido (os SSNTD) tem sido utilizado para a medição da

concentração e distribuição de um número de elementos (urânio, plutônio, o polônio, tório, bismuto, chumbo, boro, lítio, etc), dentre uma vasta gama de materiais. Para que ocorra o processo de detecção é necessário que ocorra a emissão de produtos gerados por reações de ionização a partir da amostra em estudo (KHAN & KHAN, 1987). Por exemplo, uma partícula alfa com energia de 6 MeV cria cerca de 150.000 pares de íons aos quais, por exemplo, a superfície de um composto sólido de nitrato de celulose é sensível. Sabendo-se que o alcance do deslocamento dessa partícula está na faixa de 40µm, pode-se concluir que cerca de 3700 pares de íons resultam criados em cada micronmetro avançado, ou seja, três a quatro pares são criados para cada nanômetro (MORAES, 1982). O principal interesse desta pesquisa é observar a evidência física impressa (denominado “dano”) pelas partículas alfa expelidas de átomos em decaimento, ao incidem sobre a superfície do elemento de detecção. Assim, a informação útil colhida do detector de traço nuclear de estado sólido é extraída da análise do “dano” que uma partícula pesada eletricamente carregada irá causar na superfície desse elemento detector (KHAN e KHAN, 1987). O “dano” provocado pelo bombardeio (incidência) da partícula alfa sobre a superfície se apresenta sob a forma de uma trilha que é denominada “trilha latente” (MORAES, 1982).

Características dos SSNTD

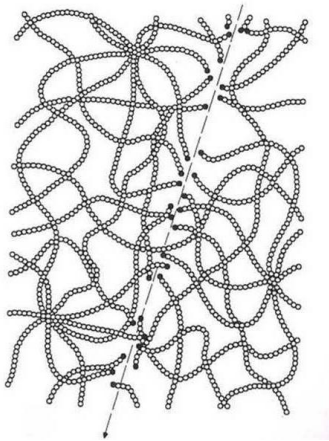
Esses detectores possuem algumas características peculiares que os tornam úteis em diversos campos da ciência e da tecnologia, tais como, física nuclear, física das partículas elementares, geoquímica, medicina, dosimetria de nêutrons, etc.: Dentre as principais características, estão:

- São robustos e fáceis de instalar e usar;
- São baratos e de processamento simples.
- Possuem sensibilidades variadas: por exemplo, o CR-39 é sensível às partículas alfa na faixa de energia característica das emissões alfa associadas à desintegração do radônio;
- São caracteristicamente insensíveis a radiação beta e a radiação gama;
- não são afetados pela umidade, ou pelas baixas temperaturas, ou por aquecimentos moderados, ou pela luz;
- as trilhas gravadas, mesmo depois de tratadas como a solução agressiva, não mudam o formato, ou o número quando armazenadas sob variadas condições (não requer condições especiais para o seu armazenamento);

- Não requer fonte de energia para ser operada, vez que sua capacidade de detecção é uma característica intrínseca do material;
- Tem melhor resolução de carga e de energia;
- as informações detalhadas sobre cada partícula individual pode ser recuperada (o tamanho e formato das trilhas revelam informações sobre a carga, massa, tipo de partícula e trajetória de incidência associada ao respectivo bombardeio);
- Seu alto ponto de fusão permite que sejam expostos diretamente ao bombardeio de partículas resultantes da fragmentação em reações de fissão nuclear;
- Podem ser construídos sob qualquer forma geométrica, o que os torna particularmente utilizáveis em medições de distribuição angular.

(AL-MOSA, 2007).

Figura 5. 1. O caráter atômico da trilha de uma partícula em um polímero.



Fonte: AL-MOSA, 2007

Porém, como qualquer tipo de detector, os SSNTD também apresentam algumas desvantagens, como por exemplo, requerem períodos mais longos de exposição: para os modelos atualmente em uso, o período recomendado é de três meses (AL-MOSA, 2007). São também particularmente laboriosos no que diz respeito à contagem das trilhas gravadas pelas partículas, depois de “reveladas”.

Qualquer teoria que tente explicar a formação de “trilhas” (“tracks”, em Inglês) na superfície do SSNTD em consequência do bombardeio de partículas deve contemplar o fato de que partículas altamente ionizantes provocam danos em forma de trilhas de dimensões atômicas em sólidos isolantes (AL-MOSA, 2007). Assim, se a superfície de

um SSNTD, foi bombardeada por uma partícula, uma trilha que começa na superfície e se estende até uma profundidade compatível com o alcance característico da partícula. Na inexistência de um modelo teórico universalmente aceito sobre a formação das trilhas, são aventadas várias vertentes teóricas para explicar a formação das referidas trilhas (AL-MOSA, 2007). Todas, no entanto, guardam em comum a incapacidade de explicar detalhada e completamente o fenômeno de gravação das trilhas, tanto em materiais orgânicos quanto em materiais inorgânicos (AL-MOSA, 2007). Entretanto, nos polímeros dois processos são considerados como os estágios mais importantes no desenvolvimento do “dano” que vem a ser denominado de “trilha”. São eles:

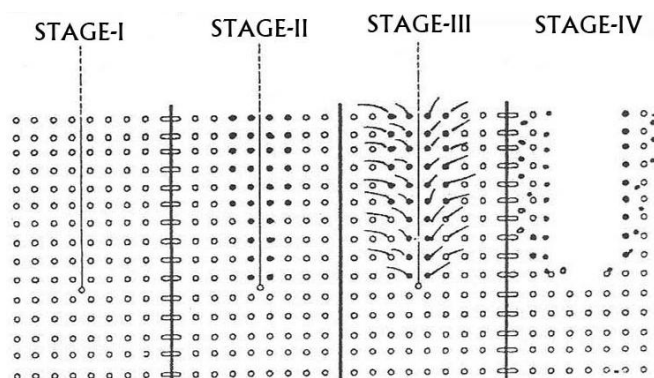
Criação do “dano” e Relaxação do “dano”.

(AL-JARALLAH, 2012).

Criação do dano

No processo de criação do “dano” a partícula carregada em movimento é desacelerada pela colisão com a superfície do SSNTD, (o Estágio i da Figura 5.2) e sua energia cinética é transferida para essa superfície, assinalando um “ponto de impacto”, o qual se desenvolve durante um intervalo de tempo extremamente ínfimo, e a partícula estará finalmente parada. Esse intervalo temporal é da ordem de 10^{-17} s, para partículas alfa de 1 MeV de energia (AL-JARALLAH, 2012) . Na Figura 5.1 se vê a partícula penetrando o SSNTD qual um projétil balístico que rompe ligações moleculares, gerando assim as **trilhas latentes** (grifo nosso) (NICKEZIC, 2004).

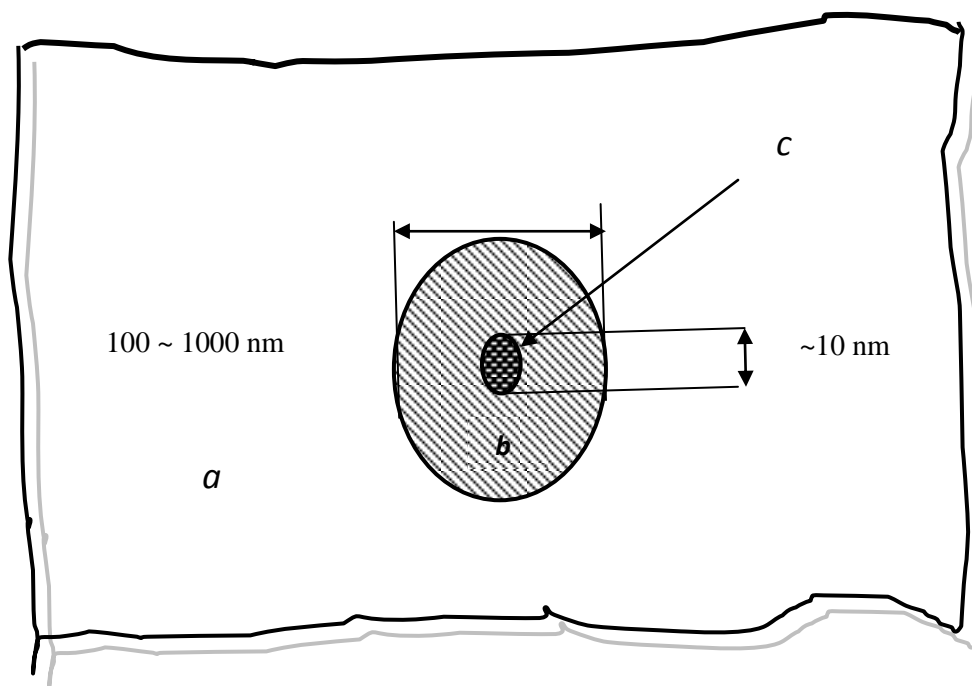
Figura 5.2. Os quatro estágios do processo de formação de trilhas: Estágio i) Trajetória da partícula carregada; Estágio ii) Ionização; Estágio iii) Repulsão Coulombiana; Estágio iv) Relaxação do dano



Fonte: AL-MOSA, 2007

A penetração de uma partícula pesada eletricamente carregada no seio do SSNTD produz uma ionização da região adjacente a sua trajetória, que varia inversamente com a distância em relação ao ponto de impacto da partícula, ou seja, em regiões distantes a ionização será menor. Na Figura 5.1., se pode ver a representação da trajetória da referida partícula a partir do instante da colisão contra a superfície do SSNTD. Logo adiante, na Figura 5.2., se vê uma esquematização dos processos de criação e relaxação do dano acima referido.

Figura 5.3. (a) Ilustração esquemática frontal (topo) do dano provocado por uma partícula pesada carregada ao atingir a superfície de um polímero.



a = área não danificada ; b = halo da trilha ; c = núcleo da trilha

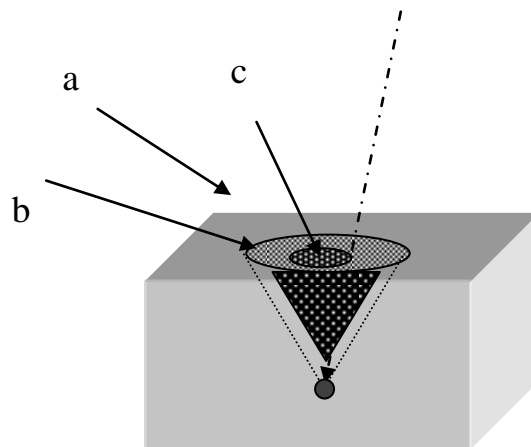
Criação do Autor, 2013

Relaxação do dano

Na etapa de relaxação do dano, a ionização dos átomos e moléculas caracteriza o “Estágio ii” e se propagará pela região afetada, produzindo um número de elétrons livres, que constituirão uma “cascata eletrônica” que se afasta da zona de impacto deixando para trás uma região de plasma positivamente carregado (AL-JARALLAH, 2012). Assim, a região adjacente a essa perturbação se transforma em uma zona molecularmente ativada (ativação iônica) em um processo com duração na ordem de 10^{-14} s, ou seja, três ordens de magnitude maior que o processo no processo de

interação inicial (AL-JARALLAH, 2012). Esses elétrons, por sua vez darão origem a novos processos de ionização e excitação via interação com átomos e moléculas da região próxima, dando origem a mais e mais elétrons livres (MORAES, 1982). Do ponto de vista da constituição química do material haverá uma alteração notável. A repulsão Coulombiana entre os átomos e moléculas (Estágio iii.), agora ionizados, é o principal fenômeno em destaque. Por fim, é o dano resultante desse processo que se apresenta sob a forma denominada “trilha latente” (Estágio iv). A Figura 5.3 apresenta uma ilustração de uma imagem vista do topo (ampliada sem escala) do ponto de impacto, após todo o processo acima descrito.

Figura 5.3. (b). Ilustração do foco do dano aproximada em “close” simula o dano provocado pela partícula eletricamente carregada ao penetrar até o âmago do SSNTD.



Construção do Autor, 2013

Na Figura 5.3.(b) uma ilustração aproxima em (“close”), a visão em perspectiva do dano provocado pela partícula eletricamente carregada ao penetrar até o âmago do SSNTD. As variações na textura da ilustração sugerem a extensão do dano provocado pela penetração da partícula carregada sendo que a concentração das estruturas atômicas mais extensivamente afetadas pelo evento se localiza nas partes mais interiores, e essa gradação é simbolizada pela gradação da textura da ilustração que avança do tom mais claro para o tom mais escuro.

