UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

JANINE NICOLOSI CORRÊA

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM AMBIENTES E ÁGUAS DE POÇOS NO ESTADO DO PARANÁ

Tese de Doutorado

CURITIBA 2011 JANINE NICOLOSI CORRÊA

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM AMBIENTES E ÁGUAS DE POÇOS NO ESTADO DO PARANÁ

Tese de Doutorado

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Reuters Schelin. Coorientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk

Publicação

Dados Internacionais de Catalogação na

C824 Corrêa, Janine Nicolosi Avaliação dos níveis de concentração de radônio em ambientes e águas de poços no estado do Paraná / Janine Nicolosi Corrêa. — 2011. 111 f. : il. ; 30 cm
Orientador: Hugo Reuters Schelin. Coorientador: Sergei Anatolyevich Paschuk. Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pósgraduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2011. Bibliografia: f. 72-76.
1. Radon. 2. Radiação ionizante. 3. Radioisótopos. 4. Águas subterrâneas – Paraná – Análise. 5. Ar – Análise. 6. Detectores de radiação nuclear. 7. Engenharia elétrica – Teses. I. Schelin, Hugo Reuters, orient. II. Paschuk, Sergei Anatolyevich, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Campus Curitiba

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ Campus Curitiba



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

Título da Tese Nº. 68

"Avaliação dos Níveis de Concentração de Radônio em Ambientes e Águas de Poços no Estado do Paraná"

por

Janine Nicolosi Corrêa

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor EM CIÊNCIAS - Área de Concentração: Engenharia Biomédica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Campus Curitiba, às 14h do dia 24 de agosto de 2011. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

2/2

Prof. Hugo Reuters Schelin, Dr. (Presidente - UTFPR)

Prof. Vanderley de Vasconcelos, Dr. (CDTN/CNEN)

Prof. Joaquim Teixeira de Assis, Dr

(UERJ)

Prof. Valeriy Denyak, Dr. (UTFPR)

(UTFPR)

Prof. Adalberto Matoski, Dr.

Visto da coordenação:

Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr. (Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Ao CPGEI, pelo curso ofertado e pelo suporte a este trabalho.

À CNEN, pelo suporte financeiro em forma de bolsa de pesquisa.

Ao CDTN, pela cooperação e disponibilidade da tecnologia.

À Fundação Araucária, pelo apoio em forma de projeto de pesquisa.

Ao professor Hugo (UTFPR), pela orientação cuidadosa e precisa.

Ao professor Sergei (UTFPR), pelo apoio e coorientação.

Ao professor Zildete Rocha, (CDTN/CNEN) por todas as informações e auxílio prestados.

Ao pesquisador Valeriy (UTFPR), pela ajuda fundamental nos cálculos.

Aos colegas Allan (UTFPR), Talita (CDTN/CNEN) e Jaqueline (UTFPR) pela ajuda no desenvolvimento do trabalho.

À minha família pelo incentivo.

Aos meus filhos e marido, pelo carinho e amor dedicados.

RESUMO

CORRÊA, Janine Nicolosi. Avaliação dos níveis de concentração de radônio em ambientes e águas de poços no estado do Paraná. 2011. 103 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

Tendo em vista o crescente interesse dos organismos internacionais e nacionais em se conhecer os níveis de radônio no ar, em águas, principalmente em poços, e a escassez destes dados em esfera nacional, o grupo de pesquisa em radiações da UTFPR, em colaboração com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN / CNEN) e com o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD / CNEN) tem mantido uma parceria onde se realizam medidas de radônio no ar, solos e águas. Estas medidas têm sido feitas pelo grupo desde 2003 e o laboratório especializou-se em medidas no ar, por meio de detectores do estado sólido e em solo e água, por meio de equipamento eletrônico de medidas instantâneas. O objetivo desta tese é avaliar a os níveis de concentração de radônio ²²²Rn em residências e postos de trabalho (indoor) no estado do Paraná, mais especificamente na região metropolitana de Curitiba e verificar os níveis de concentração de ²²²Rn em águas de poços desta região. O trabalho apresenta os resultados das concentrações de ²²²Rn em ambientes residenciais, postos de trabalho e em águas de poços da região. As medidas indoor foram feitas por meio de detectores do estado sólido CR-39. A densidade de traços por cm² para cada detector foi determinada. Os cálculos das concentrações de ²²²Rn nos ambientes foram feitos a partir de metodologia de calibração do sistema detector, desenvolvida especificamente para estas medidas. O trabalho de calibração foi desenvolvido em conjunto com o CDTN a partir de irradiações feitas no National Institute of Radiological Sciences (NIRS). As concentrações de ²²²Rn nas residências ficaram, na sua maioria, abaixo de 100 Bq/m³, com apenas um caso onde a concentração ficou entre 200 e 400 Bq/m³. Com relação aos postos de trabalho, todas as medidas de concentração de ²²²Rn ficaram abaixo de 100 Bq/m³. As concentrações de ²²²Rn nas amostras das águas de poços foram medidas, em intervalos de cerca de quatro dias, por meio do monitor de radônio AlphaGUARD PQ2000 PRO. Os cálculos das concentrações de atividade iniciais de radônio na água foram feitos a partir da curva de decaimento do ²²²Rn e do equilíbrio secular entre o ²²²Rn e o ²²⁶Ra, observados depois de 30 dias. Os resultados indicaram que cerca de 70% dos valores das concentrações de ²²²Rn ficaram acima do valor recomendado pela USEPA, de 11,1 Bq/L, representando risco radiológico causado por este radionuclídeo.

Palavras-chave: Radônio, ²²²Rn, radionuclídeos, radiações ionizantes, CR-39, águas de poços, medidas *indoor*, SSNTD.

ABSTRACT

CORRÊA, Janine Nicolosi. Evaluation of Radon Concentration in Dwellings and Well water of Paraná State-Brazil. 2011. 103 p. Tese –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

Considering the growing interest of International Agencies and national Governmental organs in studies and measurements of radon activity in air, soil gas and ground water (mainly from artesian wells) as well as scarceness of such measurements at Brazilian territory, present studies were initiated by the Laboratory of Applied Nuclear Physics of Federal University of Technology – Paraná (UTFPR) in collaboration with the Institute of Radiation Protection and Dosimetry (IRD) and the Center of Nuclear Technology Development (CDTN) of Brazilian Commission on Nuclear Energy (CNEN). This Collaboration started in 2003. Radon monitoring program is based mainly on use of Solid State Nuclear Track Detectors for radon activity measurements in air. Continuous electronic radon detectors are used for radon measurements in soil gas and water. Current work presents the results of indoor ²²²Rn activity of dwellings and working places of Curitiba-PR and radon concentration in ground water samples from artesian wells from aquifers of the same area. The indoor measurements of radon activity were performed using Solid State Nuclear Track Detectors CR-39. After the exposition, CR-39 detectors were submitted to chemical development which permitted to make alpha particle tracks counting. The results of calibration of CR-39 together with efficiency of used exhalation chambers as well as alpha particle tracks chemical development procedure were performed in cooperation with CDTN and collaboration with the National Institute of Radiological Sciences (NIRS). The major part of indoor ²²²Rn concentration in residences was found below 100 Bq/m³. In the case of working places, all measurements present ²²²Rn concentration bellow 100 Bq/m³. The studies of radon activity in water were performed using the samples of water from artesian wells submitted to recursive measurements by instant radon detector AlphaGUARD PQ2000 PRO during few weeks with intervals of about 4 days between each measurement approximately. The calculations of initial radon activity in water were done considering the ²²²Rn decay correction as well as equilibrium level of ²²²Rn and ²²⁶Ra observed after 30 days of measurements. Obtained results show that about 70% measured activity levels of ²²²Rn are higher than recommended value of 11.1 Bq/L which represent the risk for the human health associated with this radionuclide.

Keywords: Radon; ²²²Rn, ionizing radiation, well water, CR-39, indoor measurements, SSNTD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição da contribuição das fontes de radiação para a dose média anual	. 12
Figura 2 – Informações sobre o ²²² Rn da carta de nuclídeos (NNDC, 2011)	. 23
Figura 3 - Séries radioativas naturais (NNDC, 2011)	. 24
Figura 4 – Estado do Paraná / Região Metropolitana de Curitiba	. 43
Figura 5 – Câmara de difusão utilizada nas tomadas de dados	. 45
Figura 6 – Imagem do detector CR-39	. 45
Figura 7 – Foto de câmara/detector em ponto de monitoração	. 47
Figura 8 – Imagem de microscópio de um detector CR-39 após revelação	. 48
Figura 9 – Imagem de microscópio de um detector CR-39 após revelação	. 51
Figura 10 - Equipamento AlphaGUARD em medida de radônio em água	. 52
Figura 11 - Interface gráfica do software DataEXPERT	. 54
Figura 12 - Gráfico de frequência para as medidas de ²²² Rn em residências	. 60
Figura 13 - Gráfico de frequência para as medidas de ²²² Rn em postos de trabalho	. 62
Figura 14 – Concentração de ²²² Rn e ²²⁶ Ra para o poço 4	. 64
Figura 15 – Imagem do poço do estudo de caso	. 67
Figura 16 - Esquema do sistema de mitigação implementado em residência em Curitiba.	. 68
Figura 17 - Carta geológica do Paraná (formação Guabirotuba e outras)	. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fator de Qualidade (adaptada de Cember, 1983)	19
Tabela 2 - Série do urânio - Dados do National Nuclear Data Center (NNDC, 2011)	22
Tabela 3 - Série do tório - Dados do National Nuclear Data Center (NNDC, 2011)	22
Tabela 4 - Série do actínio - Dados do National Nuclear Data Center (NNDC, 2011)	23
Tabela 5 - Valores de concentração de radônio em águas de alguns locais do Brasil	31
Tabela 6 - Concentrações de radônio indoor em países da OECD (WHO, 2009)	35
Tabela 7 - Concentrações de radônio indoor (UNSCEAR, 2006)	36
Tabela 8 - Valores de concentração de radônio indoor em algumas regiões do Brasil	40
Tabela 9 – Concentrações de ²²² Rn nas residências	57
Tabela 10 – Concentrações de ²²² Rn nos postos de trabalho	61
Tabela 11 – Resultados das concentrações de ²²² Rn e ²²⁶ Ra nos poços	65
Tabela 12 - Concentrações de radônio em três pontos do sistema de mitigação	68
Tabela 13 - Concentração de radônio indoor e em águas de poços no mesmo local	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 MOTIVAÇÕES	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivos gerais	14
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 ESTRUTURA DA TESE	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Conceitos gerais	16
2.1.1 Atividade e suas unidades	16
2.1.2 Decaimento radioativo e meia-vida	16
2.1.3 Faixas de energia	18
2.1.4 Dose	19
2.1.5 Níveis de exposição	20
2.1.6 Efeitos biológicos da radiação	20
2.2 Radioatividade natural	21
2.3 Radônio	26
2.3.1 Radônio em águas subterrâneas	29
2.3.2 Radônio no solo	32
2.3.3 Radônio em ambientes internos (indoor)	33
2.3.4 Métodos para redução da concentração de radônio em ambientes internos	40
2.3.5 Resumo sobre o ²²² Rn	41
3 METODOLOGIA	42
3.1 Classificação e delimitação da pesquisa	42
3.2 Materiais e métodos	44
3.2.1 Exposição indoor	44
3.2.1.1 Câmaras de difusão	44
3.2.1.2 Detectores	45
3.2.1.3 Método de exposição dos detectores para medidas <i>indoor</i>	46
3.2.1.4 Revelação dos detectores CR-39	47
3.2.1.5 Contagem dos traços	49

3.2.1.6 Eficiência do sistema de detecção	49
3.2.2 Níveis de concentração de ²²² Rn em águas de poços da região de Curitiba	50
3.2.2.1 O medidor instantâneo AlphaGUARD para medidas em água	50
3.2.2.2 Método de coleta de amostras de água de poços	52
3.2.2.3 Medidas de radônio em água	53
3.2.2.4 Cálculo da concentração de radônio na água	54
3.2.2.5 Curva de decaimento do radônio e do rádio	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1 Exposição <i>indoor</i>	57
4.1.1 Cálculo da concentração de ²²² Rn <i>indoor</i>	57
4.1.2 Avaliação das concentrações com relação aos limites recomendados	62
4.1.3 Dose	63
4.2 Medidas em águas	63
4.2.1 Níveis de concentração de ²²² Rn e ²²⁶ Ra em águas de poços de Curitiba	63
4.2.2 Avaliação das concentrações com relação aos limites recomendados	66
4.2.3 Propostas de ações mitigatórias	66
4.2.3.1 Implementação de ação mitigatória para o uso de água de poço	66
4.3 Correlação entre as medidas <i>indoor</i> e dos poços de residências	69
4.4 Influência da geologia nas medidas de radônio	70
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES SOBRE RADÔNIO UTFPR	78
APÊNDICE B - ESTUDO PRELIMINAR DE REVELAÇÃO DO CR-39	82
APÊNDICE C - CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE DETECÇÃO DE RADÔNIO	83
APÊNDICE D - PROCEDIMENTO PRÁTICO PARA RADÔNIO EM ÁGUA	87
APÊNDICE E – GRÁFICOS DAS MEDIDAS DE ÁGUAS DE POÇOS	91
APÊNDICE F - PARECER RESIDÊNCIAS E PARECER EMPRESAS	107
APÊNDICE G – MAPA DE CONCENTRAÇÕES DE ²²² Rn <i>INDOOR</i>	111
APÊNDICE H - MAPA DE CONCENTRAÇÕES DE ²²² Rn EM ÁGUAS	112

1 INTRODUÇÃO

O radônio ²²²Rn é um gás radioativo, da série radioativa natural do urânio ²³⁸U, proveniente do decaimento do rádio ²²⁶Ra e, ao ser inalado, passa a ser um causador potencial do câncer de pulmão (ICRP, 1991; UNSCEAR, 2000).