As ilustrações apresentadas nas Figuras 5.1, 5.2, e 5.3 (a) e (b) oferecem uma analogia da penetração da partícula carregada com a trajetória de um projétil balístico oriundo de um disparo de arma de fogo alojada em um alvo o que ajuda a conceber uma visualização ampliada do dano físico ao SSNTD, gerado pelo impacto das

partículas carregadas. Assim, se vê uma região maior (correspondente à região *a*, não afetada pelo disparo/irradiação) No interior dessa região maior, é vista uma região mais restrita ao contorno próximo do ponto de impacto da partícula (região *b*, ou halo da trilha), e no centro, a zona de impacto da partícula propriamente dito (a região *c*, o núcleo da trilha). Essa última região é sede de considerável adensamento dos defeitos atômicos (AL-JARALLAH, 2012).

Alguns modelos teóricos de formação das trilhas

A gravação de trilhas latentes como consequência da irradiação por partículas ionizantes acontece em materiais isolantes, ou seja, em sólidos condutores não ocorre à formação de trilhas latentes como consequência da irradiação/bombardeio de partículas ionizantes (NICKEZIC, 2004). Visto assim, esse quadro sugere a existência de um valor limite de resistividade do material que favoreça a formação de trilhas latentes estáveis (MORAES, 1982). Entretanto, na prática, não há um único valor limite (mínimo) de resistividade acima do qual esteja garantida a formação de trilhas duradouras, dificultando assim, a adoção desse parâmetro como condição absoluta para a ocorrência das trilhas. Dentre os vários modelos teóricos concebidos com vistas a explicar a formação das trilhas destacam-se:

i) Deslocamento Atômico Direto (Direct Atomic Displacement):

É o modelo que considera a ocorrência de colisões da partícula com átomos e moléculas como fato gerador de espaços atômicos intersticiais e de vacâncias atômicas em aglomerados, sob a forma de uma trilha limitada pelos defeitos atômicos vicinais resultantes, ou como um aglomerado de defeitos localizados no fim da trajetória. Esse modelo é mais usado para explicar a formação de trilhas produzidas por partículas pesadas de baixa energia (AL-MOSA, 2007):

ii) Modelo do Pico Térmico (Thermal Spike Model):

Segundo esse modelo a região ionizada pela passagem da partícula carregada tem a forma de um cilindro estreito. As paredes desse cilindro e suas regiões próximas são rapidamente aquecidas a elevadas temperaturas no instante da passagem da partícula e em seguida rapidamente resfriadas em consequência da condução térmica desse calor para através das matrizes das regiões vizinhas (AL-MOSA, 2007);

iii) Modelo do Pico de Explosão Iônica (Ion Explosion Spike Model)

De acordo com esse modelo uma partícula carregada que se move rapidamente, perde energia em consequência da ionização e da excitação que transfere para o meio. Essas transferências criam centros de carga no meio circundante e uma consequente matriz de íons instáveis adjacentes (AL-MOSA, 2007). Ainda segundo previsões teóricas, as interações das partículas pesadas com os elétrons não resultariam em alterações significativas nas direções originais das suas trajetórias, ou seja, as partículas passariam por tais interações, mantendo suas trajetórias anteriores às colisões. Porém, há algumas interações nas quais as partículas pesadas que incidam sobre os SSNTD penetram os átomos interagem mediante forças Coulombianas com elétrons e núcleos próximos ao curso das suas trajetórias, como se vê na figura 5.2. Assim, enquanto são as partículas não desviadas das suas trajetórias originais as causadoras dos danos (MORAES, 1982), os elétrons ejetados em consequência do processo de ionização formam os raios δ os quais, quando portadores de energia suficiente, podem produzir novas ionizações e excitações (AL-MOSA, 2007).

Aspectos cinéticos da perda de energia da partícula incidente

A partícula incidente perde energia ao interagir mecanicamente com o sólido detector, através de transferências via ionização e excitação do meio, em um processo fracionado em pequenos módulos (NICKEZIC, 2004). Em geral, a perda de energia de uma partícula pesada ao interagir com as moléculas do meio são pequenas para cada molécula envolvida. No ar, por exemplo, a ionização de uma molécula é obtida mediante uma injeção de energia de, em média, 32 eV (NICKEZIC, 2004). Considerando que a energia de partículas carregadas capazes de registrar trilhas está na ordem dos milhões de elétron-volt (MeV), a referida ionização está na ordem entre 10^{-4} e 10^{-5} dos valores das energias características daquelas (NICKEZIC, 2004). Assim, em consequência do processo de interação físico-química entre a partícula pesada e as moléculas do sólido detector, ela perde energia de forma fracionada em pequenos processos em uma sequencia contínua até a sua parada completa. A quantidade física que descreve a desaceleração das partículas carregadas ao longo de suas trajetórias em meios materiais é o poder ou força de frenagem (em Inglês “stopping power”) dada pela expressão $-dE/dx$, na qual dE é a energia perdida ao longo da distancia dx . Os cientistas debruçados sobre a questão da formação de trilhas em sólidos isolantes

acreditaram em princípio que o poder de frenagem seria um parâmetro suficiente para embasar uma teoria capaz de explicar a formação de trilhas. Ou seja, pensou-se que a resposta para a pergunta sobre a formação das trilhas estaria na deposição de energia por unidade de avanço da partícula no meio. De fato, o modelo teórico com base em uma relação entre o poder de frenagem e a formação da trilha se ajustou bem aos dados experimentais no âmbito das baixas energias. Porém, aquisições de dados relativos a experimentos com energias mais elevadas não confirmaram a eficácia desse modelo (RAKUŠA, 2006). O que está no centro das iniciativas de explicação da formação das trilhas, é a influencia da força de frenagem sobre a velocidade de corrosão V_T (da trilha latente) desenvolvida pela solução química (reagente). Segundo Nickežic (2004), Fleischer et al., observou valores de força de frenagem limite para os quais ocorreram formações de trilhas latentes, na busca de uma correlação entre essa força e a velocidade de corrosão da trilha V_T . Uma dificuldade, porém, surge no desenvolvimento dessa ideia: Verifica-se a presença de “danos” em regiões exteriores ao núcleo da trilha (10 μm de diâmetro), o que sugere que, em alguns casos, a radiação se espalha para além da trilha aberta pela partícula. Uma explicação para tal fenômeno é a atuação dos elétrons δ . Esses elétrons são desalojados dos seus átomos pelos elétrons primários gerados pela colisão direta da partícula incidente. Esses elétrons δ carregam uma boa parte da energia da partícula incidente para regiões exteriores a trilha latente (RAKUŠA, 2006). Dois modelos foram concebidos visando contornar a acima referida dificuldade. O primeiro assume que somente os íons gerados na trilha latente, em consequência da ionização primária contribuem majoritariamente para a elevação da velocidade de corrosão da trilha V_T . Como os elétrons escapam dessas áreas, zonas de repulsão Coulombiana são aí criadas entre os íons positivos mantendo-os afastados uns dos outros. Valores de ionização primária dependem de parâmetros da partícula incidente e do material do detector (RAKUŠA, 2006). O segundo modelo, em uso hoje em dia, é o modelo da Perda Restrita de Energia, ou em Inglês, Restricted Energy Loss, em Inglês, ou REL. Esse modelo envolve novamente a energia dos elétrons δ . De acordo com esse modelo, as trilhas latentes são formadas a partir do depósito de energia pelas partículas incidentes em interações com elétrons distantes, em colisões ditas “de grande parâmetro de impacto” (RAKUŠA, 2006). Assim são obtidos os elétrons em recuo, portadores de energias acima de um valor de disparo $E_{\delta 0}$ característica de certos polímeros (para o CR-39 esse valor é 350 eV) (RAKUŠA, 2006). A equação para o cálculo da REL é

obtida mediante subtração do termo referente à energia dos elétrons δ portadores de energia E_δ acima do valor limiar $E_{\delta 0}$:

$$REL = \left(\frac{dE}{dx} \right) - \left(\frac{dE}{dx} \right)_{E_\delta > E_{\delta 0}}$$

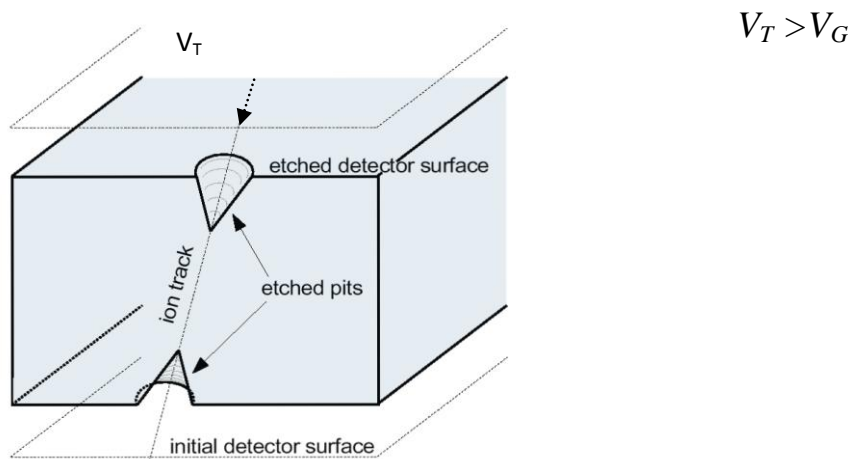
Equações que tomam como base a força de frenagem são de pouca utilidade prática, e servem tão somente para ilustrar as propriedades do projétil (partícula) que desempenham papéis importantes com relação ao fenômeno de perda de energia nas colisões com a matéria (RAKUŠA, 2006). Na prática, são usados programas de simulação numérica como o “Alcance e Parada de Íons na Matéria”, ou em Inglês, “Stopping and Range of Ions in Matter”, em Inglês, ou SRIM, como é mais conhecido. A partir daí a continuação do estudo analítico da relação entre a força de frenagem e a formação da trilha, entra por uma vertente de aprofundamento que foge ao escopo desse trabalho.

Geometria das trilhas e o processo de revelação

Conforme já mencionado, a visualização das trilhas latentes, mesmo quando sob um cuidadoso exame microscópico é tarefa difícil (AL-MOSA, 2007). Voltando as Figuras 5.3 (a) e 5.3 (b), uma visualização de topo da trilha, destaca a região afetada pela irradiação (região de impacto associado à colisão da partícula com a superfície do SSNTD). Essas trilhas podem ser “reveladas” mediante um processo de ataque químico feito através da exposição do SSNTD a uma solução ácida ou básica (AL-MOSA, 2007). O SSNTD o qual foi usado como detector das partículas carregadas e que contém agora “trilhas latentes”, ao ser exposto a soluções aquosas quimicamente ativas, como, por exemplo, soluções aquosas de hidróxido de potássio, de fórmula KOH, ou de hidróxido de sódio de fórmula NaOH, sofre a ação corrosiva da solução, ação essa a qual se mostra mais acentuada nas partes danificadas pela irradiação (as trilhas latentes). Assim, essas trilhas são realçadas e fixadas no material. O que acontece de fato, é que a ação química se processa com maior rapidez sobre as “zonas danificadas” em comparação com a velocidade de corrosão da parte não afetada pela irradiação (AL-MOSA, 2007). Ou seja, a ação da exposição à solução ácida grava essas “trilhas” na superfície desse material (AL-MOSA, 2007). No aspecto macroscópico, entretanto, há

que se observar que essa trilha assim formada é fortemente dependente da temperatura ambiente (NICKEZIC, 2004). Observações experimentais envolvendo SSNTD do tipo CR-39, mostram que as trilhas nesse detector desaparecem após 1 (uma) hora de exposição a um ambiente de temperatura igual a 250° C (NICKEZIC, 2004). A análise da geometria do problema nos auxiliará a entender a evolução química do processo de revelação. Como já foi dito acima, o ataque químico promove a ampliação e fixação da trilha latente. É no processo de revelação da trilha latente, que a diferença entre as taxas de corrosão da parte da superfície não irradiada do SSNTD e da parte irradiada dessa superfície (parte danificada) solução, desempenharão papel decisivo para elucidação da medição. A velocidade de ataque (ou corrosão, retirada de material, desgaste, etc.:) da solução ácida das partes não danificadas pela irradiação é denominada **Velocidade Geral de Corrosão** (grifo nosso), simbolizada por V_G , enquanto a velocidade de corrosão das partes irradiadas (trilhas latentes) é denominada de **Velocidade de Corrosão das Trilhas latentes** (grifo nosso), simbolizada por V_T .

Figura 5.4. Trajetória da partícula (trilha). A velocidade de corrosão V_T é maior do que a velocidade de corrosão da parte não danificada, V_G resultando daí a formação de bocas cônicas (pitch).



Fonte: RAKUŠA, 2006

Na Figura 5.4., está ilustrada a trajetória da partícula (trilha). A velocidade de corrosão V_T é maior do que a velocidade de corrosão da parte não danificada, V_G resultando daí a formação de bocas cônicas (pitch, em inglês,) na superfície da SSNTD.

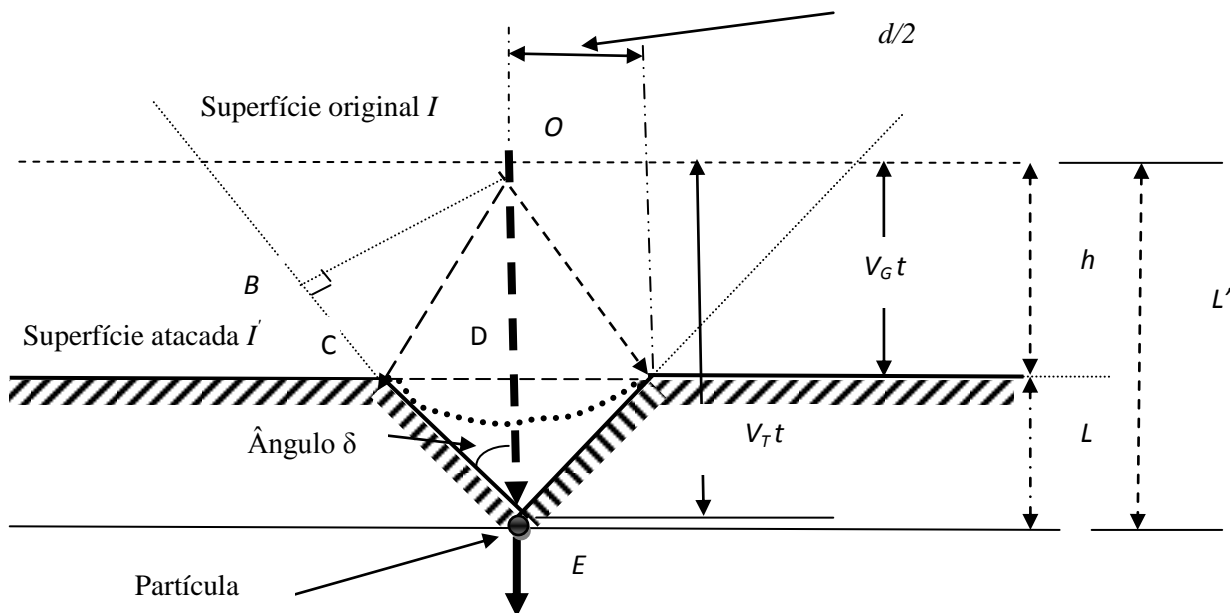
Os processos de corrosão química artificial em polímeros são em geral implementados sob condições de temperatura controlada, variando na faixa que vai de

40 a 70° C. Os detectores submetidos a esses processos permanecem imersos nos banhos por períodos que podem variar entre 2 a 6 horas. As soluções aquosas de hidróxido de sódio (Na OH) ou hidróxido de potássio (KOH) com molaridade entre 2 e 6 M, estão entre as mais comumente usadas (AL-MOSA, 2007). A condição fundamental para que a trilha seja alargada e, assim, tornada visível a um microscópio ótico, é a que velocidade de corrosão da trilha V_T seja maior que a velocidade geral de corrosão do SSNTD V_G ($V_T > V_G$) (AL-MOSA, 2007).

Uso analítico dos parâmetros da trilha

Para ilustrar o estudo da formação da trilha, se analisa aqui o caso mais simples, qual seja a trajetória de uma partícula que incide sobre o SSNTD sob o ângulo $\theta = 0^\circ$, (ângulo de incidência nulo):

Figura 5.5. Uma visualização da trajetória de uma partícula pesada carregada desde a colisão com o SSNTD segundo uma perpendicular, até a sua parada;



Criação do Autor, 2013.

Na Figura 5.5 a geometria do problema está ilustrada, para que se possa acompanhar o desenvolvimento geométrico analítico do problema; Os parâmetros

tomados para esse fim são: V_G , a velocidade geral de corrosão do SSNTD pela solução ácida; V_T , a velocidade de corrosão da trilha latente gravada pela partícula; O , o ponto de (impacto) entrada da partícula; E , é o ponto de parada da partícula no seio do SSNTD; a distância $\overline{OE} = R$ é o alcance da partícula no material detector; a distância entre I e I' é h , que vem a ser a espessura da camada do detector removida pela ação da solução corrosiva; L é a altura (comprimento do eixo longitudinal) da trilha, enquanto L' é a distância total do caminho percorrido pela solução ao longo da trilha gravada pela partícula.

A superfície original do SSNTD, simbolizada pela letra I ; a superfície do SSNTD após o ataque químico pela solução ácida, simbolizada pela letra I' ; V_G , a velocidade de corrosão; d é o diâmetro da boca da perfuração produzida pelo impacto da partícula, parâmetro que mantém estreita relação com a energia da partícula. Vamos estabelecer algumas relações entre esses parâmetros geométricos: Observa-se na figura 6.5, uma ilustração da geometria interessante à elucidação analítica do diâmetro da “boca” ou entrada da partícula no SSNTD. Os seguintes parâmetros são considerados para efeito do processo analítico do problema em estudo:

1) O comprimento da trilha L pode ser expresso como

$$L = (V_T - V_G)t$$

2) O diâmetro da boca de entrada da partícula d , pode ser calculado a partir de relações do triângulo ΔEBO . Vemos que

$$\sin \delta = \frac{\overline{BO}}{\overline{EO}}$$

e que

$$\cos \delta = \frac{\overline{EB}}{\overline{EO}} = \frac{\overline{EB}}{V_T t}$$

assim como também

$$\tan \delta = \frac{\overline{BO}}{\overline{EB}} ; \overline{BO} = V_G t ; \tan \delta = \frac{V_G t}{\overline{EB}}$$

Para determinar \overline{EB} , recorre-se mais uma vez ao triângulo EBO :

$$\begin{aligned} |\overline{EB}|^2 &= |\overline{EO}|^2 - |\overline{BO}|^2 \\ \overline{EB} &= \sqrt{(V_T t)^2 - (V_G t)^2} \rightarrow \overline{EB} = t \sqrt{(V_T)^2 - (V_G)^2} \end{aligned}$$

Então

$$\tan \delta = \frac{V_G}{\sqrt{(V_T)^2 - (V_G)^2}}$$

Para determinar o ângulo δ recorreremos mais uma vez ao triângulo ECD . Observando que

$$\tan \delta = \frac{\overline{CD}}{\overline{DE}} = \frac{d/2}{L} = \frac{V_G}{\sqrt{(V_T)^2 - (V_G)^2}}$$

Substituindo aí o valor de L vem

Tem-se daí então como calcular o d , o diâmetro da trilha em qualquer estágio do processo.

$$\frac{d/2}{(V_T - V_G)t} = \frac{V_G}{\sqrt{(V_T)^2 - (V_G)^2}}$$

$$d = \frac{2V_G(V_T - V_G)t}{\sqrt{(V_T)^2 - (V_G)^2}}$$

ou seja,

$$d = 2V_G t \sqrt{\frac{V_T - V_G}{V_T + V_G}}$$

que é a expressão do diâmetro da trilha em qualquer estágio temporal t do processo.

É essa fórmula que é usada para determinar o diâmetro da boca de entrada de uma partícula alfa emitida pela desintegração do radônio-222 presente no ar ambiente.

Figura 5.6 Uma vista breve do processo laboratorial de revelação química dos SSNTD



Fonte: AL-JARALLAH, 2012.

O carbonato de polyalldiglicol ou CR-39

Dentre os sólidos usados como elementos sensíveis ao ataque das partículas carregadas, ou seja, como SSNTD, estão alguns formados por compostos químicos do nitrato de celulose, como o Lexan, e o Makrofol. Os detectores de policarbonato, tais como o Lexan, são usados para gravar trilhas relativas a fragmentos de fissão nuclear.

Na atualidade o sólido mais comumente usado como detector de trilha nuclear de estado é o polímero carbonato de polyallyldiglicol (cuja fórmula é $C_{12}H_{18}O_7$), mais conhecido como CR-39. O código CR é o acrônimo do título em inglês, “Columbia Resine” (AL-MOSA, 2007).

Trata-se de um plástico incolor, rígido resistente a solventes e altamente sensível ao bombardeio de íons e, além disso, o CR-39 se mostra altamente eficiente na detecção de partículas na faixa de energia que vai desde prótons de baixa energia até íons altamente energéticos. Em adição ainda tem a vantagem possibilitar a diferenciação entre as energias das partículas alfa (AL-MOSA, 2007). No presente trabalho, usamos o detector CR-39 como fontes primárias de coleta de dados sobre as concentrações de radônio nos ambientes de interesse.

Figura 5.7. Mapa da Região Metropolitana de Salvador (RMS)



Fonte: WIKIPÉDIA, 2013

A decisão quanto ao uso de detectores SSNTD do tipo CR-39 se deu com base em alguns aspectos desses detectores, dentre os quais se destacam:

- i) Alta sensibilidade às partículas alfa emitida pela desintegração do radônio (alta confiabilidade);
- ii) Baixo custo aquisitivo;
- iii) Facilidade de montagem nas Câmaras de Difusão, transporte, instalação, etc.;
- iv) Manutenção de uma boa transparência ótica mantida mesmo após o ataque químico;

Materiais e Métodos

No presente trabalho 30 detectores SSNTD do tipo CR-39, foram distribuídos um por um em cada um dos 30 pontos selecionados, para efeito das medições das atividades das concentrações de radônio. Dentre esses 30, só 22 foram processados regularmente, geraram resultados.

Em consonância com o objetivo foi colocado em prática o trabalho de medição das atividades de concentrações de radônio em ambientes interiores de algumas residências e de prédios públicos das cidades de Salvador, Camaçari e Lauro de Freitas, ambas localizadas na Região Metropolitana de Salvador (RMS). Souza (2008) revela em seu Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia, que a Região Metropolitana de Salvador (RMS) se encontra inteiramente inserida no Orógeno Salvador-Esplanada e que foi subdividida por Barbosa et al. (2005) em três domínios geológicos principais:

(i) a Bacia Sedimentar do Recôncavo, constituída por rochas sedimentares mesozoicas, faz parte de um sistema maior denominado Recôncavo-Tucano-Jatobá e limitada a leste pela Falha de Salvador;

ii) a Margem Costeira Atlântica, formada por depósitos terciários e quaternários, os quais são constituídos por acumulações pouco espessas de sedimentos inconsolidados de natureza argilosa, arenosa e areno-argilosa, que foram modelados por flutuações climáticas e do nível relativo do mar, e

(iii) o Alto de Salvador, que representa um *Horst* de rochas cristalinas arqueanas e/ou paleoproterozóicas, metamórficas de alto e médio grau, que separa a Bacia Sedimentar do Recôncavo do Oceano Atlântico.

(SOUZA, 2008).

Em entrevista no Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Barbosa e Souza, afirmaram que “do ponto de vista estrutural geológico, as rochas que embasam a cidade de Salvador ainda carecem de estudos por que os seus afloramentos rochosos ocorrem de forma descontínua e/ou estão cobertos por vegetação” (Souza, 2008).

Centrada na cidade de Salvador, cujas coordenadas de localização geográfica são 12° 58’ 16’’S e 38° 30’ 39’ W (GEO-HACK, 2013), a Região Metropolitana de Salvador, também conhecida como Grande Salvador (e pelo acrônimo RMS), foi instituída pela Lei Complementar Federal número 14, de 8 de junho de 1973. Com 3.642.682 habitantes (IBGE, 2012), é a terceira região metropolitana mais populosa do Nordeste (WIKIPÉDIA, 2013).