Por ser um gás, o radônio produzido no interior das rochas e solos difunde-se com facilidade através de fissuras nas rochas, da porosidade do solo e de lençóis freáticos até alcançar a superfície terrestre. A meia-vida do ²²²Rn é de 3,8 dias, portanto, uma parte considerável do gás produzido chega diretamente do solo à atmosfera que também recebe o radônio que ficou diluído nas águas de superfície (ICRP, 1991; UNSCEAR, 2000; NEZNAL *et al.*, 1997; RAHMAN *et al.*, 2007; KUMAR *et al.*, 2008).

Estudos científicos feitos com mineiros desde o final do século XIX evidenciam claramente os resultados nocivos da inalação de radônio por trabalhadores das minas. A partir dos anos 70 constatou-se que a exposição ao radônio e seus produtos de decaimentos em residências poderia ser alta, e em alguns casos, similares às exposições experimentadas por mineiros (UNSCEAR, 2000).

O ser humano está continuamente exposto a radiações ionizantes de materiais naturalmente radioativos. A origem destes materiais é a crosta terrestre, mas são encontrados em materiais de construção, ar, água, alimentos e no corpo humano. Em todo o mundo, materiais de construção contendo materiais radioativos têm sido usados por gerações. Como os indivíduos permanecem mais de 80% do tempo em locais fechados, as radiações destes locais provocam situações de exposições prolongadas (ICRP, 2005).

Dados apresentados pelo ICRP 60 (1991) e pela UNSCEAR (2000), ilustrados na Figura 1, mostram que, em média, metade de toda radiação absorvida por um ser humano, incluindo as naturais e artificiais, é devida ao radônio.

Altas concentrações de radônio podem ocorrer em ambientes, principalmente em construções situadas em locais onde há alta taxa de exalação do gás do solo, representando risco potencial aos indivíduos que residem ou frequentam esses locais. Ambientes fechados e pouco ventilados merecem atenção especial, pois a concentração de ²²²Rn no interior de residências é cerca de 2 a 20 vezes maior do que a média da concentração no exterior (EISENBUD e GESELL, 1997).



Figura 1 – Distribuição da contribuição das fontes de radiação para a dose média anual (Adaptado de UNSCEAR, 2000)

O radônio contido em água e exalado dos materiais de construção pode contribuir para maior concentração no interior de uma construção, porém, na maioria dos casos, essa concentração é considerada muito pequena quando comparada com a quantidade do gás proveniente do solo sobre o qual a edificação foi construída (HULKA, *et al.*, 2008).

No entanto, altas concentrações de radônio na água podem levar a altas concentrações no ar, dependendo dos fatores que afetam a difusão do gás no ambiente. O radônio em águas domésticas causa exposição pela inalação do gás liberado desta água (COMMISSION RECOMMENDATION, 2001).

No caso da concentração em água, diferentemente da concentração no ar, não existe uma correlação direta entre a concentração e o risco, já que muitos outros fatores, como temperatura, modo e estágios de utilização da água influenciarão particularmente na difusão do radônio contido na água e, consequentemente, na sua influência na concentração no ambiente (EISENBUD e GESELL, 1997).

Desta forma, no interesse em se caracterizar os níveis de radônio em águas subterrâneas da região de Curitiba-PR e em ambientes de convívio humano desta região, e

ainda, observando a necessidade de se obter dados que auxiliem na compreensão da situação desta região com relação ao radônio, apresenta-se esta pesquisa.

1.1 MOTIVAÇÕES

Tendo em vista o crescente interesse dos organismos internacionais e nacionais em se conhecer os níveis de radônio no ar, em águas, principalmente em poços, e a escassez destes dados em esfera nacional, o grupo de pesquisa em radiações da UTFPR, em colaboração com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN / CNEN) e com o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD / CNEN) tem mantido uma parceria onde se realizam medidas de radônio no ar, solo e água.

Estas medidas têm sido feitas pelo grupo desde 2003 e o laboratório especializou-se em medidas de radônio no ar, por meio de detectores do estado sólido do tipo CR39 e em solo e água, por meio de equipamento eletrônico de medidas instantâneas AlphaGUARD.

O Laboratório de Física de Radiações Ionizantes da UTFPR dispõe aproximadamente 100 m², com bancadas de trabalho, com diversos detectores de raios X e de raios gama, detectores de traço tipo CR39, câmaras de difusão (fornecidas em cooperação pelo IRD-CNEN), câmaras herméticas para medidas de exalação de radônio pelos materiais de construção e solo, um medidor AlphaGUARD e um medidor RAD7 com acessórios voltados à medidas instantâneas de ²²²Rn.

Os estudos relacionados ao radônio iniciaram no ano de 2003 e ao longo deste período estabeleceu-se cooperação com o IRD-CNEN e com o CDTN-CNEN. Neste sentido, o laboratório iniciou medidas de radônio em residências, em ambientes construídos para verificação da exalação de materiais de construção, seguidos de medidas de radônio em água e atualmente iniciou medidas de radônio no solo.

Durante os anos de pesquisa o grupo de pesquisa teve dois projetos aprovados pela Fundação Araucária. O primeiro, já concluído intitula-se: "Avaliação da concentração de Rn-222 no ar em relação aos materiais de construção e solos do Estado do Paraná". O segundo, ainda em andamento intitula-se: "NORM: Contaminação pelo Rn-222 e seus filhos em materiais de construção, solo e água". Além disso, a pesquisa produzida pelo grupo no Laboratório de Radiações Ionizantes da UTFPR tem como resultados as publicações listadas no Apêndice A deste trabalho. Não existe um número de medidas de radônio no Paraná que permitam um mapeamento como é o caso de regiões ou países onde o problema é foco de pesquisa constante e existem dados que proporcionam análises estatísticas relevantes. Poucas medidas foram feitas no Paraná e, na literatura, não são encontrados valores típicos ou valores esperados sobre a concentração de radônio em água.

O solo do Paraná contém grande variedade de rochas graníticas, que contém urânio e tório em sua composição, o que pressupõe uma contribuição importante de radônio pelo fluxo difusivo do solo para a atmosfera. Além disso, o clima mais frio da região Sul rege um comportamento diferenciado nas residências, que costumam ter suas janelas fechadas durante a noite e grande parte do dia, o que representa uma possível maior concentração de radônio *indoor*.

A relação direta entre concentrações de radônio em ambientes e o desenvolvimento de câncer de pulmão é fato consolidado e amplamente divulgado pelos órgãos internacionais relacionados à saúde pública, às radiações ionizantes e com a física nuclear. É divulgado de forma ampla que o radônio e filhos são a segunda causa de câncer de pulmão, sendo que a principal causa é o cigarro. Trabalhos científicos mostram que estas duas causas associadas levam a um risco ainda maior (ICRP 60, 1991; UNSCEAR, 2000).

Portanto, o interesse no assunto deste trabalho está relacionado basicamente a três fatores: às pesquisas já consolidadas e outras em andamento no laboratório de radiações da UTFPR, onde há infraestrutura montada com equipamentos, materiais e pessoal relacionados à pesquisa sobre radônio; à necessidade em se obter dados sobre o radônio no Brasil, em particular nesta região do Paraná; e à relação desta pesquisa com questões de saúde pública evidenciadas pelo fato de o câncer de pulmão ter como causador importante o radônio, elemento foco desta pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Avaliar os níveis de concentração de radônio ²²²Rn em residências e postos de trabalho na região metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná e verificar os níveis de concentração de ²²²Rn em águas de poços desta região.

1.2.2 Objetivos específicos

Nesse projeto pretende-se especificamente:

- Determinar as prováveis relações entre as atividades de ²²²Rn encontrada nas residências e nas águas dos poços.
- Buscar correlações entre as concentrações encontradas e a geologia da região.
- Propor soluções para mitigação com relação aos níveis de concentração de radônio em residências.
- Elaborar e qualificar metodologias para medidas de concentrações de radônio no ar e na água.
- Contribuir para um programa nacional de radônio.
- Fazer estudo de caso com medidas preventivas e mitigadoras específicas.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O capítulo 1 apresenta a introdução, onde o tema do trabalho é apresentado em linhas gerais, os objetivos gerais e específicos, divididos de forma que os específicos fazem parte integralmente dos gerais e as motivações, onde são colocados os fatos que serviram de estímulo para o desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teoria do trabalho, onde assuntos de conhecimento da comunidade científica desta área de pesquisa foram apresentados em linhas gerais e assuntos específicos desta tese foram apresentados de forma mais detalhada.

O capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa, onde se expõe a classificação da mesma, as limitações pertinentes e os materiais e métodos utilizados.

O capítulo 4 apresenta os resultados, sua análise e faz a discussão sobre os mesmos, tendo como base o referencial teórico.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho observando sua correlação com os objetivos propostos.

Ao final do trabalho são mostradas as referências e em seguida os apêndices com as publicações, detalhes técnicos da pesquisa e resultados em forma de mapas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos gerais

O conteúdo deste item tem como base conceitos de física nuclear consagrados pela literatura científica da qual, especificamente, utilizou-se dos conceitos explicitados por Heyde (1999).

2.1.1 Atividade e suas unidades

A atividade é a taxa de transformações nucleares. As emissões de radiação são feitas de modo imprevisto e não se pode saber o momento exato em que um determinado núcleo irá emitir radiação. Entretanto, para a grande quantidade de átomos existente em uma amostra, é razoável esperar-se certo número de emissões ou transformações em cada segundo. Essa taxa de transformações é denominada atividade da amostra.

A atividade de uma amostra com átomos radioativos (ou fonte radioativa) usualmente pode ser medida em Bq (Becquerel), unidade do SI, que é igual a uma desintegração por segundo ou Ci (Curie), que é igual a $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

É possível notar que as unidades mencionadas acima não envolvem a quantidade de massa ou volume nos quais as transformações ocorrem. A concentração de radioatividade ou a relação entre a massa de material radioativo e a atividade é chamada atividade específica e pode ser descrita como o número de Bq ou Ci por unidade de massa ou de volume.

2.1.2 Decaimento radioativo e meia-vida

Quando um núcleo sofre decaimento radioativo ou desintegração radioativa há emissões de vários tipos. A velocidade de desintegração radioativa varia muito entre os isótopos radioativos, existindo uma probabilidade para cada um emitir certo tipo de radiação, ou se desintegrar, característica desse isótopo. Esta probabilidade é chamada Constante de Desintegração ou Constante Radioativa, sendo representada pelo símbolo λ .