Escolha dos Locais

Em adição aos critérios da escolha dos locais de coleta já relatados no Artigo 4, os seguintes aspectos pesaram para escolha definitiva dos pontos de instalação dos detectores SSNTD:

- I) As residências monitoradas são construídas sobre alvenaria comum ou radie, e com paredes em bloco cerâmico e concreto, e geralmente, bem ventiladas. São casas térreas (com exceção de duas (2) dentre essas) com cerca de 150 a 200 m² de área construída, e arquitetura semelhante, no que toca aos elementos básicos como janelas, portas, paredes e pisos.
- II) O tamanho das casas foi definido tomando por base residências de alunos bolsistas do LFNA/UFBA, que muito colaboraram para o sucesso do presente projeto.
- III) O número de residências onde foram instalados os detectores, contudo, ficou limitada a capacidade logística do Autor, reduzida em função de inúmeras dificuldades dentre as quais a equipe reduzida e ao tempo disponível para a pesquisa.

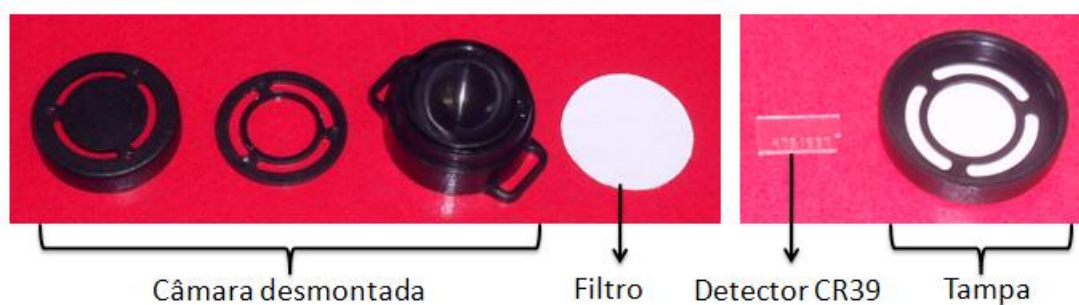
Ainda assim, dos 30 SSNTD CR-39 distribuídos para a coleta de dados do presente trabalho, foram 4 foram perdidos por extravio por parte dos responsáveis pelos locais da instalação.

Montagem dos CR-39 e instalação nos pontos de coleta

Os detectores SSNTD CR-39 foram montados dentro de recipientes denominados “câmaras de difusão”. Essas são fabricadas em fibra de carbono de alta condutividade elétrica. Fisicamente, essas câmaras são semiesferas com capacidade volumétrica de 7,1 cm³ e 3 cm de diâmetro (CORRÊA, 2011). É composta de uma tampa vazada para a passagem de ar, na qual se instala o filtro, cuja função é impedir que os aerossóis atmosféricos penetrassem no interior da câmara. Assim, somente os produtos do decaimento do radônio que se desintegra no interior da câmara se depositam sobre o detector (CORRÊA, 2011).

A Figura 5.8 (a) e (b) mostra imagens das peças que compõem o kit de montagem dos SSNTD nas câmaras de difusão. Da esquerda para a direita aparecem: As peças da tampa da câmara e a bacia da câmara; o filtro; o detector CR-39, e a tampa depois de montada. A segunda peça da esquerda para a direita é o anel de fixação do detector. O detector é fornecido pelo fabricante, envolto em um filme de celulose “azulado”, o qual o protege de exposições acidentais e/ou anteriores a sua utilização como elemento detector.

Figura 5.8. (a) As peças componentes da câmara de difusão e (b) o CR-39 e a tampa montada



Fonte: CORRÊA, 2011.

Uma parte importante do processo de montagem do detector na tampa é atentar para o fato de que deve ter a face na qual está gravado o seu número de identificação, voltada para baixo, ou seja:

Figura 5.9. Imagem do elemento detector SSNTD CR-39, com destaque para a face onde está gravado o seu número de identificação.



Fonte: CORREA, 2011

a face que será exposta às partículas provenientes da desintegração do radônio deve ser a face oposta aquela na qual está gravado o número de identificação, conforme se apresenta na Figura 5.8.

Figura 5.10 Uma bolsista do LFNA montando um CR-39

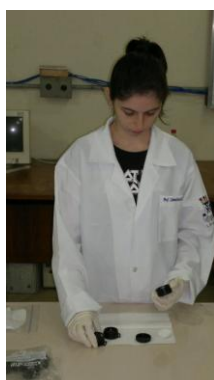


Foto tirada pelo Autor, 2012

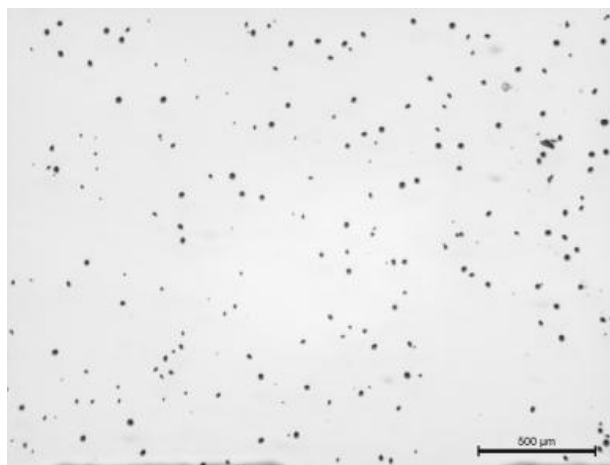
Essa precaução tem como objetivo garantir que o elemento detector CR-39 possa ser identificado após a sua exposição à desintegração do radônio e, além disso, continue sendo identificado após o processo químico de revelação ao qual é submetido para extração da informação.

Os SSNTD CR-39 foram instalados nos ambientes (cômodos) interiores das residências e prédios. Todos os CR-39 foram instalados, guardando a distância de ± 1 m acima do nível do solo e 1 – 1,5 m de distância das paredes onde permaneceram por um

período médio de 95,77 dias expostos a desintegração do radônio contido no ar atmosférico.

O processamento da revelação química dos CR-39 começou com o banho termostático. Os detectores CR-39 são colocados no fundo de um béquer com o lado oposto aos números de identificação (lado exposto durante a medida) para cima. O volume de NaOH utilizado na revelação é de aproximadamente 200 mL por béquer. Os detectores devem ficar completamente cobertos pela solução. Nessas condições se consegue revelar cerca de 30 detectores CR-39 por seção. Entretanto, para casos onde o número de detectores CR-39 for muito grande é possível ajustar as condições para aumentar a velocidade desse processo, e colocar aí mais de 30 detectores por béquer.

Figura 5.11 Imagem da superfície de um CR-39 após a revelação



Fonte: Imagem microscópio CDTN, 2012

A contagem dos traços e o cálculo do fator de calibração

Quanto à contagem de traços, a área sensível do detector é de 1 cm^2 , ou seja, a concentração de traços ocupa essa área.

São feitas 15 imagens por detector. Tais imagens são processadas através do software “Qantikov Image Analyzer” ou “Quantikov” como é mais referido. Obteve-se a quantidade de traços por cm^2 . Segundo Corrêa (2011) é a o tamanho dessa área útil, que nos CR-39 é de um $(1) \text{ cm}^2$ que permite *A eficiência dos CR-39*

A eficiência do sistema de detecção utilizado foi obtida em trabalho conjunto no qual participaram o CDTN, a UFTPR, e um laboratório japonês (para onde os detectores

foram enviados em 2010) (Corrêa, 2011). Esse processo de análise dos dados levou à construção da equação de calibração:

$$C_{Rn} = (405 \pm 30) \cdot n \text{ (Bq} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad \text{(CORRÊA, 2011).}$$

Nessa equação, n é o número de traços/hora por 1 cm^2 do detector. A Figura 5.15 mostra a imagem de microscópio de um detector CR-39 após revelação.

Discussão

Do total de 30 (trinta) detectores CR-39, 8 unidades foram prejudicadas e não geraram resultados, ou seja, houve uma perda 26,33%, o que seria um percentual alto, caso não fossem consideradas algumas peculiaridades apresentadas pelas condições sob as quais a pesquisa foi conduzida. As peculiaridades foram:

- i) Falta de tempo e de infraestrutura para a realização de um treinamento mais eficaz dos responsáveis locais (professores e alunos que colaboraram) pela instalação e retirada dos CR-39, o que certamente, gerou a perda por extravio de 4 dos desses detectores CR-39;
- ii) Falta de uma infraestrutura laboratorial para avaliação da radiação gama dos locais onde foram instalados os CR-39 (o laboratório de medição de radiação gama no LFNA está momentaneamente desativado). Daí, o descarte de 3 dos CR-39 em virtude de terem apresentado uma radiação gama ou radiação de background (BG) em valores muito altos. É provável que os locais nos quais esses detectores foram instalados tenham altos valores de BG, o que só poderá ser comprovado mediante novas medições;
- iii) Um dos CR-39 foi perdido em consequência de um problema técnico no CDTN, com relação à revelação.

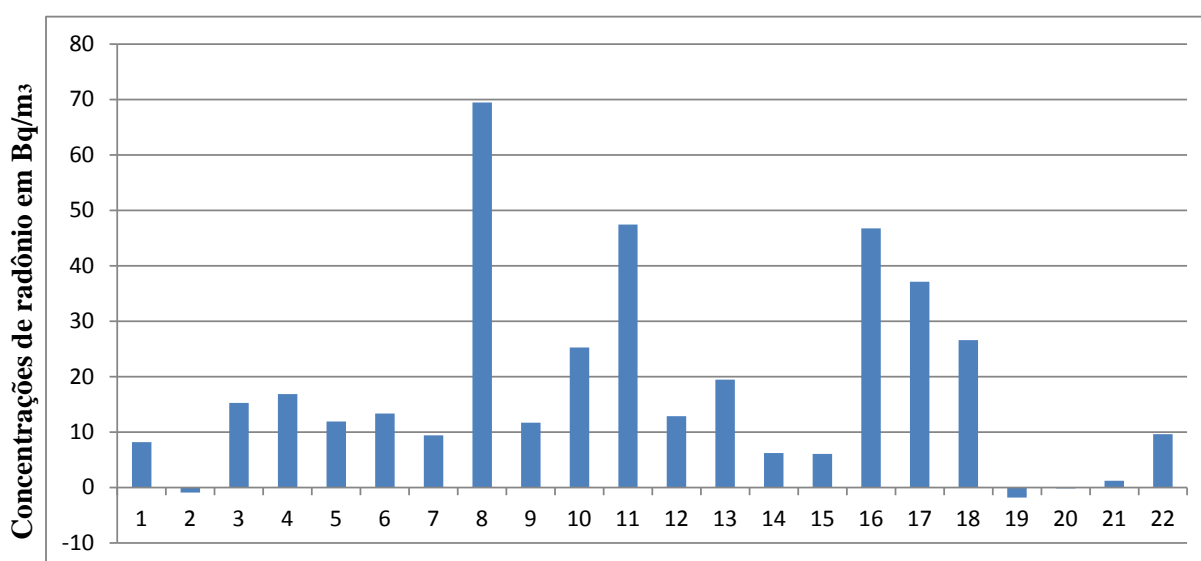
Em favor da validade do uso de detectores SSNTD CR-39, tem-se a sua comprovada eficácia corroborada em várias pesquisas realizadas em diferentes partes do globo terrestre.

O CR-39 perdido em consequência de uma falha técnica do CDTN, foi o de número de identificação 4814327, que foi revelado, mas não foi processado, daí não foi integrado aos resultados.

Resultados

Em relação à área analisada por cada detector, a área média analisada foi de $0,77\text{cm}^2$. A média de atividade de concentração de radônio obtida nessa pesquisa foi de $17,80\text{ Bq/m}^3$, ou $0,48\text{ pCi/L}$, o que, de acordo com a EPA caracteriza baixas concentrações de radônio.

Gráfico 5.1 Distribuição das concentrações de radônio medidas por ambiente



Ambientes

Fonte: Resultados da pesquisa, 2013

Assim tem-se ao todo 22 resultados válidos.

Os resultados das medidas das concentrações estão apresentados no Gráfico 5.1. Assim, o BG (background) médio calculado foi $83,33\text{ traços/cm}^2$, para uma distribuição média de $160,89\text{ traços/cm}^2$. No Gráfico 5.1, está representada a distribuição das atividades de concentração de radônio medida por ambiente:

Conclusão

A UNSCEAR estabelece o patamar de 40 Bq/m^3 como atividade média para as áreas de baixo background. A média de atividade de concentração de radônio obtida nessa pesquisa foi de $17,80 \text{ Bq/m}^3$, (ou $0,48 \text{ pCi/L}$), o que, de acordo com a EPA caracteriza baixas concentrações de radônio. Essa referencia coloca os valores aqui medidos dentro dos padrões tidos como toleráveis.

Assim os resultados dessa pesquisa não fornecem evidencias capazes de sustentar as propostas de inclusão do radônio como item obrigatório nos programas de vigilância sanitária e/ou ambiental em Salvador e sua Região Metropolitana. Entretanto, é extremamente recomendável que mais pesquisas sejam realizadas incluindo outras estações do ano e um maior número de detectores.

Agradecimentos

O Autor agradece ao Professor Zildete Rocha, e a Professora Talita de Oliveira Santos (MsC) do CDTN-BH, ao Programa de Pós-Graduação em Saúde Ambiente e Trabalho (PP-GSAT) do Departamento de Medicina Social e Preventiva da Faculdade de Medicina da Bahia – FAMEB, Universidade Federal da Bahia – UFBA, na pessoa do Professor Dr. Paulo Giovane Pena, ao Professor Dr. Fernando Martins Carvalho, Professor Titular do mesmo PP-GSAT, ao pessoal técnico e estudantes do Laboratório de Física Nuclear Aplicada – LFNA, do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia – UFBA, ao Professor Dr. Alexandre Barreto Costa, a Professora Dra. Maria do Rozário Zucchi, e ao Professor Dr. Antonio Expedito Gomes de Azevedo do mesmo LFNA, e a todo o corpo técnico do CDTN-BH e do LFNA/UFBA.

REFERENCIAS

AL-JARALLAH, M. I., (2012); **Solid State Nuclear Track Detectors: Principles and Applications** (Power Point Presentation); Department of Physics, King Fahd University of Petroleum and Minerals; Dahahran, Saudi Arabia; Disponível em: [http://www.docstoc.com/docs/123412427/Solid-State-Nuclear-Track-Detectors - Principles-and-Applications](http://www.docstoc.com/docs/123412427/Solid-State-Nuclear-Track-Detectors-Principles-and-Applications) (acessado em 10/07/2012);

AL-MOSA, T. M. A; **Indoor Radon Concentration In Kindergarteb, Play- And Elementary Schools In Zulfi City (Sudi Arabia)** (2007); Acesso: <www.faculty.ksu.edu.sa/23499/.../Zulfi%Thesis.pdf>. (acessado em 02/02/2012);

BARBOSA, J. S.F., CORREA-GOMES, L. C., DOMINGUES, J. M. L., Cruz, S. A. S. & Souza, J. S. de (2005); **Petrografia e litogeoquímica das rochas da parte oeste do Alto de Salvador**, Bahia; Revista Brasileira de Geociências 35 Johido Barbosa et al (4 – suplemento): 9-22 Dezembro de 2005.

GEO-HACK (2013); **Localização Salvador, Bahia, Brasil**;
Disponível em:
http://toolserver.org/~geohack/geohack.php?language=pt&pagename=Salvador_%28Bahia%29¶ms=12_58_16_S_38_30_39_W_type:city_region:BR_scale:75000
(acessado em: 23/01/2013);

KHAN, H. A. AND KHAN, N. A. (1989); Solid State Nuclear Track Detectors SSNTD: **A useful Scientific tool for Basic and Applied Research**; Review Article; *Journal of Islamic Academy of Sciences* 2:4, 303 – 312, 1987;

KALSI, P. C.; RAMASWAMI, A. AND MANCHANDA, V. K. (2005); **Solid State Nuclear Track Detectors and their Applications**; Global Centre For Nuclear Energy Partnership (DAE, India); Disponível em: <http://www.barc.gov.in/publications/nl/2005/200506-2.pdf> (acessado 10/07/2012);

NICKEZIC, D. AND YU, K. N. (2004); **Formation and growth of tracks on nuclear track materials**; Material Science and Engineering R46 2004 (51 – 123); Reports: A Review Journal; Disponível em: www.elsevier.com/locate/mser (acessado: 10/07/2012);

RAKUŠA, A.(2006); **Polymer Charged Particle Detectors :Seminar**; Univerity of Ljubljna, Faculty of Mathematics and Physics; Disponível em: http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2005_2006/seminar_ang.pdf (acessado em 12/08/2012);

SANTOS, T. de O. , (2010); **Distribuição da Concentração de Radônio em Residências e Outras Construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH**; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – UFMG/BH, Departamento de Engenharia Nuclear;

SOUZA, J. S. de; (2008); *Mapeamento Geológico da Área do Farol da Barra – Salvador, Bahia, Brasil*; Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação Bacharelado

em Geologia; Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia; Disponível em: http://www.twiki.ufba.br/twiki/pub/IGeo/GeolMono20081/jailma_souza_2008.pdf (acessado em 23/01/2013);

Discussão Geral

No Brasil, o radônio ainda não recebe das autoridades sanitárias o tratamento e a atenção que recebe em vários outros países quer sejam do primeiro mundo, quer sejam emergentes.

Os efeitos na saúde provocados pela exposição às altas doses de concentração de radônio presente, por exemplo, nas minas, onde as concentrações podem atingir níveis em torno de 1.000.000 Bq/m³ pode ser encontrados em vários relatos da história da humanidade como, por exemplo, na descrição dada por Paracelso (pseudônimo de Phillipus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim; 1493 — 1541) em 1530, que reportava uma doença degenerativa que se abatia sobre os mineiros, denominada “**metallorum mala**” (grifo nosso). Embora àquela época não se entendesse que o radônio era o agente causador da referida enfermidade, visto que nem a radiação nem o radônio haviam sido descobertos, o mineralogista Georg Agricola recomendava a ventilação de minas para evitar este “mal da montanha”. Em 1879 essa enfermidade foi identificada como o câncer de pulmão por Herting e Hesse em sua investigação de mineiros de Schneeberg, Alemanha (RADON AND PUBLIC HEALTH, 2009).

Além de mineração em geral, o radônio é um problema particular na mineração de urânio. Associações estatisticamente significativas entre um excesso de mortes por câncer de pulmão foram identificados em estudos epidemiológicos de mineiros de urânio e de outros minérios durante os anos de 1940 e 1950. Em estudos de mineiros de urânio, os trabalhadores expostos a níveis de radônio de 50 a 150 picocuries de radônio por litro de ar (2000-6000 Bq/m³) por cerca de 10 anos, têm demonstrado um aumento da frequência de câncer de pulmão, e excessos estatisticamente significativas na mortes por câncer de pulmão em níveis de exposições cumulativas de menos de 50 WLM.

Em 2012 o Ministério da Saúde publicou um “Guia” denominado “Diretrizes para a vigilância do câncer relacionado ao trabalho”. Esse guia preparado pelo Instituto Nacional de Câncer (INCA), traz dentre vários tópicos relacionados ao tema, alguns itens os quais já no capítulo “Introdução”, coloca a importância da vigilância do câncer. Um exemplo disso é a informação de que o câncer representa atualmente a segunda causa de morte no mundo, respondendo por 20% dos óbitos na Europa, onde com mais de 3 milhões de novos casos, acumula o escore de 1,7 milhões de óbitos por ano (INCA 2012). Em seguida esse mesmo capítulo de “Introdução”, enfatiza o caráter desigual da distribuição dessa mortalidade visto que mais de 70% de todas as mortes por câncer

ocorrem em países subdesenvolvidos ou em vias de desenvolvimento (INCA 2012). Para a América do Sul, América Latina e Caribe, foi estimada em 2008, a ocorrência de 1 milhão de casos novos e 598 mil óbitos, com uma prevalência acentuada do câncer de próstata, seguido do câncer de cólon e reto. .

A Organização Mundial da Saúde enfatiza que “... aproximadamente 80% dos casos de câncer estão relacionados a fatores ambientais, em maior ou menor grau, evitáveis (WHO, 2002)...”. O fato estranho é a não recorrência dos pesquisadores e responsáveis pela edição e publicação do “Guia” ao conteúdo do relatório da mesma WHO, datado de Março de 2011, no qual é feita uma abordagem a carcinogênese de alguns agentes ambientais primários. Como foi atribuído pelo “Guia” a WHO 2002 a afirmação de que a maioria dos riscos de exposição para o câncer ocupacional é evitável, essa afirmação se repete no trabalho da WHO 2011. Porém sensível para o conjunto de estudos desenvolvidos nessa Dissertação, o texto da WHO de 2011, coloca explicitamente que estimativas posicionam a exposição ao radônio em ambientes interiores como causa de 3-14% de todos os cânceres de pulmão, em 2004, e que esse poluente se constitui a segunda causa mais importante de câncer de pulmão em muitos países (WHO, 2011). Essa sensibilidade não é reproduzida pelo “Guia” do INCA. Aliás, durante o desenvolvimento dos trabalhos e pesquisas dessa dissertação não foram encontradas evidências que possam corroborar a adoção no Brasil de postura consoante com o quadro internacional enfatizado pela WHO em relação ao radônio. Ou seja, no Brasil de hoje não há sinais claros de disposição por parte das autoridades quanto à inclusão do radônio ambiental como item de verificação sanitária. Esse estado de coisas revela, no mínimo, uma postura isolacionista e anacrônica, incompatível com um projeto de país que pretende integrar a comunidade internacional ocupando um lugar de destaque e liderança. O Brasil tem a sexta maior reserva de urânio do mundo na classe “Razoavelmente Assegurada” e a terceira maior reserva na classe “Recursos Adicionais Estimados” (MATOS & RUBINI, 1999). A mina baiana situada entre os municípios de Caetité e Lagoa Real, microrregião de Guanambi que integra as Bacias Hidrográficas do Rio de Contas e do São Francisco possui a segunda maior reserva do Brasil. O projeto básico da mina foi concluído em 1996, indicando uma lavra a céu aberto na Jazida de Cachoeira, a 45 km da sede municipal, entre os distritos de Maniaçu (Caetité) e São Timóteo, com teor médio de urânio de 3000 ppm. As atividades da mineração foram iniciadas em março de 2000 e, o Distrito Uranífero de Caetité – Lagoa Real é hoje, responsável pelo suprimento de combustível nuclear para o consumo doméstico, com

previsão de produção de cerca de 400 toneladas por ano de diuranato de amônio, DUA ou **yellow cake** (grifo nosso). Daí, a primeira pergunta a ser colocada no centro das discussões é simples e direta: Como fica o meio ambiente e a saúde pública em meio à disseminação da ignorância das consequências da exploração e beneficiamento do urânio a ser utilizado nos programas nucleares? A segunda pergunta que logo segue é: Por que os pesquisadores ligados ao governo brasileiro não reproduzem no território nacional as preocupações dos pesquisadores e autoridades internacionais quanto ao radônio ambiental? E a terceira pergunta é: Porque sendo o “Guia” um instrumento composto por “diretrizes para a vigilância do câncer relacionado ao trabalho”, é omissivo quanto à questão do câncer ocupacional dos mineiros em geral e dos mineiros e trabalhadores da indústria do urânio? No capítulo 3 do “Guia”, sob o título “Capítulo 3: Tipos de câncer e relação com a exposição ocupacional” são tratados a partir da página 47. A relação entre o câncer de pulmão e a exposição ocupacional está tratada na página 50. A seguir, o texto que versa sobre a exposição ocupacional dos mineiros é, em sua íntegra, reproduzido abaixo:

“Trabalhadores expostos à inalação de poeira no trabalho em minas de carvão, manganês e níquel também apresentam um risco aumentado para câncer do pulmão, assim como mineiros expostos ao urânio” (Hoffmann; Jöckel, 2006).

Ou seja, não há sequer, menção ao radônio, e muito menos a associação entre a exposição ao radônio e a incidência de câncer de pulmão em mineiros. Essa e outras posturas dentro dessa mesma classe causam estranheza haja vista que evidências da associação entre a exposição ao radônio e aos produtos do seu decaimento (RDPs) e o câncer de pulmão se avolumam.

Por fim, em 2005, a Assembléia Mundial de Saúde organizada pela World Health Organization WHO aprovou uma resolução sobre a prevenção e controle do câncer pela qual exortou os países membros a desenvolver programas que visam a redução da incidência e mortalidade por câncer. Esta resolução convida todos os Estados-Membros a desenvolverem programas nacionais de câncer, que incluem medidas de prevenção, detecção precoce aumentada e triagem, bem como um melhor tratamento e cuidados paliativos.(WHO, 2011). A resolução defende atenção especial aos cânceres evitáveis, mediante a redução da exposição a produtos químicos e a fumaça do cigarro no local de trabalho e no ambiente, evitando também a exposição a alguns agentes infecciosos e a radiação ionizante e a radiação ultravioleta (WHO, 2011).