Como mostram as Equações 2.1 e 2.2, a velocidade de desintegração depende não só do número de átomos do isótopo radioativo presente na amostra N, mas também da constante radioativa λ , ou seja:

$$dN = -\lambda N dt$$
 Eq. 2.1

Assim, aplicando-se as condições de contorno, sendo $N = N_o$ no instante t = 0 e integrando-se, obtém-se a Equação 2.2:

$$N = N_a \exp(-\lambda t)$$
 Eq. 2.2

sendo esta a expressão da Lei da Desintegração Radioativa, que mostra que o número de átomos de um radionuclídeo diminui exponencialmente com o tempo.

A atividade A de uma fonte radioativa, no tempo t, é expressa pela Equação 2.3:

$$A = A_o \exp(-\lambda t)$$
 Eq. 2.3

uma vez que $A = \lambda N$ e $A_o = \lambda N_o$, ou seja, $A / A_o = N / N_o$.

A meia-vida de um isótopo radioativo, $t_{1/2}$, é o tempo necessário para que metade dos átomos contidos numa amostra desse isótopo sofra desintegração, ou seja, é o tempo necessário para que N seja igual a $N_o/2$.

A relação matemática existente entre λ e $t_{1/2}$ pode ser obtida substituindo-se, na equação 2.2, N por $N_o/2$ e t por $t_{1/2}$, obtendo-se a Equação 2.4 e, consequentemente, a Equação 2.5.

$$N_o / 2 = N_o \exp(-\lambda t_{1/2})$$
 Eq. 2.4

Assim,

$$1/2 = \exp(-\lambda t_{1/2}) \rightarrow \ln 1/2 = -\lambda t_{1/2}$$

Logo

$$\lambda t_{1/2} = -\ln 1/2 = \ln 1 - (-\ln 2)$$

Ou seja,

$$\lambda = \ln 2 / t_{1/2} \qquad \qquad \text{Eq. 2.5}$$

Portanto, a meia-vida de um radioisótopo pode ser calculada a partir da constante de desintegração e vice-versa. No caso das meias-vidas das fontes naturais de partículas alfa, estas variam de aproximadamente 10^{-5} s a 10^{10} anos.

2.1.3 Faixas de energia

A energia liberada no processo de desintegração corresponde à origina-se da diferença de massa existente entre o núcleo pai e os produtos de desintegração. As partículas alfa são emitidas como energias discretas e características do núcleo pai. Isto ocorre pelo fato de o núcleo atômico possuir níveis de energia característicos e discretos.

As energias das partículas α das fontes radioativas naturais variam de aproximadamente 4 a 7 MeV. Em geral, quanto menor a energia de emissão de uma partícula, mais longa a meia-vida.

As partículas alfa são as radiações de menor poder de penetração. No ar, mesmo as partículas alfa mais energéticas, percorrem somente alguns centímetros, enquanto no tecido humano, a penetração é na ordem de micrometro (1µm). Devido ao fato de as partículas alfa serem essencialmente monoenergéticas, o aumento da espessura da camada de absorção serve para reduzir a energia das partículas que a perpassa. O número de partículas permanece o mesmo até que a faixa de energia seja atingida (CEMBER, 1983).

Desta forma, o cálculo do alcance R das partículas alfa pode ser simplificado de maneira a usar valores fixos e equações simples, como pode ser visto nas Equações 2.6 e 2.7.

$$R(cm) = 0,56.E(MeV)$$
 Para $E < 4(MeV)$ Eq. 2.6

$$R(cm) = 1,24.E(MeV) - 2,62$$
 Para $4 < E < 8(MeV)$ Eq. 2.7

A energia característica das partículas alfa do ²²²Rn é de 5,49 MeV, que, no ar, assume o valor de 3,95 MeV, aproximadamente (KHAN *et al.*, 1993; URBAN e PIESCH, 1981). Assim, observa-se que o alcance das partículas alfa do ²²²Rn no ar é cerca de 2 cm.

2.1.4 Dose

Os danos à saúde relacionados à radiação dependem da absorção da energia de radiação, e são aproximadamente proporcionais à concentração da energia absorvida pelo tecido. Por esta razão, a unidade básica de dose de radiação (D) é expressa em termos de energia por unidade de massa de tecido. Esta unidade, no SI, é chamada de gray (Gy) e é definida como: "um gray é a energia de radiação absorvida por unidade de massa (J/kg). Outra unidade utilizada é o rad (*Radiation Absorbed Dose*), onde 1 Gy = 100 rads". Doses elevadas podem ter efeitos menores, se aplicadas com taxas de dose diluídas no tempo, inclusive para doses fracionadas. Todavia, reduzidas taxas de doses, ao longo de extensos períodos, podem ter efeitos reconhecíveis prováveis (CEMBER, 1983).

Radiações de diferentes naturezas têm capacidades diferentes de lesar o mesmo tipo de matéria viva. A Dose Equivalente (H) leva em conta essas diferenças e sua unidade no SI é o Sievert (Sv). Para se identificar a dose equivalente é necessário fazer o uso do Fator de Qualidade (Q), que é mostrado na Tabela 1, para alguns tipos de radiação.

Tipo de Radiação	Q
Raios Gama	1
Raios X	1
Raios Beta e elétrons de energia > 0,03 MeV	1
Raios Beta e elétrons de energia < 0,03 MeV	1,7
Partículas Alfa	20

Tabela 1 - Fator de Qualidade (adaptada de Cember, 1983)

Devido às diferenças das características dos tecidos humanos, também há que se levar em consideração cada tecido em estudo para se identificar a dose equivalente. O fator (N), chamado de fator de modificação, leva em conta as diferentes maneiras como os tecidos absorvem as radiações. Este fator (N), em conjunto com o Fator de Qualidade faz parte da definição de Dose Equivalente (H), como mostra a Equação 2.8.

$$H = D.Q.N Eq. 2.8$$

Os valores que determinam as concentrações limites de radônio em ambientes estão relacionados à dose máxima anual de referência. Portanto, os níveis de exposição mencionados a seguir explicitam esta relação.

2.1.5 Níveis de exposição

A Posição Regulatória 3.01/007 (CNEN-Posição Regulatória, 2010), no item 3.1 do documento, apresenta as situações de exposição crônica passíveis de intervenção, onde dentre estas situações encontram-se as exposições decorrentes de radionuclídeos naturais. O mesmo documento propõe valor de referência de 10 mSv/a para avaliação da implementação de ações de intervenção. Este valor é referência nos documentos das agências de controle de radiação e das organizações afins (EPA, 2000; ICRP 60, 1993; USNCEAR, 1993; WHO, 2009).

Para avaliação dos níveis de radiação são levados em consideração pelo menos três parâmetros principais: a dose, o tempo de exposição ou tempo de ocupação do ambiente e o fator de equilíbrio. O fator de equilíbrio (F) é a relação entre os subprodutos ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi *Equilibrium-Equivalent Decay-Product Concentration* (EEDC) e o ²²²Rn, e é igual à unidade se o radônio e seus filhos estiverem em equilíbrio radioativo (MELO, 1999).

A UNSCEAR (2000) sugere o valor de 0,4 para o fator de equilíbrio. O estudo de Porstendorfer (1993) mostra que para a maioria dos ambientes internos o fator de equilíbrio está entre 0,2 e 0,6. A maioria dos trabalhos não apresenta há medidas específicas do fator de equilíbrio, sendo então adotado o valor de 0,4 (UNSCEAR, 2000).

Melo (1999) citando (ICRP 65, 1993) afirma que a comissão, na sua publicação daquele ano, estabelece níveis de ação e de intervenção em residências, sugerindo valores de dose anual devida ao radônio entre 3 e 10 mSv, levando em consideração um período de ocupação (das residências) de 7.000 horas e um fator de equilíbrio de 0,4, com correspondência, em concentração, de 200 e 600 Bq/m³, respectivamente.

2.1.6 Efeitos biológicos da radiação

A energia liberada na interação das emissões radioativas pode produzir ionização e excitação dos átomos e quebra de moléculas e, como consequência, a formação de íons e de radicais livres altamente reativos. Estes, por sua vez, podem destruir moléculas de DNA (ácido desoxirribonucléico) do núcleo da célula, causando danos. Mesmo com a destruição de uma molécula de DNA, a célula é capaz de continuar vivendo, porém ela se torna incapaz de se dividir. Assim, a célula acaba morrendo e não sendo renovada. Se isso

ocorrer em um número muito grande de células, sobrevém o mau funcionamento do tecido constituído por essas células e, por fim, a sua morte.

Estatisticamente, uma célula pode, ao ter o seu DNA danificado, passar a se reproduzir rapidamente e, é claro, não ter suas funções preservadas. Muitos dos tumores cancerígenos têm a sua origem nesse fato. No caso do radônio, este dano está relacionado às particulas alfa que impactam o epitélio dos brônquios, sendo esta a correlação direta com o câncer de pulmão.

Sabe-se que a tendência atual, gerada pelos resultados de experimentações com doses baixas, é não aceitar a existência de um limiar de segurança absoluta. Assim, consegue-se inferir que a radiação alfa, advinda do gás radônio, mesmo com pequenas doses, se continuamente recebida, pode ter efeitos nocivos à saúde.

Desta forma, faz-se a conexão entre o fenômeno físico da radiação alfa, advinda do radônio, naturalmente ocorrente em ambientes e o risco à saúde que proporciona.

2.2 Radioatividade natural

Radionuclídeos naturais estão presentes na crosta terrestre desde sua origem. Elementos radioativos como urânio, tório e potássio são encontrados em quase todos os tipos de rochas, areias, solos e água. Seres humanos estão expostos a radiações ionizantes destas fontes naturais que estão distribuídas pelo meio ambiente terrestre (UNSCEAR, 1993; KUMAR *et al.*, 2008).

Os radionuclídeos naturais podem ser divididos entre os que ocorrem de forma isolada e os que são componentes de três séries de decaimento radioativo: a série do urânio originada com o ²³⁸U, a série do tório com o ²³²Th, e a série do actínio originada com o ²³⁵U (UNSCEAR, 1993). As Tabelas 2, 3 e 4 mostram cada isótopo das três séries, sua meia-vida e as emissões radioativas principais.

As três séries radioativas mencionadas compõem grande parte da radiação responsável pela dose de radioatividade a que os seres humanos estão expostos.

Nuclídeo		Meia-vida	Principais radiações	
2	²³⁸ U	4,47 x 10 ⁹ anos	α	
2	³⁴ Th	24,1 dias	β	
2	³⁴ Pa	1,16 minutos	β	
2	²³⁴ U	$2,455 \ge 10^5$ anos	α	
2.	³⁰ Th	$7,54 \ge 10^4$ anos	α	
2.	²⁶ Ra	1600 anos	α	
2:	²² Rn	3,8235 dias	α	
2	¹⁸ Po	3,098 minutos	α	
²¹⁴ Pb	²¹⁸ At (0,02%)	26,8 minutos – 1,5 segundos	β - α	
(99,98%)				
2	¹⁴ Bi	19,9 minutos	β	
²¹⁴ Po	²¹⁰ Tl (0,02%)	164,3 μ s – 1,3 minutos α - β		
(99,98%)				
2	¹⁰ Pb	22,2 anos	β	
2	¹⁰ Bi	5,01 dias	β	
²¹⁰ Po (~100%)	²⁰⁶ Tl (0,00013)%	138,376 dias – 4,202	α - β	
		minutos		
2	⁰⁶ Pb	Estável	Nenhuma	

Tabela 2 - Série do urânio - Dados do National Nuclear Data Center (NNDC, 2011)

Tabela 3 - Série do tório - Dados do National Nuclear Data Center (NNDC, 2011)

Nuclídeo		Meia-vida	Principais radiações
2.	³² Th	$1,4 \ge 10^{10}$ anos	α
2:	²⁸ Ra	5,75 anos	β
22	²⁸ Ac	6,15 horas	β
2:	²⁸ Th	1,9116 anos	α
2:	²⁴ Ra	3,6319 dias	α
22	²⁰ Rn	55,6 segundos	α
2	¹⁶ Po	0,145 segundos	α
²¹² Pb		10,64 horas	β
2	¹² Bi	60,55 minutos	β
²¹² Po (64%)	²⁰⁸ Tl (36%)	0,299 μs - 3,053 minutos	α - β
20	⁰⁸ Pb	Estável	Nenhuma

Nuclídeo		Meia-vida	Principais radiações
2	²³⁵ U	7,04 x 10 ⁸ anos	α
2	³¹ Th	25,5 horas	β
2	³¹ Pa	$3,276 \ge 10^4$ anos	α
2	²⁷ Ac	21,772 anos	β
²²³ Fr (1,38%)	²²⁷ Th (98,62%)	22,00 minutos - 18,68 dias	α - β
2	²³ Ra	11,43 dias α	
2	¹⁹ Rn	3,96 segundos	α
2	¹⁵ Po	1,781 ms	α
²¹¹ Pb (~100%)	²¹⁵ At (0,00023%)	36,1 minutos – 0,10 ms	α - β
2	¹¹ Bi	2,14 minutos	α, γ
²⁰⁷ Tl (99,73%)	²¹¹ Po (0,273%)	4,77 minutos - 0,516	α - β
		segundos	
²⁰⁷ Pb		Estável	Nenhuma

Tabela 4 - Série do actínio - Dados do National Nuclear Data Center (NNDC, 2011)

A Figura 2 apresenta a imagem de uma das telas da carta de nuclídeos do Brookhaven National Laboratory, utilizada para a construção das Tabelas 1, 2 e 3.