Conclusão Geral

Tomando como parâmetro orientador o objetivo geral de medir concentrações de radônio em ambientes de Salvador e da sua Região Metropolitana, essa dissertação apresentou três métodos de medição. Através dos Artigos, os métodos de medição foram apresentados e analisados tanto do ponto de vista das suas respectivas fundamentações teóricas, quanto dos seus respectivos desenvolvimentos em nível de campo e os resultados obtidos a partir das suas respectivas aplicações. Do ponto de vista abrangente da saúde como consequência do ambiente, a tônica da classificação do radônio como um importante agente carcinogênico, fator determinante para a sua inclusão como item de saúde pública, foi pano de fundo em cada um dos Artigos. Afinal, o controle dos níveis de concentração desse radionuclídeo é um mecanismo importante para garantir que os ambientes domésticos e os ambientes ocupacionais sejam seguros para o desempenho das atividades humanas no que toca a exposição a níveis comprovadamente prejudiciais de radiação.

Entretanto, quanto à cidade de Salvador e sua Região Metropolitana a conclusão geral dessa dissertação guardada a conjuntura de restrições (de ordem financeira e material) que a caracterizaram durante todo o seu desenvolvimento, é que não foram coletadas evidências que possam dar suporte a inclusão do monitoramento permanente das concentrações de radônio, como item de programas de prevenção em saúde pública e/ou vigilância ambiental. Entretanto, recomenda-se expressamente a realização de novas pesquisas incluindo um número maior de amostras e a instalação de uma infraestrutura de apoio (laboratório de revelação de detectores, apoio para treinamento de pessoal, etc.) condizente com esse incremento no número de amostras. O CDTN já se colocou a disposição tanto da Faculdade de Medicina da Bahia FAMEB, quanto do Laboratório de Física Nuclear Aplicada LFNA, quanto ao fornecimento de equipamento e de apoio logístico para o melhor desempenho das tarefas afins a tal empreendimento. É importante enfatizar que a experiência adquirida pelos autores durante o desenvolvimento da presente pesquisa aponta sugere fortemente que a melhoria das ações de vigilância sanitária no combate as doenças associadas à poluição radioativa tanto nos ambientes domésticos quanto nos ambientes ocupacionais passa pelo monitoramento efetivo das concentrações de radônio nos referidos ambientes.

LISTA GERAL DAS REFERENCIAS

ABDULFATTAH, A. A.; BUSHRA A.; **Radon concentration in a specified location in Baghdad city**; Al-Nahrain University College of science and Ministry of environment, 2011 Acesso: <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=41035> (acessado em 22/01/2013)

ABNT NBR 10004; NORMA BRASILEIRA; Segunda edição; **Resíduos Sólidos – Classificação** ; Disponível em: www.aslaa.com.br/legislacoes/NBR_n10004-2004.pdf (acessado em 28/12/2012);

AMERICAN CANCER SOCIETY – ACS; **Learn About Cancer: Find Information and resources for a specific cancer topic**, (2012); Disponível em: www.cancer.org/CancerCauses/OtherCarcinogens/Pollution/radon. (acessado em 10/10/12);

AL-JARALLAH, M. I., (2012); **Solid State Nuclear Track Detectors: Principles and Applications** ;(Power Point Presentation); Department of Physics, King Fahd University of Petroleum and Minerals; Dahahran, Saudi Arabia; Disponível em: faculty.kfupm.edu.sa/...ppt/NTDs...via Google; (acessado em 20/01/2013);

ALLEN, K; KOTRAPPA, P; **E-perm passive integrating electret ionization chambers for measuring radon in air, thoron in air, radon in water and radon flux from surfaces/building materials**; Radon in the Living Environment, 19-23 April 1999, Athens, Greece; Disponível em: http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/Radon1999/007.pdf (acessado em: 25/09/12);

ALMEIDA, G. M.; **Dose de Exposição Radiométrica no Entorno das Minas de Caetité Ba e Santa Quitéria, Ce**; Departamento de Física, Núcleo de Pós-Graduação; São Cristovão, Sergipe, Abril de 2011; Disponível em: <http://www.fisica.ufs.br/npgfi/documentos/dissertacoes/geangela.pdf> (acessado em 30 /11/2011);

AL-Mosa, T. M. A. **Indoor Radon Concentration In Kindergarteb, Play- And Elementary Schools In Zulfi City (Sudi Arabia)** (2007). Disponível em www.faculty.ksu.edu.sa/23499/.../Zulfi%Thesis.pdf. Acesso em 02/02/2012

ARGONNE NATIONAL LABORATORY – ANL; *Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas; Human Health Fact Sheet: Uranium*; (2005); Disponível em: http://www.ead.anl.gov/pub/doc/ANL_ContaminantFactSheets_All_070418.pdf (acessado em 10/08/2012);

ACTION RADON TESTING – ART; (2013); Disponível em: <http://actionradon.com/> (acessado em 19/03/2013);

BARBOSA, J. S.F., CORREA-GOMES, L. C., DOMINGUES, J. M. L., CRUZ, S. A. S. & SOUZA, J. S. de (2005); **Petrografia e litogeoquímica das rochas da parte oeste do Alto de Salvador, Bahia**; Revista Brasileira de Geociências 35 (4 – suplemento): 9-22 Dezembro de 2005;

BIBUDHENDRA, S.; (2007); **Heavy Metals in the Environment**; pg. 94; Dekker/Amazon Kindle Edition; first edition (April 167, 2007); 670 pp.;

BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION – BIER VI; **Health Risks from Exposure to Low Level Radiation, phase 2**; 2006, The National Academic Press; Disponível em: http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=11340&page=91 (pg. 266 e 267); 424 pgs.;

BRASIL 247; (2013); **SUS vai bancar mais tratamentos contra o cancer**; Acesso: <http://www.brasil247.com/pt/247/saudeebemestar/89536/> (acessado em 20/02/2013);

CASSARETI, L. J. , KLAASEEN, C. D., DOULL, J. ; **Doull's toxicology: the basic science of poisons, Chapter 21: Toxic Effects of Radiation and Radioactive Materials**, by Naomi H. Harley, 2001, pg. 723 – 727; McGraw-Hill Medical Pub. Division, 1236 pg.

CCOHS – Canadian Center for Occupational Health and Safety (2007) ; *Radiation – Quantities and Units of Ionizing Radiation* ; Disponível em : www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/ionizing.html (acessado em 22/12/2012);

CHAMLEY, H.; (2003); **Radioactivity**; Geosciences, Environment and Man; pg. 280 – 281; Gulf Professional Publishing; 527 pp. ; ISBN 0444514252, 9780444514257;

CHOPPIN, G. R., LIJENZIN, J-O., RYDBERG, J.; (1995); **Chapter 8, Detection and Measurement Techniques**; Radiochemistry and Nuclear Chemistry; (192 – 238), Ed. Butterworth-Heinemann (1995) 707 pp;

CONNELL, C. P; **Radon – A Brief Discussion**; (2012); Forensic Applications Consulting Technologies, Inc.; Disponível em: www.forensic-applications.com/radon/radon.html (acessado em 10/08/2012);

CONSTITUIÇÃO DO ESTADO DA BAHIA; Disponível em: http://www.mp.ba.gov.br/institucional/legislacao/constituicao_bahia.pdf (acessado em 29/11/201);

CORRÊA, J. N.; **Avaliação dos níveis de concentração de radônio em ambientes e águas de poços no estado do Paraná**; Tese de Doutorado; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Programa de pós-graduação em engenharia elétrica e informática industrial; Curitiba, 2011;

COSTA, A. B.; **Radioatividade Alfa e Radiocarbono em Águas Subterrâneas no Estado da Bahia**; Dissertação de Mestrado”. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador (2001).

COMISSÃO PASTORAL DA TERRA – CPT, Regional da Bahia, **Caetité se solidariza com vítimas de Fukushima** (2011); Disponível em: <www.cptba.org.br> (acessado em: 09/09/12).

DARKO, E. O. et al ; **Radiation doses and hazard from crude oil processing in Ghana**: Oxford Journals: Radiat. Prot. Dosimetry (2011) doi: 10.1093/rpd/ncr088 First published online: April 11, 2011; Disponível em: <http://rpd.oxfordjournals.org/content/early/2011/04/11/rpd.ncr088.full> (acessado em 28/12/2011);

DIVISION OF ENVIRONMENTAL HEALTH SCIENCES, 2012; University of Minnesota **Radon Molecular Action and Genetic Effects**; Disponível em: <<http://ehs.umn.edu/hazards/hazardssite/radon/radonmolaction.html>>; (acessado em: 08/10/12);

ELLIOTT, D.; **Fukushima: Impacts and Implications**; Palgrave Pivot (Editora); pg. 13 – 14 (154 pgs);30 /10/2012; ISBN-10: 1137274328 | ISBN-13: 978-1137274328

EMSLEY, J. (2001); **Nature’s Building Blocks: An A – Z Guide to the Elements**; Oxford University Press; pg.478; 537pp.;

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA; **EPA Assessment of Radon in Homes** ; Office of Radiation and Indoor Air United States Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460 ; June 2003; Disponível em: www.epa.gov/radiation/doc/assessment/402-r-03-003.pdf (acessado em 28/12/2011);

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA – (2012); **EPA Assessment of Risks from Radon in Homes (2003)** ;Office of Radiation and Indoor Air; Disponível em: <http://www.epa.gov/rpdweb00/docs/assessment/402-r-03-003.pdf> (acessado em 20/08/2012);

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA, *Radiation Protection: Relative Abundance of Uranium Isotopes*;(2012); Disponível em :<<http://www.epa.gov/rpdweb00/radionuclides/uranium.html>>. (acessado em: 02/10/2012);

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA (1990); **Toxicological Profile of Radon**; Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service,in collaboration with: U.S. Environmental Protection Agency, December 1990; Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvstox/i/fulltext/toxprofiles/radon.pdf>; (acessado

em 22/01/2013);

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA; (2013); **Radon: Test, Fix, Save a Life**; (2013); Disponível em: <http://www.scdhec.gov/administration/library/CR-009680.pdf> (acessado em 15/01/2013);

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA; **Radiation Protection: Relative Abundance of Uranium Isotopes**; 2012; Disponível em: <<http://www.epa.gov/rpdweb00/radionuclides/uranium.html>>; (acessado em: 02/10/2012);

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA – (2012) ;**Radon Health Risk**; Disponível em: www.epa.gov/radon/healthrisk.html (acessado em 20/08/2012);

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA; **Home buyer´s and seller´s Guide to Radon** ; Disponível em: (<http://www.epa.gov/radon/pubs/hmbyguid.html>) (acessado em 22/12/2012);

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA – USA/EPA (2012) ; *Glossary of Terms* ;Acesso: www.epa.gov/radon/glossary/html (acessado em 22/12/2012);

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA – USA/EPA (2012) ; **A Citizen´s Guide to Radon** ;Disponível em: www.epa.gov/radon/pubs/citguide.html (acessado em 22/12/2012);

ERNBO, H: (2006): **Minimal detectable amount of radon progeny in outdoor air**; Master of Sciences Thesis; Stockholm, 2006;pg. 20; Disponível em: http://www.nuclear.kth.se/diploma/helena_xjobb.pdf (acessado em 21/01/2013);

FRIEDLANDER, G; KENNEDY, J. W.; MACIAS, E. S.;MILLER, J. M.; **Chapter 5: Equations of Radioactive Decay and Growth**; (1981) pgs. 191 – 205; Nuclear and Radiochemistry; John Willey and Sons, Inc; 685 pp;

GEO-HACK (2013); *Localização Salvador, Bahia, Brasil*; Disponível em: http://toolserver.org/~geohack/geohack.php?language=pt&pagenome=Salvador%28Bahia%29¶ms=12_58_16_S_38_30_39_W_type:city_region:BR_scale:75000 (acessado em: 23/01/2013);

GEOLOGICAL TIME – GG (2013); Disponível em: <http://earthsci.org/education/teacher/basicgeol/geotim/geotim.html> (acessado em 17/01/201)

GRAY, H. B. ; 1994; **Ionization Energy of Atomic Hydrogen**; Chemical Bonds: An Introduction to Atomic and Molecular Structure; pg. 15; University Sciences Book, Salalito, CA; 232 pp.

Greenpeace; **Ciclo do Perigo: Impactos da Produção de Combustível Nuclear no Brasil: Denúncia: contaminação da água por urânio em Caetité, Bahia**, 2008. Publicação do Greenpeace/Relatório, p. 40, 2008.

GUNDERSEN, L. C. S. (1993); **The Correlation Between Bedrock Geology and Indoor Radon : Where it Works and Where it Doesn't Work-Some Examples from the Eastern United States**; The 1993 International Radon Conference, IV 1 – 8;

GUPTA, R., KUNDU, A. C., SARANGI, A. K., **Uranium Mining, Milling and Tailing Disposal Best Practices**; Proceedings of the National Seminar on “Environmental and sociological Implications of mining (Coal, Limestone and Uranium) and exploration of Oil and Natural Gas in India; Jun 5 – 6, 2003;

GUPTA, R. ; (2009); **Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents**; pg. 395; Academic Press; first edition March 17, 2009); 1168 pp.;

HALL, P.; **Cancer Risk After Exposure to Low Dose of Ionizing Radiation – Contributions Learnt From Epidemiology**; Karolinska Institute Sweden , 2001, Proceedings of a Scientific Seminar on Low Dose Ionizing Radiation and Cancer Risk held in Luxembourg on November 9, 2001 ; (pg. 20)

HEALTH EFFECTS OF RADON;Disponível em:
http://en.wikipedia.org/wiki/Health_effects_of_radon (acessado em: 30/03/2013);

IAEA – International Atomic Energy Agency; (2011); **Chapter 6: Equations of Radioactive Decay and Growth**; Disponível em:
http://www.naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/global_cycle/vol%20I/cht_i_06.pdf (acessado em 03/04/2011);

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE **Censo 2010**; Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/amostra/>> (acessado em: 05/10/2012);

INTEGRATED ENVIRONMENT MANAGEMENT, INC. – IEM (1999) ; **Radon-related consulting services from Integrated Environment Management, Inc** ; Disponível em: www.iem-inc.com/prn2.html (acessado em 22/11/2012)

INSTITUTO DO CÂNCER JOSÉ GOMES DA SILVA – INCA ; (2012); **Diretrizes para a vigilância do câncer relacionado ao trabalho**; Ministério da Saúde; Disponível em:
http://www1.inca.gov.br/inca/Arquivos/diretrizes_cancer_ocupa.pdf (acessado em 19/02/2013);

KABAT, G. C.; **Hyping Health Risks in Daily Life and the Science of Epidemiology: The Science and Politics of Residential Radon**, (2011), Columbia University Press, New York, USA; pg. 144-145, 272 pgs.;

KABATA-PENDIAS, A. & MUKHERJEE, A. B.; (2007); **Trace Elements from Soil to Humans**; pg. 124; Springer; ISBN 3540327134, 9783540327134; 550 pp.;

KALSI, P. C.; RAMASWAMI, A. AND MANCHANDA, V. K. (2005); **Solid State Nuclear Track Detectors and their Applications**; Global Centre For Nuclear Energy Partnership (DAE, India); Disponível em: <http://www.barc.gov.in/publications/nl/2005/200506-2.pdf> (acessado 10/07/2012);

KATZ, A. R. (2010). **Health consequences of Chernobyl**; The New York Academy of Sciences publishes an antidote to the nuclear establishment's pseudo-science." International journal of health services: planning, administration, evaluation **40**(4): 679-698.)

KEVLES, B. H. ; **Naked to the bone: Medical Imaging in the Twentieth Century**; 3rd Edition; 1997; Rutgers University Press, New Brunswick, New Jersey; (pg. 89) 394 pgs.;

KHAN, H. A. AND KHAN, N. A. (1989); **Solid State Nuclear Track Detectors SSNTD: A useful Scientific tool for Basic and Applied Research**; Review Article; Journal of Islamic Academy of Sciences 2:4, 303 – 312, 1987;

KOTRAPPA, A. K. P; **E-perm® passive integrating electret ionization chambers for measuring radon in air, thoron in air, radon in water and radon flux from surfaces/building materials**; Radon in the Living Environment, 19-23 April 1999, Athens, Greece; Disponível em: http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/Radon1999/007.pdf (acessado em: 25/09/12);

KUMAR, N.; JUNEJA, J. K.; **Unit XVII: Atomic Nucleus**; (2007); Comprehensive Objective Physics, Vol 1; pg. 723 – 800; Golden Bells, 94-B New Dehli, Near Hindi Park, Daryaganj, 110002; 876 pp.;

LENTECH; **Water Treatment Solutions Uranium**; Disponível em: <<http://www.lenntech.com/periodic/elements/u.htm> > 2012. (acessado em: 06/10/2012);

LUIS NASSIF ONLINE; **O caso CNEN por Sérgio Rezende**; datado de 01 de Abril de 2011; Disponível em: <http://www.advivo.com.br/blog/luisnassif/o-caso-cnem-por-sergio-rezende> (acessado em 29 /11/2012);

MATOS, E. C. de ; SILVA, J. R. de A., RUBINI, L. A.; **Província de Lagoa Real – Garantia de Fornecimento de Concentrado de Urânio (DUA) Para As Necessidades Brasileiras**; 2003; Revista de Geologia; Vol 16, N°. 2, 111 – 120, 2003, pg. 111.

MATOS, E. C.; RUBINI, L. A, **Reservas Brasileiras de Urânio e sua Capacidade de Atendimento à Demanda Interna**; 2000; VII Congresso Geral de Energia Nuclear (Proc. Conf., Belo Horizontes, 1999) pg. 1; Ano 2000, Biblioteca do Instituto de Pesquisas Nucleares – IPEN;

MCPHERSON, M. J., **Part Three; Chapter 13: Radiation and Radon Gas** (1993); Chapman & Hall (1993); Disponível em: <www.mvsengineering.com/filelibrary/file_16.pdf>; (acessado em: 06/09/2012);

MINISTÉRIO DA SAÚDE; **Diretrizes para a vigilância do câncer relacionado ao trabalho**; Instituto Nacional do Câncer José Carlos Gomes da Silva (INCA); http://www1.inca.gov.br/inca/Arquivos/diretrizes_cancer_ocupa.pdf Disponível em: (acessado em 29/03/2013);

MORAES, M. A. P. V. de (1982); **Deteção de Radônio em solos por meio da Técnica de Detectores Traços Nucleares de Estado Sólido**; Tese de Mestrado; Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. Acesso: <http://www.barc.gov.in/publications/nl/2005/200506-2.pdf> (acessado: 15/07/2012);

NAGDA, N. L. (Ed.)(1994); **Radon: Prevalence, Measurements, Health Risks and Control**; Health Effects of Radon by SAMET, J. M.; pg. 33; ASTM Manual Series;

NATIONAL ACADEMY PRESS – NAP; **Health Effects of Exposure to Radon: BIER VI** (1999); 3 Models and Risk Projections ; Disponível em: www.nsp.edu/openbook.php?record_id=5499&page=69 (acessado em 22/12/2012);

NATIONAL AERONAUTIC SPACE ADMINISTRATION – NASA (2002); **An interdisciplinary Guide on Radiation and Human Space Flight; Module 1: The Radiation Challenge**; Disponível em: http://www.nasa.gov/pdf/284273main_Radiation_HS_Mod1.pdf(acessado em 07 /11/2012);

NATIONAL CANCER INSTITUTE –NCI, **Fact Sheet: Radon and Cancer Active**, 2011; National Institute of Health;; Acesso: <http://www.cancer.gov/cancertopics/factsheet/Risk/radon> (acessado em 14/10/2012);

NICKEZIC, D. AND YU, K. N. (2004); **Formation and growth of tracks on nuclear track materials**; Material Science and Engineering *R46 2004 (51 – 123)*; Reports: A Review Journal;Disponível em: www.elsevier.com/locate/mser (acessado: 10/07/2012);

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC; **Multiple Chemical Sensitivities; Addendum to Biologic Markers**; pg.175; Board on

Environmental Studies and Toxicology Commission on Life Sciences; The National Academy Press; (1992); Washington, D.C.;200 pp.; acesso: http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=1988#toc (acessado em: 31/01/2013);

OCCUPATIONAL SAFETY & ADMINISTRATION – OSHA; United States DEPARTMENT of Labor; **Radon in Workplace Atmospheres**; Disponível em: www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id208/id208.html (acessado em 28/12/2011);

OTTON, J. K., GUNDERSEN, L. C. S., SCHUMAN, R.R., (1995); **The Geology of Radon**; U. S. Department of Interior; U.S. Geology; United States Geological Service; Disponível em: <http://energy.cr.usgs.gov/radon/georadon.html> ; (acessado em: 18/09/2012);

OXFORD DICTIONARIES: **Definition of Isotopes**; Disponível em: <http://oxforddictionaries.com/definition/english/isotope> (acessado em: 24 /11/2012);

PAGE L.;STOCKING H. E. ; SMITH H. B.; **Techniques for prospecting for Uranium and Thorium**; United States Geological Survey – USGS; Contributions to the Geology of Uranium and Thorium by the United States Geological Survey and the Atomic Energy for the United Nations Conference on Peaceful Use of Atomic Energy; United States Government Printing Office; 1955;

PAINEL DE CIENCIAS DO ESPAÇO; (2013); Comprimento de onda; Acesso: <http://astroterrestrial.wordpress.com/> (acessado em: 14/05/2013);

PETROBRÁS: **Refinaria Landulpho Alves completa 60 anos**; Notícias: Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/noticias/refinaria-landulpho-alves-completa-60-anos/> (acessado em 28/12/2012);

PEZZATO, M. M.; **Relatório técnico de avaliação dos resultados das análises de radioatividade em águas da região de Caetité, Lagoa Real e Livramento de Nossa Senhora**; Programa Monitora - Água para todos; Agosto de 2012, Produto 3; TDR nº 2 Contrato 110100; Disponível em: <http://www.iica.int/Esp/regiones/sur/brasil/Lists/DocumentosTecnicosAbertos/Attachments/330/Maura%20M%20Pezzato%20-%20110100%20-%20ING%20C3%81%20-%20p3.pdf> (acessado em 30 /11/2012);

PREMIER RADON TESTING AND MITIGATION; (2012); **How Radon Enter a House**; Disponível em: <http://premierradon.net/what-is-radon/how-radon-enters-a-home/> (acessado em 30/09/2012);

PRISE, K. M.; FOLKARD, M.; MICHAEL, B. D.;(2002); **Experimental Studies of Bystander responses: Challenging fundamental mechanisms**; 4th International Conference on Health effects of low level radiation, British Nuclear Energy Society, BNES 2002; Gray Cancer Center.pg 11;

PYO H. Y., KIM, J. Y., LEE, M. H., PARK, Y. J., JEE, K. W., and KIM, W. H., (2005); **Preliminary studies on the alpha track analysis of spherical uranium particles**; Nuclear Engineering and Technology, Vol. 38, No. 4 June 2006.