Figura 2 – Informações sobre o ²²²Rn da carta de nuclídeos (NNDC, 2011)

A Figura 3 mostra as séries radioativas e suas principais emissões radioativas obtidas desta carta de nuclídeos (NNDC, 2011).



Figura 3 - Séries radioativas naturais (NNDC, 2011)

Assim, como o radônio, por meio de seus isótopos ²²²Rn, ²¹⁹Rn, ²²⁰ Rn, faz parte destas três séries radioativas, os elementos precursores dos isótopos U, Th, Ra, são caracterizados sucintamente a seguir.

O urânio consiste de três isótopos. Na crosta terrestre, o ²³⁸U representa 99,28% destes isótopos e está em equilíbrio radioativo com o ²³⁴U, que representa 0,0058%. O ²³⁵U, isótopo pai da série do actínio, representa 0,71%. O urânio é encontrado em todas as rochas e solos, e as rochas ígneas ácidas contêm concentrações na ordem de aproximadamente 100 vezes maior do que aquela nas rochas ígneas ultrabásicas. Em rochas de fosfato, o índice de urânio pode ser cerca de 10 vezes o das rochas ígneas o que pode estar refletido em concentrações de urânio correspondentemente elevadas no fosfato comercial (EISENBUD e GESELL, 1997).

O rádio ²²⁶Ra e seus produtos de decaimento são responsáveis pela principal fração da dose de emissões internas recebida por seres humanos (IAEA, 1990). Observando-se a Tabela 1, vê-se que o ²²⁶Ra tem meia-vida de 1600 anos, e decai para o radônio ²²²Rn, que tem meia-vida de 3,82 dias. O decaimento do ²²²Rn é seguido pela desintegração sucessiva de emissores alfa e beta de meia-vida curta. Após etapas da decaimento, a cadeia radioativa termina com o chumbo ²⁰⁶Pb, estável.

Com relação aos solos e rochas, o ²²⁶Ra está presente praticamente em todos os solos e rochas em quantidades variáveis. Rochas ígneas tendem a conter concentrações mais elevadas de ²²⁶Ra do que rochas arenosas e rochas calcárias. A quantidade de rádio em águas está relacionada a fatores geológicos e geoquímicos que influenciam a concentração dos dois principais isótopos ²²⁶Ra e ²²⁸Ra, que são filhos do urânio e do tório, respectivamente. Há mais ²³²Th do que ²³⁸U na natureza, considerando-se a atividade, mas há fatores geoquímicos que propiciam concentrações de ²²⁶Ra, geralmente maiores que de ²²⁸Ra (EISENBUD e GESELL, 1997). O radônio, como gás inerte, indica a presença de rádio e de seu precursor, o urânio, no solo (KUMAR *et al.*, 2008).

O interesse na quantidade de rádio em águas de consumo humano deve-se ao fato de que diversas pesquisas mostram que em vários casos, principalmente em água de poços, a quantidade de rádio excede o limite estabelecido pela (2000).

Com relação ao ²³²Th, o elemento da terceira série radioativa ilustrada na Tabela 2, suas concentrações típicas para rochas predominantes na crosta são aproximadamente quatro vezes a concentração de urânio. Entretanto, a atividade específica do ²³²Th, de 0,11 pCi.g⁻¹ (4 mBq.g⁻¹), é cerca de três vezes menor, se comparada a 0,33 pCi.g⁻¹ (12 mBq.g⁻¹) para o ²³⁸U. Assim, devido a essa compensação, a radioatividade devido aos dois nuclídeos

é aproximadamente igual. Em alguns locais da crosta, a quantidade de ²³²Th é bastante alta, se comparada às concentrações típicas (EISENBUD e GESELL, 1997).

Áreas com alto nível de radiação de fundo encontradas em alguns solos são devidas às condições geológicas e efeitos geoquímicos e causam aumento da radiação terrestre. Trabalhos de pesquisa no mundo e, especificamente no Brasil, mostram estas condições (KUMAR *et al.*, 2008).

2.3 Radônio

O radônio e seus filhos de meia-vida curta são os principais contribuidores para a exposição humana às radiações naturais. Enquanto os riscos associados à exposição ao radônio em minas são conhecidos há longo tempo, somente a partir de 1970 os cientistas perceberam que a exposição *indoor* (em ambientes fechados como residências, prédios e outros) poderia ser alta, em certos casos, comparadas a exposições em minas. A partir de então, pesquisas têm propiciado melhor compreensão do processo de exposição ao radônio, mas ainda há muitas questões associadas à exposição e às doses recebidas pelos indivíduos e pela população (UNSCEAR, 2000).

A UNSCEAR, por meio de seus documentos emitidos em 1993 e 2000 afirma que é bem conhecido que a inalação dos produtos de decaimento do ²²²Rn, e em menor extensão dos produtos de decaimento do ²²⁰Rn e sua subsequente deposição ao longo das paredes de vários condutos dos brônquios são o principal caminho para a exposição à radiação nos pulmões. Esta exposição é devida, em sua maior parte, pelas partículas alfa emitidas por alguns destes radionuclídeos, embora partículas beta e radiação gama também sejam produzidas. Há um consenso geral entre os cientistas sobre os riscos de câncer no pulmão relacionados à radiação alfa (advinda do radônio).

Pode-se observar pelas Tabelas 1, 2 e 3 e pela Figura 2 do item anterior que quando o 226 Ra decai, por emissão α , transforma-se em seu produto de decaimento 222 Rn, que tem meia-vida de 3,8235 dias. Similarmente, o 224 Ra, que é um descendente da série do 232 Th, decai por emissão α , ao 220 Rn (torônio), de meia-vida de 55,6 segundos. O radônio 219 (actinônio), que faz parte da série do 235 U, decai com meia-vida de aproximadamente 3,96 segundos.

O isótopo ²²²Rn, de meia-vida aproximada de 3,82 dias, tem uma oportunidade maior do que os isótopos de meia-vida curta de escapar à atmosfera. A grande importância atribuída a este isótopo, com relação a exposição humana, está relacionada ao fato deste ter a meia-vida maior (RAHMAN *et al.* 2007).

Quando acontece o decaimento do rádio, em rochas ou solos, uma parte dos átomos de radônio gerados passa para a água contida nos espaços capilares das rochas e solos. Uma fração do radônio passa da água ao solo, a princípio por difusão, e ganha, assim, mobilidade para alcançar a atmosfera, quando há trocas do gás da superfície do solo com o gás atmosférico. A concentração típica de ²²²Rn no solo varia de 4 a 40 kBq m⁻³ ($10^2 - 10^3$ pCi L⁻¹), diversas ordens de grandeza maior do que as concentrações de ²²²Rn encontradas na atmosfera. Rahman et *al.* (2007) explicam que o transporte para o interior de edificações acontece por meio de fluxos de difusão e convecção.

Diversas pesquisas relatam variações ao longo do dia das concentrações de radônio. As concentrações máximas são observadas nas primeiras horas do dia e os valores mais baixos são encontrados no fim da tarde, quando as concentrações são aproximadamente um terço dos máximos da manhã. No curso de um ano, os níveis de ²²²Rn tendem a um pico nos meses de outono ou de inverno e têm mínimos na primavera. Esta variação é consistente com os padrões de turbulência atmosférica, que tendem a ser maior na primavera (UNSCEAR, 1993).

Neman (2000) apresenta a relação entre as atividades do radônio no ar nas exposições de verão e de inverno, observando que há uma correlação entre as atividades e que as características residenciais (ventilação, tipos de materiais) influenciam de forma mais expressiva do que as estações do ano. Todavia é provável que as variações das concentrações nas localidades sejam dependentes dos fatores metereológicos (chuva, vento, temperatura, pressão, etc.) que influenciam a taxa de exalação dos gases do solo e a dispersão na atmosfera. Assim, a taxa de exalação do solo pode aumentar durante períodos onde a pressão atmosférica diminui.

Da Silva (2005) desenvoveu trabalho importante de medidas de radônio em ambientes internos na cidade de São Paulo e considerou que a taxa de ventilação é um fator importante para as medidas, mas que outros fatores ambientais, como temperatura e umidade têm pouca influência sobre as concentrações. Assim, embora o clima possa não ter influência direta nas concentrações, o comportamento das pessoas, propiciando maior ou menor ventilação nos ambientes, pode ser preponderante.

As concentrações de radônio diminuem com a elevação em relação ao solo. Por ser um gás pesado, quanto mais longe do solo, menor a concentração do gás. Os níveis de ²²²Rn atmosféricos são igualmente influenciados pela umidade do solo; as concentrações mais elevadas ocorrem nas regiões mais áridas. Este fato está relacionado com a influência da umidade do solo na diminuição da exalação de radônio e também ao fato de que em solos áridos, as rachaduras desenvolvidas aumentam o transporte de ²²²Rn do solo à atmosfera (EISENBUD e GESELL, 1997).

Os produtos de decaimento (filhos) do ²²²Rn e do ²²⁰Rn são carregados eletricamente e, assim, tendem a unir-se a partículas de poeira normalmente presentes na atmosfera. Se os gases radioativos coexistem com a poeira na mesma massa de ar por um tempo suficientemente longo, os pais e seus filhos atingem o equilíbrio radioativo. No caso do ²²²Rn, o equilíbrio ocorre em um tempo aproximado de 2 horas (EISENBUD e GESELL, 1997).

Quando o ar que contém radônio em equilíbrio parcial ou total com seus filhos é inalado, o gás, por ser quimicamente inerte é, em grande parte, expirado. Entretanto, uma fração das partículas de poeira será depositada no pulmão. Esta poeira depositada atingirá seu equilíbrio radioativo, de forma que a quantidade de atividade depositada no tempo se iguala à quantidade que o pulmão elimina fisiologicamente e com o próprio decaimento radioativo (EISENBUD e GESELL, 1997).

No caso do ²²²Rn, no processo de equilíbrio com seus produtos de decaimento, a dissipação de energia total nos pulmões dos produtos de decaimento é aproximadamente 500 vezes maior do que aquela que deriva diretamente do decaimento do ²²²Rn. A dose devida ao ²²⁰ Rn e seus filhos, no entanto, não é significante relativamente à dose recebida da série de decaimentos do ²²²Rn (EISENBUD e GESELL, 1997).

A avaliação da exposição ao radônio e filhos deve levar em conta as concentrações de atividade dos radionuclídeos das séries, principalmente ²²²Rn e ²²⁰Rn, que são os isótopos de meia-vida mais longa. É esta consideração, bem como o fato de que a energia total (da partícula e de seus produtos de decaimento) é importante para a determinação da dose, que leva à definição de taxa de exposição ao radônio em termos de potencial de

energia. Na maioria das vezes, a exposição é calculada indiretamente por meio da concentração e do fator de equilíbrio. O ponto essencial é que os fatores ambientais que influenciam na concentração são de grande significância para se analisar a exposição e a dose (UNSCEAR, 2000).

Uma parte do ²²²Rn é absorvida pelos tecidos, quando o gás é inalado e os produtos de decaimento fornecem uma dose aos tecidos do corpo, que pode ser significativa e é objeto de estudo do ICRP (1991).

2.3.1 Radônio em águas subterrâneas

O ²²²Rn dissolvido na água é uma fonte de exposição humana, principalmente porque o gás é liberado da água de torneira e chuveiros e incorporado à atmosfera do ambiente interno (NAZAROFF *et al.*, 1987).

Níveis mais altos de ²²²Rn são encontrados em água subterrâneas e estão correlacionados à ocorrência de níveis elevados do precursor ²²⁶Ra nas rochas. Rochas cristalinas, especialmente granito, podem ser fonte dos níveis elevados do gás, enquanto que rochas sedimentares apresentam, geralmente, níveis inferiores (EISENBUD e GESELL, 1997).

O substrato do Paraná, mais especificamente da região metropolitana, contém rochas que na maioria são classificadas como metamórficas. Na região há grande variedade de rochas ígneas intrusivas, inclusive granitos e granitóides (MINEROPAR, 2005).

Este fato leva a se inferir que o embasamento rochoso do Paraná tenha contribuição considerável nas concentrações de radônio das águas subterrâneas da região, já que os granitos têm em sua formação os precursores desse gás.

Pesquisas da EPA (2000) sobre a concentração de ²²²Rn em amostras de água subterrânea de rochas sedimentares mostram concentrações baixas, em geral. Por outro lado, estudos de águas apresentados no mesmo documento, sobre pequenas comunidades situadas sobre o mesmo tipo de substrato, mostraram níveis de ²²²Rn bastante elevados.

Este fato evidencia a importância das investigações, já que nas comunidades menores, pode ser que a água dos poços percorra caminho mais curto e chegue mais rapidamente ao consumo.

Com relação aos níves de concentração de radônio em água, estudos mostrados no documento sobre recomendações da comissão europeia (COMMISSION RECOMMENDATION, 2001) afirmam que, em geral, a concentração em águas de superfície fica abaixo de 1 Bq/L. O mesmo documento diz que para águas em aquíferos de rochas sedimentares os valores ficam entre 1 e 50 Bq/L, para poços escavados entre 10 e 300 Bq/L e para águas advindas de rochas cristalinas entre 100 e 50.000 Bq/L.

Os limites propostos pela EPA (2000) são de 11,1 Bq/L para o ²²²Rn em água potável. Este limite está relacionado à contribuição provável das águas para os ambientes. Os limites que delimitam a barreira entre a normalidade e os níveis de atençãosobre a concentração de radônio para ambientes internos (*indoor*) são de 148 Bq/m³ (EPA, 2000) e 200 Bq/m³ (ICRP, 1993).

A CNEN (2005) recomenda nível genérico para avaliação da implementação de ações de intervenção de 10 mSv/a. Este valor representa 300 Bq/m³, para radônio *indoor* de acordo com recentes cálculos apresentados pelo (ICRP, 2008). Estes níveis mostram-se compatíveis com os dados mencionados no parágrafo anterior.

Curiosamente diferente da EPA, a recomendação da comissão europeia (COMMISSION RECOMMENDATION, 2001) é de 100 Bq/L, tendo como valor limite para intervenção 1000 Bq/L, considerando que o radônio contido nesta água é ingerido e também inalado (liberado no ambiente). Este valor está relacionado a uma limitação *indoor* de 200 Bq/m³.

Observa-se que as metodologias de cálculo que relacionam o radônio contido em água e sua contribuição ao ambiente podem levar a valores limites bastante diferentes. Assim, os limites mencionados são motivo de discussão que se baseia no fato de que as fontes de água têm uma contribuição pequena na concentração de ²²²Rn em ambientes internos e, além de pequena, passível de muitas variáveis.

Portanto, uma recomendação de limites baseada apenas na concentração em água pode não ser conveniente, já que não relaciona diretamente a concentração de radônio na água potável com a dos ambientes. Todavia, a contribuição da água com relação ao radônio *indoor* pode ser a fonte predominante nas áreas onde o teor do gás na água subterrânea é elevado.

Oner *et al.* (2009) fizeram medidas de concentração de Rn em águas de rios e açudes na Turquia. Encontraram valores que ficam entre 0,33 e 1,17 Bq/L. Schubert *et al.* (2006) mediram valores para águas de açudes do México que ficam entre 0,9 e 16,2 Bq/L. Cosma et al. (2008) mediram 1511 amostras de água cujos valores de concentração de radônio ficam entre 0,5 e 129,3 Bq/L, com média de 15,4 Bq/L.

Há trabalhos no Brasil que mostram resultados de medidas de concentração de radônio em águas de alguns locais. A Tabela 5 mostra alguns destes resultados

Observa-se que as concentrações de águas subterrâneas têm valores que variam dentro de uma faixa bastante extensa. Este fato está em concordância com estudos de radônio no solo, mostrados em tópico a seguir.

		Concentração Radônio (Bq/L)			
Localidade	Ν	Média	Mínimo	Máximo	Referência
São Vicente - SP					
Fontes	6	-	8,1	36	
Solo	6	-	0,41	3,46	Margues et al, 2006
Cavidades	3	-	0,72	5,85	1
Leste do Estado de SP					
Poço	1	76±7	-	-	Lucas e Ribeiro, 2007
Poço	1	26±3	-	-	
Poço	1	39±4	-	-	
Águas subterrâneas					
Norte	10	88,6	<2,4	525	
Nordeste	44	33,3	<1,2	80,6	Godoy e Godoy, 2006
Centroeste	23	43,8	<5	51,6	5 57
Sudeste	234	150	<1,2	3542	
Sul	47	229	<1,2	1402	
Aquífero Guarani (poços)					
Bocaina	6	-	$1\pm 0,1$	40±2	
Catanduva	9	-	$0,04{\pm}0,01$	27±1	Bonotto e Mello,
Novo Horizonte	5	-	5±0,3	155±9	2006
São José do Rio Preto	3	-	6±0,3	11±1	
Região dos Lagos					
Fontes e poços	88	-	3	75	Almeida et al., 2004

Tabela 5 - Valores de concentração de radônio em águas de alguns locais do Brasil

2.3.2 Radônio no solo

A fração de átomos de radônio liberada pelo rádio nos poros das rochas e do solo é chamada de coeficiente de emanação. Os fatores que influenciam neste coeficiente estão relacionados ao tamanho do grão, que determina quanto de rádio fica próximo suficientemente da superfície para permitir ao radônio escapar para os poros. Em geral o fator de emanação de radônio é inversamente proporcional ao tamanho do grão (UNSCEAR, 2000).

A emanação de radônio também está relacionada à densidade dos grãos, à porosidade dos mesmos e ao coeficiente de partição entre o ar e a água, que é a razão entre as concentrações de radônio no ar e na água.

Em geral, granitos têm relativamente altas concentrações de rádio, rochas sedimentares e metamórficas têm concentrações médias e basaltos e rochas calcárias têm concentrações baixas deste elemento (UNSCEAR, 2000).

A concentração de radônio em ambientes adjacentes a rochas e solos está relacionada principalmente à concentração de ²²²Rn nos espaços de fraturas da rocha e poros do solo e à permeabilidade do solo. A permeabilidade e a difusão são tão menores quanto menores os tamanhos daqueles espaços e quanto mais os espaços ficam preenchidos por líquidos (água, em geral). Rochas que geralmente têm concentrações de ²²²Rn elevadas nos poros e em fraturas são: granitos, gnaisses, rochas fosfáticas, xistos marinhos, e algumas rochas calcárias e dolomitas recristalizadas (EISENBUD e GESELL, 1997).

Solos com tamanho de grão maior (tais como cascalhos e areias grossas), são altamente permeáveis e aptos a exalar mais ²²²Rn do que seria esperado, tendo como base seu índice de concentração de rádio. As siltes e as argilas tendem a ter baixa permeabilidade, especialmente se úmidas, e exalam menos radônio. A taxa de exalação fornece o número de átomos que deixa o solo, por unidade de área, por unidade de tempo (RAHMAN *et al.* 2007).

O interesse nas concentrações no solo está relacionado principalmente à sua contribuição em ambientes internos (*indoor*). De acordo com Rahman *et al.* (2007), mais de 60% do radônio encontrado em ambientes internos são provenientes do solo da fundação e dos solos ao redor da construção.

Estudos mostram que as concentrações de radônio no solo podem variar numa faixa bastante expressiva. Neznal *et al.* (1997) mostram valores da literatura que variam de 1,6 a 120 kBq/m³, e apresentam resultados de trabalho de intercomparação que mostram variação de 39,9 a 61,6 kBq/m³.

Desta forma, percebe-se que os níveis de radônio no solo não podem ser avaliados isoladamente quando se trata de determinar limites, pois a sua contribuição para a dose efetiva depende de muitas variáveis. No entanto, apreende-se que a concentração no solo influencia diretamente na concentração de radônio na água e em ambientes internos.

2.3.3 Radônio em ambientes internos (indoor)

O conhecimento sobre os fatores que influenciam a entrada de ²²²Rn nas estruturas internas de ambientes se aprimorou depois das investigações envolvendo modelos simplificados mostrados nos documentos da UNSCEAR (1988 e 1993) *apud* UNSCEAR (2000). Estes estudos mostram que o fluxo de entrada de radônio está relacionado com a difusão (relacionada aos movimentos aleatórios das partículas de ar) e advecção (relacionada aos movimentos de massas de ar) do solo, com a entrada do ar externo e com a liberação de ²²²Rn da água.

Nazaroff e Nero (1998), em pesquisa feita nos Estados Unidos, afirmam que em ambientes internos, especialmente aqueles construídos ou limitados por materiais que exalam radônio, as concentrações de ²²²Rn podem ser bem mais altas que ao ar livre. Exemplos incluem minas subterrâneas, especialmente as de urânio, cavernas, e algumas estruturas. Nas últimas décadas, observou-se que em muitas residências a concentração de ²²²Rn (e de seus filhos) são tão elevadas que envolvem riscos potenciais muito maiores do que aqueles que costumam chamar a atenção.

O fluxo advectivo é considerado o principal fator de entrada do gás em ambientes e é conduzido pelo diferencial de pressão entre a construção e o solo, em primeiro lugar, sendo que as outras entradas representam menor influência. Este fator é criticamente dependente da permeabilidade do solo adjacente e da própria permeabilidade da construção (UNSCEAR, 2000).

O ²²²Rn pode se incorporar à atmosfera interna de várias maneiras, incluindo a difusão dos materiais de construção ou a difusão do solo, através das rupturas na fundação.

Com relação aos materiais de construção, vários trabalhos (BURKE, 2003, RIO DOCE, 1997, VILLALOBOS, 1991, MELO, 1999), afirmam que o solo tem contribuição com relação ao radônio cerca de 10 vezes mais que materiais de elevado grau de compactação, como concreto, pedra e tijolo.

Entretanto, é certo que a difusão de ²²²Rn do solo é uma fonte menor comparada ao gás advindo diretamente através da fundação em consequência dos diferenciais de pressão, da pressão barométrica, das mudanças de temperatura ou da velocidade do vento. Steinhausler (1975) *apud* Eisenbud e Gesel (1997) mostrou que os fatores meteorológicos, como os mencionados acima, em particular podem influenciar as concentrações internas de ²²²Rn e filhos.

É de conhecimento geral que o interesse público e governamental no ²²²Rn em ambientes internos foram estimulados, em parte, pela descoberta da famosa casa de Watras, na Pensilvânia, onde as medidas ficaram em torno de 100 kBq m⁻³, cerca de mil vezes os valores comuns em residências padrão. O evento causou muita publicidade e é visto como um estímulo à atividade científica para pesquisas de radônio em ambientes internos.

O interesse científico no ²²²Rn em ambientes internos começou em meados dos anos 70, quando a instrumentação apropriada tornou-se disponível. Isto coincidiu com a ênfase colocada na necessidade de conservação de energia (voltada aos países onde há inverno rigoroso) onde se passou a valorizar as proteções contra infiltrações de ar, reduzindo desse modo a taxa de infiltração do ar exterior (EISENBUD e GESELL, 1997).