RADELEC; **How E-PERMs® Work**; Rad Elec Inc. ;Disponível em:

www.radelec.com (acessado em 28/12/2011);

RADONSEAL; **Lung Cancer Risks from Radon: The annual death toll of radon in homes**; 2012; Disponível em: <www.radonseal.com/radon-health-risks.htm> 2012 (acessado em: 09/09/12);

RAKUŠA, A.(2006); **Polymer Charged Particle Detectors** :Seminar in the University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics; Disponível em: http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2005_2006/seminar_ang.pdf

(acessado em: 12/08/2012);

RUSSIAN CHEMICAL REVIEWS –;RCR (1981) ; Volume 50,pg 15; Collaborators: Chemical Society (Great Britain), Turpion Limited; Institute of Physics (Great Britain);Editora Chemical Society; 614 pp.;

ROGERS, N (Ed.), Blake, S., Burton, K., Harris, N., Parkinson, I., Rogers, N.,Widdowson, M.; (2007); **An Introduction to our Dynamic Planet**; pg.54; Cambridge University Press, The Edinburg Building, CB2 8RU, UK; 398 pp.;

SANTOS, T. de O. , (2010); **Distribuição da Concentração de Radônio em Residências e Outras Construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH**; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – UFMG/BH, Departamento de Engenharia Nuclear;

SARANGI, A. K., (2000); **Uranium and its Measurement in Ore by Radiometric Method**; Uranium Corporation of India; Journal Mines, Metals and Fuels Annual Review; Disponível em: <http://www.ucil.gov.in/web/Papers-Sarangi/Uranium%20&%20its%20measurement.pdf> (acessado em 24/11/2012);

SCHMIDT, K.; KWERT, T. et al; **Radon in indoor spaces: an underestimated risk factor for lung cancer in the environmental medicine**; Dtsch Arztebl Int, v. 107, n. 11, pg. 181-186, 2010;

SHARMA B. K.; (2000); **Objective Question Bank in Chemistry; Elements of the Group 0** (IUPAC Group 18); pg. 1-351; Krishina Prakashan Media; ano 2000;

SPATIAL INFORMATION CLEARINGHOUSE – SIC (2013); Disponível em: <http://maic.jmu.edu/sic/rs/ems.htm> (acessado em 17/01/2013);

SINGH, A. K. ; KHAN, A. J. ; PRASAD, R. ; **Study of radon concentrations in oil refinery premises and city dwellings**; Institute of Physics Publishing: Journal of Radiological Protection: J. Radiol. Prot. 21 (2001) 163–170;

SMITH, K. P. ; **An overview of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the Petroleum Industry**; Environmental Assessment and Information Science Division ; Argonne National Laboratory ; ANL/EAIS-7 ; December, 1992; Disponível em:: www.evs.anl.gov/pub/doc/ANL_EAIS_7.pdf (acessado em 28/12/2012);

SOUZA, J. S. de; (2008); **Mapeamento Geológico da Área do Farol da Barra – Salvador, Bahia, Brasil**; Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação Bacharelado em Geologia; Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia; Disponível em: http://www.twiki.ufba.br/twiki/pub/IGeo/GeolMono20081/jailma_souza_2008.pdf (acessado em 23/01/2013);

SOVACOOOL, B. K.; **Contesting the Future of Nuclear Power: A Critical Global Assesment of Atomic Energy**; World Scientific Publishing Company ; 5 de Maio de 2011; pg. 13 – 14 (308 pgs); ISBN-10: 981432275X; ISBN-13: 978-9814322751;

SPENCER, J. E. ; (1992); **Radon Gas: A Geological Hazard in Arizona**; Arizona Geological Survey; pg. 4; Disponível em: <http://www.azgs.az.gov/HomeOwners-OCR/radongasinarizona.pdf> (acessado: 31/01/2013);

STUDENT RESOURCES FOR GENERAL CHEMISTRY – SRGC; (2011); **Nuclear Stability**; Gen Chem Textbook; Disponível em:chemed.chem.wisc.edu/chempaths/GenChem-Textbook/Nuclear-Stability-748.html ; (acessado em 24/03/2011);

STREFFER, C.; BOLT, H.; FOLLESDAL, D; HALL, P; HENGSTLER, J. G.; JACOB, P.; OUGHTON, D.; PREB, K.; REHBINDER, E.; SWATON, E. and MADER, K.; **Low Dose Exposure in the Environment: Dose Effect Relation and Risk Evaluation (Ethics of Science and Technology Assesment)** pg. 273; (v. 23) series, Ethics of Science and Technology Assessment; June 2004, Springer, 1 Edition 492 pgs.

THE ARTS, SCIENCES AND MEDICINE – TASM; Disponível em: <http://jedismedicine.blogspot.com.br/2011/04/radiation-and-humanity.html> (acessado em 07/10/2012);

TAYLOR, D. M.; TAYLOR, S. K.; **Environmental uranium and human health**; Rev Environ Health, v. 12, n. 3, p. 147-57, Jul-Sep 1997.

TELES, D. R. S.; AZEVEDO, A. E. G. ; SANTOS, C. P. L. ;(2010); **Caracterização isotópica de águas de formação hipersalinas de um campo de petróleo da Bacia do Recôncavo, Brasil**; Revista Brasileira de Geofísica; vol 28 N° 2, São Pulo; Acesso: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2010000200012> (acessado em: 18/10/12);

TELFORD, T. ; **Health Effects of Low Radiation**; Proceedings of the 4th International Conference Society for Radiological Protection British Nuclear Energy Society; (2002); pg.3; formato: CD-Rom; ISBN: 9780727732019;

THE CHEMISTRY WIKI; **Radon**; Acesso: <http://chemistry.wikia.com/wiki/Radon> (acessado em: 10/10/12);

TIRMARCHE, M. et al.; **Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon**; Ann ICRP, v. 40, n. 1, p. 1-64, Feb 2010.;

TRIBUNA DO NORTE– TN (2011), **Pesquisadores debatem dobre efeito do gás radônio à saúde**; 29 de Setembro de 2011; Disponível em: <http://tribunadonorte.com.br/noticia/pesquisadores-debatem-sobre-efeitos-do-gas-radonio-a-saude/232795> (acessado em: 23/01/2013);

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION – UNSCEAR ; **Exposure to radon and thoron and their decay products**; Disponível em: www.unscear.org/doc/reports/1982/1982-D_unscear.pdf (acessado em: 11/04/2012);

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION – UNSCEAR ; **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation**; Report to General Assembly, with Scientific Annexes, United Nations, New York, 1988;

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION – UNSCEAR ; **Frequently Asked Questions**; Disponível em: <http://www.unscear.org/unscear/en/faq.html> (acessado em 27/10/2012);

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION – UNSCEAR ; **Exposure to radon and thoron and their decay products** ;Disponível em: www.unscear.org/doc/reports/1982/1982-D_unscear.pdf (acessado em 28/12/2012);

UNITED STATES CONGRES COMMITTEE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY; (1997); **Residential radon contamination and indoor quality research needs**; A hearing before the Subcommittee on Natural Resources, Agriculture Research, and Environment of the Committee on

Science and Technology, U.S. House of Representatives, Ninety-ninth Congress, second session, September 17 ..., Volume 4;

VCU – VIRGINIA COMMONWEALTH UNIVERSITY, Office of Environmental Safety, Radiation Safety Section; Instruction Concerning from Occupational Radiation Exposure; Disponível em: <http://www.vcu.edu/oehs/radiation/risk.PDF> (acessado em 27/10/2012);

VENTER, A. J. (2007); **Allah's Bomb: The Islamic Quest for Nuclear Weapons**; pg.21; Lyon Press; first edition February 1, 2007); 336 pp.;

VILASBOAS, Z.; *Mineração do urânio em Caetité/BA: os custos socioambientais da energia nuclear*; 2008; Disponível em: www.ecodebate.com.br/2008/11/05 > (acessado em: 09/06/ 2012);

WAHL, L. E.; **Environmental Radiation Fact Sheet**; Lawrence Berkeley National Laboratory; HPS – Health Physics Society Specialist in Radiation Safety Adopted on January 2010 ; Acesso: http://hps.org/documents/environmental_radiation_fact_sheet.pdf (acessado em 27 /10/2012);

WARE, W. R.; **Low-Dose Radiation Exposure and Risk of Cancer**; (200?); International Health News; Emeritus Professor of Chemistry; University of Ontario, CA; Disponível em: http://www.yourhealthbase.com/radiation_and_cancer_risk.htm (acessado em 07 /11/2012);

WARREN, N; **The Manhattan Project**: pg. 250; Secondary Source Investigation; Excel HSC Physics; Viviane Petris Joanou/Pascal Press, (2008) 368 pp;

WEINBERG COLLEGE OF NATURAL SCIENCES – WCNS (2013); *Natural Radioactivity*; North Western University Disponível em :<http://faculty.wcas.northwestern.edu/~infocom/Ideas/radioactivity.pdf> (acessado em 14/01/2013);

WORLD HEALTH ORGANIZATION–WHO (2011); **Environmental and occupational cancer**; Fact sheet N°350, Março 2011; Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs350/en/index.html> (acessado em 19/02/2013);

WIKIPEDIA (2013); **Exponential decay**; Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Mean_lifetime#Mean_lifetime (acessado: 03/03/2013);

WIKIPÉDIA, (2013); **Mapa mostrando os principais municípios da Região Metropolitana de Salvador**; 2013; Disponível em: pt.wikipedia.org (acessado em 13/01/2013);

WORKING LEVEL AND WORKING LEVEL MONTH – WL&WLM; Disponível em : www.ma.texas.edu/users/mks/RA/radondecay.pdf (acessado

em 22/12/2012);

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION – WNA; **Nuclear Radiation and Health Effects**; (2013) ; Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/inf05.html> (aessado em 20/01/13);

WORLD NUCLEAR NEWS –WNN (2012); **Nuclear Radiation and Health Effects**; Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/inf05.html> (aessado em 25 /10/ 2012);

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO (2009); **Radon and Cancer**; Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/index.html> (aessado em 27/01/2013);

YABLOKOV, A.V. et al. ;(2007); **Chapter 7: Mortality after Chernobyl Catastrophe**;Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for people and Environment; Blackwell Publishing; (pgs 192 – 215) 400 pp.;

ZÁVODSKÁ, L.; KOSRÍNOVA, E; LESNY, J.; BODIS, J.; **Environmental Chemistry of Uranium**; Faculty of Natural Sciences, Comenius University in Bratislava, Mylinska dolina 842 15 Bratislava 4, Slovakia, 2000?; e-mail zavodskalucia-centrum@centrum.sk , HU ISSN 1418-7108, HEJ, Manuscript ENV 081221-A; Disponível em: <<http://heja.szif.hu/ENV/ENV-081221-A/env081221a.pdf> > aessado em 08/06/2012);

ANEXO A – Transcrição da comunicação sobre a publicação do livro “Questões Ambientais em Saúde Coletiva

Pessoal,

Segue as referencias do livro para colocar no lattes de voces e sair como publicação deste ano para a produção do PPGSAT. Marina ainda nao enviou a versão do prelo. Assim que enviar, re-envio a voces.

Livro - Questões ambientais em saúde Coletiva publicação em 2012

Marina Atanaka-Santos, Marta Gislene Pignatti e André Loureiro Chaves

cap 9 Urânio, radônio e riscos à Saúde Humana

Adelson Silva de Brito; Rita de Cássia Franco Rego pg 183 a 214

cap 5 Direito Ambiental do Trabalho e o Meio Ambiente de trabalho saudável

Ingrid Gil Sales; Rita De Cássia Franco Rêgo; Paulo Gilvane Lopes Pena

Pg 96 a 118

Rita de Cássia Franco Rêgo (ritarego1@gmail.com) 71-86291498

<http://lattes.cnpq.br/5517049040421871>

Professora do Mestrado em Saúde Ambiente e Trabalho (<http://www.sat.ufba.br/>)

Professora Associada I - Faculdade de Medicina da Bahia FMB - UFBA

Faculdade de Medicina da Bahia - Praça XV de Novembro - s/n, Largo do Terreiro de Jesus, Centro Histórico, Salvador, CEP 40025-010, Bahia, Brasil

Tel: [+55 71 3283-5573](tel:+557132835573) / 3283-5572

Fax: [+55 71 3283-5573](tel:+557132835573) Cel - [+55 71 88737412](tel:+557188737412)

ANEXO B – Declaração relativa ao registro ISBN do livro “Questões Ambientais em Saúde Coletiva”



Universidade Federal do Mato Grosso
Editora Universitária
Diversidade de conhecimento para você



Avenida Fernando Corrêa da Costa, 2.367. Boa Esperança. Cuiabá/MT. CEP: 78060-900.
Fone: (65) 3615-8322. Fax: (65) 3615-8325. www.editora.ufmt.br ou edufmt@hotmail.com

Declaração

Declaro para os devidos fins e efeitos legais que a obra “*Questões ambientais em Saúde Coletiva*”, de autoria de Marina Atanaka-Santos, Marta Gislene Pignatti e André Loureiro Chaves, encontra no prelo, em fase de produção editorial, tendo ISBN designado de número 978-85-327-0469-6.

Cuiabá, 07 de dezembro de 2012.


Marinaldo Divino Ribeiro
Coordenador da EdUFMT
Portaria GR N.º. 959/12

ANEXO C – Certificado de participação como autor principal e apresentador de Trabalho no XXX Encontro de Físicos do Norte e Nordeste: “Medição de concentrações de radônio nas proximidades da Refinaria de Petróleo Landulpho Alves – RLAM”





XXX Encontro de Físicos do Norte e Nordeste

Salvador - BA - Brasil - 05 a 09 de novembro de 2012

CERTIFICADO

O Comitê Organizador certifica que ADELSON SILVA DE BRITO participou do XXX Encontro de Físicos do Norte e Nordeste realizado de 05 a 09 de novembro de 2012 em Salvador, BA, Brasil.

Salvador, 09 de novembro de 2012.

ID:196

Roberto Andrade
Roberto Fernandes Silva Andrade
Coordenador Geral do Evento



ANEXO D – Certificado de participação no “International Nuclear Atlantic Conference”, – 2011. Belo Horizonte, MG.