Entretanto, estudos subsequentes mostraram que a taxa de ventilação não é a principal influência na concentração de ²²²Rn em ambientes. Outros fatores, incluindo a concentração de ²²⁶Ra no solo, a permeabilidade do solo, e as diferenças entre a pressão externa e interna são as principais variáveis neste caso (UNSCEAR, 2000).

O ICRP (1993), por exemplo, limita as concentrações em ambientes internos da seguinte forma: normal até 200 Bq/m³, atenção de 200 a 400 Bq/m³, remediação de 400 a 600 Bq/m³, e intervenção acima de 600 Bq/m³. A EPA (2000) sugere prática de intervenção em residência com valores de concentração acima de 148 Bq/m³. A WHO (2009) recomenda que as concentrações em ambientes internos sejam menores que 100

Bq/m³, mas adverte que se isto não é possível, deve ser tomado como referência o valor de 300 Bq/m³ como limitante, observando os fatores relacionados à incidência de câncer.

No Brasil, a Norma NE 3.01 de 1998 (CNEN-NE 3.01, 2010), já revogada, não se aplicava a exposições naturais. Todavia a NN 3.01 de 2005 (CNEN-NN 3.01, 2010) se aplica a exposição a fontes naturais cujo controle seja considerado necessário. Como já foi mencionado no item 2.2.1, A CNEN, por meio da Posição Regulatória 3.01/007 de 2005 (CNEN-Posição Regulatória, 2010) recomenda nível genérico para avaliação da implementação de ações de intervenção de 10 mSv/a o que representa, como já se disse, 300 Bq/m³, de acordo com recentes cálculos apresentados pelo (ICRP 106, 2008).

Levantamentos efetuados na Europa e nos Estados Unidos têm encontrado, com frequência, residências nas quais os níveis de concentração de radônio situam-se entre 2.000 e 50.000 Bq/m³, enquanto que os níveis aceitáveis recomendados (IAEA, 2008; ICRP 60, 1991; NRPB, 2009; UNSCEAR, 1993) estão entre 148 e 200 Bq/m³.

Todavia, a concentração média de radônio *indoor* em países onde há monitoramento registrado pela WHO (2009) permanece abaixo dos 148 Bq/m³ estabelecidos pela EPA (2000) e consequentemente, abaixo dos 200 Bq/m³ estabelecidos pela UNSCEAR (2000).

A Tabela 6 apresenta as concentrações médias de radônio *indoor* de países da OECD (Organization for Co-operation and Development) apresentada pela WHO (2009).

Concentração de radônio (Bq/m ³)					
País	Média aritmética	Média geométrica	Desvio padrão geométrico		
Alemanha	49	37	2,0		
Austrália	11	8	2,1		
Áustria	99	15	-		
Bélgica	48	38	2,0		
Canadá	28	11	3,9		
Coréia	53	43	1,8		
			(continua		

Tabela 6 - Concentrações de radônio indoor em países da OECD (WHO, 2009)
		• •	
Dinamarca	59	39	2,2
Eslováquia	87	-	-
Espanha	90	46	2,9
Estados Unidos	46	25	3,1
Finlândia	120	84	2,1
França	89	53	2,0
Grécia	55	44	2,4
Holanda	23	18	1,6
Hungria	82	62	2,1
Irlanda	89	57	2,4
Islândia	10	-	-
Itália	70	52	2,1
Japão	16	13	1,8
Luxemburgo	110	70	2,0
México	140	90	-
Nova Zelândia	22	20	-
Noruega	89	40	-
Polônia	49	31	2,3
Portugal	62	45	2,2
Reino Unido	20	14	3,2
República Tcheca	140	44	2,1
Suécia	108	56	-
Suíça	78	51	1,8
Média mundial	39		

Tabela 6 - Concentrações de radônio indoor em países da OECD (continuação)

A Tabela 7 apresenta as concentrações médias de radônio *indoor* apresentada em documento da UNSCEAR (2006).

Tabela 7 - Concentrações de radônio indoor (UNSCEAR, 2006)

Concentração de radônio (Bq/m ³)					
País	Média aritimética	Média geométrica	Valor máximo	Desvio padrão geométrico	
África					
Argélia	30	-	140	-	
Egito	9	-	24	-	
Gana	-	-	340	-	

América do Norte						
Canadá (01)	34	14	1720	36		
Canadá (02)	28,35	11,2	1720	3,9		
EUA	46	25	-	3,1		
México	140	90	1193	-		
		América do Sul				
Argentina	35	25	211	2		
Brasil	81,95	-	310,0	-		
Chile	25	-	86	-		
Cuba	7,7	5,2	15,3	3,3		
Equador	200	-		-		
Paraguai	28	-	51	-		
Peru	32,29	-	50,20	-		
Venzuela	52,50	-	346	-		
		Leste da Ásia				
Cazaquistão	-	-	5000	-		
China (01)	43,8	34,4	596	-		
China (02)	24	20	380	2,2		
Coréia	53,4	43,3	1350	1,8		
Filipinas	23	22	62	1,13		
Filipinas	23	23	62	± 6		
Hong Kong SAR	41	-	140	-		
Índia	57	42	210	2,2		
Indonésia	35,1	35,1	165	1,2		
Japão	16	13	310	1,8		
Malásia	14	-	20	-		
Paquistão	30	-	83	-		
Rússia	50-60	-		-		
Taiwan	10,0	8,5	63,5	0,6		
Tailândia	23	16	480	1,2		
Oeste da Ásia						
Arábia Saudita	16	-	36	-		
Armênia	104	-	216	1,3		
Irã	82	-	3070	-		
Irã	2745	-	31000	-		
Irã	600	-	1000	-		
Kuwait	14	10,6	119,2	0,74		
Palestina (Gaza)	34	-	105	-		
Síria	44	-	520	-		

Tabela 7- Concentrações de radônio indoor (continuação)

Norte da Europa					
Dinamarcar	59	39	1200	22	
Estônia	120	92	1390	-	
Finlândia	120	84	20000	2,1	
Islândia	10	-	26	-	
Lituânia	49	38	1900	-	
Lituânia	55	36,5	636	-	
Noruega	73	40	50000	-	
Suécia	108	56	84000	-	
	(Deste da Europa			
Alemanha	50	40	>10000	1,9	
Áustria	-	15	190	-	
Bélgica	48	38	12000	2	
r.	62	41	4690	2,7	
França	89,3	53,5	4964	-	
Holanda	23	18	380	1,6	
Inglaterra	90	50		-	
Irlanda	89	57	7000	2,4	
Listenstaine	80	-	1098	-	
Luxemburgo	110	70	2500	2,0	
País de Gales	84	48	-	-	
Reino Unido	20	14	17000	3,2	
Suíça	75	41	10000	-	
Serías	142	81	15000	2,6	
Suiça	73	59	15000	1,8	
	I	Leste da Europa			
Bielorrússia	31,8	-	221	-	
Bulgária	-	22	250	2,1	
Eslováquia	87	-	3750	-	
Hungria	107	82	1990	2,7	
Polônia	49,1	-	1300	-	
Polônia	49	31	3260	2,3	
Romênia	25,0	-	564	-	

Tabela 7- Concentrações de radônio indoor (continuação)

	118	94,4	70000	1,84		
	442	-	20000	-		
D (11)	214	-	20000	-		
República Tcheca	124	-	70000	-		
Teneca	112	-	20000	-		
	136	-	6000	-		
	214	-	6500	-		
		Sul da Europa				
Albânia	120	105	270	2,0		
Croácia	35	32	92	-		
Chipre	7	7	78	2,6		
Eslovênia	87	60	1330	2,2		
Espanha	90,38	45,69	15400	-		
Espanha	748,5	242,64	15400	-		
Espanha	90,4	45,7	15400	2,9		
Espanha	610,0	-	1400,0	-		
Grécia	73	52	490	-		
Grécia	55	44	1700	2,4		
Itália	75	57	1040	2,0		
Itália	70	52	1036	2,1		
Iugoslávia	184	110	1128	2,74		
Portugal	62	45	2700	2,2		
Oceania						
Austrália	11	8	420	2,1		
Nova Zelândia	21,5	19,5	80	-		

Tabela 7- Concentrações de radônio indoor (continuação)

Há trabalhos no Brasil que mostram resultados de medidas de concentração de radônio *indoor* em algumas regiões. A Tabela 8 mostra alguns destes resultados.

No Brasil, observa-se que os valores médios de concentração de radônio nas regiões monitoradas não excedem significativamente o valor de 200 Bq/m³. Em contrapartida, similarmente ao que acontece nos países catalogados pela UNSCEAR (2006), percebe-se que há determinados locais (observar os valores máximos das Tabelas 6 e 7) onde os níveis de concentração de radônio excedem expressivamente os limites recomendados.

		Concentração Radônio (Bq/m ³)			
Localidade	Ν	Média	Mínimo	Máximo	Referência
Poços de Caldas-MG					
Área rural	30	204	50	1046	Amaral et al, 1992
Área rural	41	220	27	1024	Veiga <i>et al</i> , 2003
Área urbana	97	61	12	920	Veiga <i>et al</i> , 2003
Monte Alegre-PA					
Área rural	18	116	40	338	Melo, 1999
Área urbana	26	75	22	188	Melo, 1999
Rio de Janeiro	48	40	9	200	Magalhães, 1999
Campinas-SP	67	80	20	254	Neman, 2000
Santos - SP	8	124±37	-	-	Geraldo et al., 2005
São Paulo	63	147	33	562	Da Silva, 2005
São Paulo	90	131	31	615	Da Silva, 2005
Campo Largo-PR (1)	9	60	6	123	Corrêa, 2006
Curitiba Centro-PR (1)	11	42	6	126	Corrêa, 2006
Curitiba Portão-PR (1)	11	85	5	486	Corrêa, 2006
Campo Largo-PR (2)	5	186	2	637	Corrêa, 2006
Curitiba Centro-PR (2)	30	76	5	268	Corrêa, 2006
Belo Horizonte	501	108	4	1531	Santos, 2010

Tabela 8 - Valores de concentração de radônio indoor em algumas regiões do Brasil

No entanto, deve-se lembrar que o radônio *indoor* é reconhecido como sendo de origem natural e as normas estabelecidas não são reguladoras da natureza. No entanto, ao se perceber valores acima dos limites, ações mitigatórias podem ser tomadas para diminuir a quantidade de radônio *indoor*.

2.3.4 Métodos para redução da concentração de radônio em ambientes internos

Há diversos métodos propostos voltados à redução das concentrações de ²²²Rn em ambientes internos (EPA, 2000; ICRP 99, 2005; NCRP, 1991).

Como já foi comentado, em geral, as altas concentrações de radônio devem-se mais às emanações do solo do que da taxa de ventilação. Portanto a atenção maior, no caso de redução, são voltadas à despressurização do ambiente das fundações, reduzindo a taxa de entrada por rachaduras e outras aberturas. A sucção tem o efeito de abaixar a pressão do gás do solo relativamente à pressão de dentro da casa, impedindo que o ²²²Rn penetre na

casa. Esta despressurização pode ser feita de forma ativa ou passiva, por meio de um cano que vai da fundação ao telhado da casa.

Outro método importante para reduzir a concentração de ²²²Rn é selar as aberturas na fundação. Estas incluem rachaduras do assoalho, junções entre o assoalho e parede, rachaduras e aberturas da parede, drenos de assoalho, e depósitos. Se estes métodos não forem eficientes, pode ser necessário aumentar a ventilação.

- 2.3.5 Resumo sobre o ²²²Rn
 - Gás nobre, quimicamente inerte.
 - Produto do decaimento do ²³⁸U.
 - Escapa das rochas e solos por meio de emanação e exalação.
 - Entra em residências por meio de fluxos difusivo e convectivo do solo.
 - Meia-vida de 3,82 dias.
 - Decai por emissão de partículas alfa.

• Tem filhos de meia-vida curta alfa emissores (polônio 218 e 214), responsáveis pela radiotoxidade associada ao ²²²Rn.

• Seus filhos de meia-vida curta são eletricamente carregados e se incorporam às partículas de poeira.

- Partículas de poeira, quando inaladas, podem ser aderidas nas paredes dos pulmões.
- Os filhos decaem por emissão alfa, beta e gama.

• As partículas alfa impactam todo o trato respiratório e especialmente o epitélio dos brônquios.

- Este impacto pode provocar mudanças no DNA.
- Mudanças no DNA podem levar ao câncer de pulmão.

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação e delimitação da pesquisa

Esta tese tem a intenção de fazer uso de conceitos teóricos, estatísticos e informações da literatura para coletar os dados de forma adequada e obter conclusões sobre o objeto de estudo. Assim esta pesquisa pode ser classificada como aplicada, pois busca a utilização prática de conhecimentos teóricos por meio de experimentação e observação, tendo como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática e que são dirigidos à solução de problemas específicos.

O objeto principal da pesquisa é o gás radônio, observado sob o ponto de vista de sua concentração de atividade no ar de ambientes internos e em águas subterrâneas, obtida por meio de técnicas específicas de detecção e determinação.

Com relação à área de abrangência, a pesquisa se classifica como pesquisa interdisciplinar, já que perpassa pelas áreas de Física, Química, Materiais e Saúde. Envolve a área de Física no que toca o conhecimento sobre radiações, seus mecanismos de transporte e suas interações com a matéria.

A pesquisa também permeia a área de Química quando estuda os fenômenos relacionados às reações, principalmente os relativos ao ataque químico para a revelação dos detectores. A área de Materiais é abrangida, já que, para estudo dos ambientes, utilizou-se detectores do estado sólido (polímeros) e câmaras de difusão cujos materias têm características apropriadas. Com relação à Saúde, o trabalho considerou os malefícios gerados pela contaminação pelo gás estudado.

A forma de abordagem é quantitativa, já que considera que a concentração de radônio é quantificável, o que significa traduzir em números, dados e informações para classificálos e analisá-los.

Quanto ao nível de interpretação, a pesquisa pode ser dividida em duas partes. É exploratória, já que testou instrumentos para que a pesquisa, em sua totalidade, pudesse ser desenvolvida. Do ponto de vista geral é comprobatória, já que procura provar uma hipótese: a de que o radônio, sendo um gás naturalmente radioativo exalado do solo, rochas e água, e comprovadamente nocivo à saúde, deve ser monitorado e a concentração deste elemento, nos ambientes e em águas, pode estar acima dos limites estabelecidos.

A problemática sobre o radônio e filhos foi tratada de forma abrangente na revisão da literatura e levou em consideração normas internacionais, pareceres de laboratórios do Brasil e de outros países, trabalhos acadêmicos e publicações científicas tanto nacionais quanto internacionais. Devido à forma percebida nessa parte, houve uma visão geral sobre o assunto que serviu como base sólida para encaminhamento da parte experimental e para as análises posteriores.

As medidas feitas na parte experimental foram restritas à Região Metropolitana de Curitiba (Figura 4), com medidas em ambientes internos e águas subterrâneas (de poços) desta região, durante o período de dois anos – 2008 a 2010.

As análises foram feitas pelo grupo de pesquisa em radiações da UTFPR, com colaboração de pesquisadores do CDTN-CNEN e do IRD-CNEN.



Figura 4 – Estado do Paraná / Região Metropolitana de Curitiba

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Exposição indoor

Para avaliar a exposição ao radônio ²²²Rn em residências (*indoor*) do Paraná foram feitas exposições de detectores do estado sólido SSNTD (*Solid State Nuclear Track Detectors*), colocados em câmaras de difusão. As exposições são descritas a seguir.

3.2.1.1 Câmaras de difusão

A função da câmara de difusão é de homogeneizar o processo de detecção do do detector garantindo que os eventos registrados sejam predominantemente os alvos de investigação. Pelo mesmo motivo justifica-se a adição de um filtro colocado na entrada da câmara: o controle de passagem dos elementos é função direta da permeabilidade do filtro e do material de sua composição (URBAN E PIESCH, 1981).

A tomada de dados fez uso de câmara descrita no trabalho de Urban *et al.* (1981), que possui volume sensível de 7,1 cm³ na forma de semi-esfera com 3 cm de diâmetro. É composta de uma tampa vazada para a passagem de ar. Na entrada da câmara é colocado o filtro para a absorção dos aerossóis.

Para diminuir a deposição dos produtos de decaimento do radônio sobre o detector, a câmara é feita com fibra de carbono de alta condutividade elétrica. Com isso, a deposição dos produtos indesejados, denominado *plate-out*, no detector, será feita preferencialmente nas paredes da câmara. Além disso, o formato em semi-esfera da câmara propicia um melhor transporte difusivo na direção das paredes e a melhor absorção dos subprodutos do radônio, que, tendo energias mais baixas e meias-vidas menores, tendem a decair antes de chegar ao detector.

Utilizou-se filtros de borossilicato (fibra de vidro), baseado nas informações obtidas do trabalho de Sharaf e Abo-Elmagd (2005), que testaram o desempenho de filtros deste tipo e filtros poliméricos e concluíram que os filtros mais adequados para situações nas quais não é possível controlar a temperatura são os de fibra de vidro, pois os poliméricos apresentaram grande flutuação de permeabilidade sob as condições citadas, enquanto que a mesma propriedade dos filtros à base de papel mostrou-se independente da temperatura.

A Figura 5 mostra uma imagem de câmara utilizada nas medições.



Figura 5 - Câmara de difusão utilizada nas tomadas de dados

3.2.1.2 Detectores

O CR-39 é um detector da família dos SSNTD, sensível à radiação alfa, e foi escolhido devido a diversos fatores que incluem sua boa sensibilidade, estabilidade e alto grau de transparência óptica. O uso do CR-39 na detecção de radônio é amplamente utilizado em um número extenso de pesquisas, como no caso de Abumrad *et al.*, 1997; Farid, 1997; Mazur *et al.*, 1999; Ahn e Lee, 2005, dentre outros. O CR39 também é um dos detectores utilizados pelo CDTN-CNEN em pesquisas sobre radônio.

Nesta pesquisa optou-se pelo uso deste detector também devido a facilidade de aquisição e instalação. A Figura 6 mostra uma imagem do detector utilizado.



Figura 6 - Imagem do detector CR-39

Os detectores foram instalados nas câmaras de difusão descritas no item anterior e expostas segundo o método de exposição, descrito a seguir.

3.2.1.3 Método de exposição dos detectores para medidas indoor

O detector utilizado foi o CR-39 com cerca de 1 cm² de área exposta. As câmaras foram montadas no Laboratório de Radiações Ionizantes da UTFPR. Foram colocados filtros de microfibra de vidro GF 52/C, com diâmetro de 37 mm, na entrada da câmara para prevenir o advento de aerossóis.

Foram monitorados dois tipos de ambientes: residenciais e postos de trabalho de uma empresa do ramo financeiro.

Escolha dos Locais. As residências monitoradas são de alvenaria comum, com blocos cerâmicos ou de concreto, parcialmente ventiladas. As casas são térreas e têm tamanho similar, cerca de 150 a 200 m², e arquitetura semelhante, no que toca os elementos básicos como janelas, portas, paredes e pisos. O tamanho das casas foi definido tomando por base residências de alunos da UTFPR.

O número de residências onde foram instalados os detectores ficou limitado ao número disponível de câmaras e detectores e ao tempo disponível para a pesquisa. Foram instaladas 102 câmaras das quais 4 foram perdidas.

A aleatoriedade da amostra foi garantida da seguinte forma: foram feitas palestras sobre medidas de radônio aos alunos da Engenharia e da Tecnologia da UTFPR. Ao final das palestras foi feita proposta de instalação de detectores nas residências dos alunos interessados, cujas casas estivessem localizadas na Região Metropolitana de Curitiba e fossem do padrão e tamanho tomados como apropriados. Assim, procurou-se não projetar tendência específica para escolha dos endereços voltados às medidas.

O acesso às residências foi facilitado pelo fato de se trabalhar com alunos e professores interessados em conhecer os níveis de concentração de radônio em suas residências. A instalação das câmaras foi feita por alunos ligados ao Laboratório de Radiações da UTFPR.

Os detectores foram posicionados nos ambientes das residências de forma que ficassem na altura aproximada de um adulto sentado ou uma criança em pé. Este cuidado

se deve ao fato de se medir a concentração no nível onde há maior fluxo respiratório na residência.

A mesma metodologia foi utilizada para as medidas nos postos de trabalho. Cerca de 20 postos de trabalho foram medidos, adotando-se o critério de medir apenas os locais que ficam localizados no térreo e no subsolo da empresa, já que o edifício tem andares superiores.

Tempo de Exposição. O tempo de exposição foi de cerca de 3 meses. Este tempo, considerado a concentração de atividade esperada em residências (100 a 600 Bq/m³), é suficiente para fornecer os dados necessários e não deixar que haja sobreposição de traços. A densidade de traços obtidos, descontados o *background* e considerado o fator de calibração do sistema, foi usada para o cálculo da concentração de atividade de radônio.

A Figura 7 mostra uma foto de câmara/detector em um dos locais monitorados neste trabalho.



Figura 7 - Foto de câmara/detector em ponto de monitoração

3.2.1.4 Revelação dos detectores CR-39

O processo de revelação dos traços dos detectores CR-39 é bastante conhecido, e baseia-se na revelação química por meio de uma solução de NaOH, em banho-maria. Mais especificamente, a partir do trabalho de Ahn e Lee (2005), que prevê revelação em solução

6M de NaOH, a 70°C, por 8 horas, fez-se um estudo prévio para definição dos parâmetros de revelação.

Para este estudo prévio foram irradiados 15 detectores CR-39 em fonte emissora de radônio de alta concentração, para garantir um número grande de traços latentes. Os detectores foram revelados em solução 6,25M de NaOH a 70°C, com tempo de revelação que variou de 10 minutos a 14 horas, com monitoração do tamanho dos traços a cada 10 minutos na primeira hora, a cada 30 minutos nas 6 horas seguintes e a cada hora nas 7 horas restantes.

Os traços começaram a aparecer para aumento óptico de 100 vezes, ainda insipientes, a partir de 330 minutos de revelação, mas o tamanho ótimo foi obtido para 14 horas de revelação (da ordem de 50 *micra*). O Apêndice B mostra uma tabela contendo os resultados deste estudo preliminar.

Desta forma, definiu-se a revelação ótima com solução de 6,25 M de NaOH, a 70°C, por 14 horas. A Figura 8 mostra uma região de um detector revelado, visualizada em microscópio óptico, com aumento de 100 vezes.



Figura 8 - Imagem de microscópio de um detector CR-39 após revelação

3.2.1.5 Contagem dos traços

A contagem dos traços foi feita de forma manual, em microscópio óptico, aumento de 100 vezes, com auxílio de um contador automático e uma tela de divisão da área de visualização. A área útil considerada foi de 1cm², área que permite boa varredura. Observa-se que os detectores CR-39 utilizados foram preparados pelo fabricante para que esta área de 1cm² seja bem determinada para ter boa repetitividade.

3.2.1.6 Eficiência do sistema de detecção

A eficiência do sistema de detecção utilizado foi obtida em trabalho conjunto com o CDTN, onde cerca de 20 detectores CR-39 encapsulados em câmaras de difusão, como as mostradas na Figura 3, foram enviados para um laboratório especializado no Japão (NIRS, 2010). Metade dos detectores foi exposta à baixa concentração de radônio (1.02 kBq/m³) e outra metade à alta concentração (9.9 kBq/m³), em ambiente calibrado, por cerca de 100 horas. Os detectores foram devolvidos aos laboratórios do CDTN e da UTFPR onde foram revelados e lidos.

Os detectores de background foram utilizados para se definir o zero da calibração e seu erro associado. A partir disto, obteve-se uma reta que associa a concentração (eixo x) ao número de traços (eixo y). Após a projeção dos erros (da concentração e do número de traços) para somente o eixo da concentração, fez-se uma rotação dos eixos, com a devida propagação dos erros, para que a concentração seja função do número de traços, o que facilita os cálculos.

Todo o cálculo da calibração é descrito em detalhes no Apêndice C.

O processo de análise dos dados levou à construção da equação de calibração, mostrada na Equação 3.1, onde C é a concentração de radônio em Bq/m³ do local medido.

$$C = (405 \pm 30).n(Bq.cm^2.h.m^{-3})$$
 Eq. 3.1

Onde n é o número de traços/hora de exposição em 1cm² do detector.

Portanto, a equação 3.1 é a base para os cálculos das concentrações *indoor* nas residências monitoradas neste trabalho.

3.2.2 Níveis de concentração de ²²²Rn em águas de poços da região de Curitiba

Para medir as concentrações de radônio e de rádio em águas de poços da região de Curitiba foram feitas coletas de amostras dos poços e coleta de dados por meio de detector de medidas instantâneas - *AlphaGUARD portable radon monitor (Genitron Instruments)*. As medidas são comentadas em detalhes a seguir.

3.2.2.1 O medidor instantâneo AlphaGUARD para medidas em água

O equipamento AlphaGUARD (Genitron Instruments, 1998) é um aparelho portátil e compacto para medidas contínuas de concentração de radônio bem como de parâmetros ambientais como temperatura, pressão e umidade. O equipamento mede radônio e filhos sem diferenciá-los. Tem eficiência comprovada na detecção de radônio, resposta rápida aos gradientes de concentração, bem como não necessita de cuidados específicos especiais de manutenção para operações de longo prazo.

O AlphaGUARD é a peça central de um sistema portátil compacto de medidas contínuas de concentração de radônio e filhos bem como de parâmetros climáticos e taxas de dose gama, que pode ser operado independentemente ou com fonte de energia e usa com base o princípio da câmara de ionização pulsada. Em umidades do ar extremas, o aparelho também proporciona valores de medidas razoáveis e não-sensibilidade tanto a vibrações quanto a choques.

Uma bomba suga o ar continuamente. Dessa forma os subprodutos (filhos) do radônio são separados em um filtro. A atividade alfa dos filhos acumulados é medida por uma câmara de ionização alfa-sensível que é colocada no lado oposto do filtro. Então, a atividade alfa é transferida como um sinal TTL 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.

A Figura 9 mostra um esquema do circuito AlphaGUARD para medidas de radônio em água.



Figura 9 - Imagem de microscópio de um detector CR-39 após revelação

O detector de radônio do AlphaGUARD é baseado no *design* otimizado da câmara de ionização pulsada. Em operações regulares de radônio em ar, os gases entram por difusão por meio da grande superfície do filtro de fibra de vidro dentro da câmara de ionização. Por exemplo, através do filtro de fibra de vidro somente a fase gasosa, o ar e os isótopos do²²²Rn podem passar, enquanto os filhos do radônio são impedidos de entrar na câmara de ionização. O filtro também protege de contaminação por partículas de poeira.

As medidas de radônio em água são feitas indiretamente, ou seja, tanto para medidas em ambientes (ar) e medidas em água o equipamento mede o radônio do ar do sistema. Portanto, para medidas de água, há que se liberar o gás da amostra para o ar de um sistema fechado, por meio de um tubo degaseificador, e será o ar contido no sistema que então será medido.

Para desenvolvimentos gráficos regulares, avaliações, arquivamentos e apresentações dos dados é utilizado um pacote de *software*. Os dados são exportados para este *software* DataExpert compatível (WINDOWS e similares).

A Figura 10 mostra uma imagem do detector utilizado nas medidas de concentração em água.



Figura 10 - Equipamento AlphaGUARD em medida de radônio em água

3.2.2.2 Método de coleta de amostras de água de poços

A coleta das amostras foi feita em poços da região de Curitiba, de forma padronizada, tomando os cuidados recomendados pelo fabricante do equipamento (Genitron Instruments, 1998) e de acordo com metodologia já utilizada pelo CDTN (ROCHA e SANTOS, 2008).

As amostras de água foram retiradas dos poços cerca de 1,5 m abaixo da lâmina de água; assim, a água de superfície foi rejeitada e o volume coletado foi de cerca de 1 L, suficiente para medidas posteriores de 100 mL cada.

Para realizar a coleta de amostras de água foram necessários equipamentos simples como: garrafas com tampas, barbante e um peso metálico acoplado preparado para encaixar nas garrafas e propiciar a coleta de forma apropriada. Este procedimento está descrito mais detalhadamente no Apêndice D. As amostras foram levadas o mais rápido possível para o Laboratório de Radiações Ionizantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde ocorreram as medições.

3.2.2.3 Medidas de radônio em água

No circuito do sistema de detecção do AlphaGUARD foi incluída uma bomba de ar que foi ajustada para manter fluxo de ar de 0,5 L/minuto, de acordo com estudo de Schubert *et al.* (2006), que indica fluxo de 0,3 a 0,5 L/min e metodolodia do Laboratório de Radônio do CDTN (ROCHA e SANTOS, 2008).

Cada medida foi feita por cerca de 60 minutos. Foram feitas medidas com intervalos de tempos de alguns dias, e ao final de 2 meses ou mais, uma última medida foi feita.

Posteriormente os dados foram transferidos do aparelho ao computador para análises. Para a visualização dos dados no computador, é utilizado o *software* DataEXPERT (Genitron Instruments, 1998). Esse *software* permite a visualização do gráfico pertencente a cada medição, a concentração de radônio em função do tempo, a temperatura, a umidade e a pressão atmosférica registrada durante a realização da medição.

O *software* fornece também as concentrações máxima, média e mínima com os erros associados, em Bq/m³, que é a medida de ²²²Rn na atmosfera do sistema AlphaGUARD. A correlação entre esta medida com a concentração de ²²²Rn na água é feita a partir dos cálculos explicitados no próximo item.

A Figura 11 mostra uma visualização da interface gráfica do programa.



Figura 11 - Interface gráfica do software DataEXPERT

3.2.2.4 Cálculo da concentração de radônio na água

Os níveis detectados foram calculados levando em conta o volume de água da amostra, a temperatura, a pressão atmosférica (cujo efeito é levado em consideração pelo equipamento) e o volume de ar no sistema.

Lembrando que o aparelho mede o radônio da água indiretamente, a concentração na água $C_{água}$, em Bq/L, é obtida através de cálculos através da equação (3.2) que envolvem a quantidade de radônio detectada por difusão no aparelho AlphaGUARD, a temperatura ambiente, o volume total do aparelho e o volume da amostra de água usada. O coeficiente K é o coeficiente de partição relacionado à temperatura (T(°C)) (Genitron Instruments, 1998).

$$C_{água} = \frac{C_{ar}(\frac{V_{sistema} - V_{amostra}}{V_{amostra}} + K) - C_{bg}}{1000}$$
(3.2)

Onde: $C_{água}$ é a concentração de radônio na água, em Bq/L, da amostra; C_{ar} é a concentração [Bq/m³] do ar do sistema depois de ser expelido da água; C_{bg} é a concentração de radônio antes do início das medidas (*background*); $V_{sistema}$ é o volume [mL] do interior do sistema analisado; $V_{amostra}$ é o volume [mL] de água da amostra.

O coeficiente de partição K foi calculado seguindo as recomendações do Manual de usuário do equipamento AlphaGUARD (Genitron Instruments, 1998), que apresenta um gráfico baseado na formulação descrita por Clever (1985), apresentada na Equação 3.3.

$$K = 0,105 + 0,405 \cdot e^{-0,502 \cdot T(^{\circ}C)}$$
(3.3)

3.2.2.5 Curva de decaimento do radônio e do rádio

Considerando o equilíbrio secular, para casos onde a constante de decaimento λ de um elemento é muito maior que do outro, vale a expressão vista na Equação 3.4, deduzida a partir da teoria mostrada no item 2.3.2, especificamente apresentada para o caso do ²²²Rn e do ²²⁶Ra.

$$A_{Rn}(t) = A_{\circ Ra}(1 - e^{-\lambda_{Rn}t})$$
(3.4)

Onde $A_{Rn}(t)$ é a concentração medida de ²²²Rn no tempo t e A_{0Ra} é a concentração inicial (constante) de ²²⁶Ra na amostra λ_{Rn} é a constante de decaimento do ²²²Rn.

No caso da representação da concentração de atividade para amostras de água medidas neste trabalho, deve ser levado em consideração também que no momento inicial existe também concentração de radônio advindo do solo e já presente na amostra, que decai naturalmente.

Assim, a Equação 3.5, mostra a concentração de radônio em função da concentração inicial de ²²²Rn e ²²⁶Ra.

$$A_{Rn}(t) = A_{0Ra}(1 - e^{-\lambda_{Rn}t}) + A_{0Rn}(e^{-\lambda_{Rn}t})$$
(3.5)

Onde $A_{Rn}(t)$ é a concentração medida de ²²²Rn no tempo t, A_{0Ra} é a concentração inicial (constante) de ²²⁶Ra na amostra, A_{0Rn} é a concentração inicial de ²²²Rn na amostra e λ_{Rn} é a constante de decaimento do ²²²Rn.

Observa-se que a primeira parcela da equação se refere à geração de ²²²Rn pelo decaimento do ²²⁶Ra na amostra, e a segunda parcela se refere ao ²²²Rn que existe na amostra devido à difusão do gás do solo para a água.

Neste momento, a partir da formulação deduzida apresentada, calculou-se, com o auxílo do programa ORIGIN 8.1, as concentrações iniciais de ²²²Rn e ²²⁶Ra (A_{0Rn} e A_{0Ra}) a partir das medidas feitas da concentração de ²²²Rn $A_{Rn}(t)$ em intervalos de tempos conhecidos.

É importante ressaltar que os valores de concentração de atividade de radônio $A_{Rn}(t)$ plotadas para a construção da curva, foram acompanhados de seus erros, e na construção da curva obteve-se os valores das concentrações iniciais A_{0Ra} e A_{0Rn} , com seus respectivos erros, menores que os erros de cada medida isolada, como era de se esperar devido ao ajuste da curva.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Exposição indoor

4.1.1 Cálculo da concentração de ²²²Rn indoor

Considerando a eficiência do sistema, apresentada no item 3.2.1.6, calculou-se as concentrações de ²²²Rn nos detectores expostos nas residências e nos postos de trabalho. A Tabela 9 apresenta as concentrações nos ambientes: sala (A) e quarto (B) e seus erros associados.

	Exposição (dias)	Detector	Densidade de traços (n° de traços/cm ²)	Concentração nos ambientes (Bq/m³)	Erro da concentração (Bq/m³)
C 01	0.5	А	194	38,5	2,9
Casa 01	85	В	175	34,7	2,6
Cara 02	0.5	А	117	23,2	1,7
Casa 02	85	В	394	78,2	5,8
Casa 03	05	А	221	43,9	3,3
Casa 05	85	В	196	38,9	2,9
C 04	07	А	164	32,2	2,4
Casa 04	80	В	214	42,0	3,1
Cara 05	0.5	А	369	73,3	5,4
Casa 05	85	В	174	34,5	2,6
Casa 06	05	А	227	45,1	3,3
Casa vo	83	В	234	46,5	3,4
Case 07	07	А	292	56,6	4,2
Casa 07	87	В	228	44,2	3,3
Casa 08		А	250	50,2	3,7
Casa U8	84	В	260	52,2	3,9
Casa 00	70	А	204	43,6	3,2
Casa 09	19	В	226	48,3	3,6

Tabela 9 - Concentrações de 222Rn nas residências

	Exposição	Detector	Densidade de traços	Concentração	Erro
C 10	0.0	Α	280	52,5	3,9
Casa 10	90	В	316	59,3	4,4
Casa 11	20	А	151	28,6	2,1
Casa 11	89	В	244	46,3	3,4
Casa 12	80	Α	267	50,6	3,8
Casa 12	89	В	262	49,7	3,7
Casa 13	00	Α	197	36,9	2,7
Casa 15	90	В	306	57,4	4,3
Casa 14	112	А	228	34,1	2,5
Casa 14	115	В	273	40,8	3,0
Casa 15	02	А	139	25,5	1,9
Casa 15	92	В	263	48,2	3,6
Casa 16	00	А	232	43,5	3,2
Casa 10	90	В	248	46,5	3,4
Case 17	07	А	167	32,4	2,4
Casa 17	07	В	244	47,3	3,5
Cara 19	97	А	177	34,7	2,6
Casa 10	8 86	В	178	34,9	2,6
Case 10	117	Α	616	88,9	6,6
Casa 19	11/	В	357	51,5	3,8
Casa 20	96	Α	262	51,4	3,8
Casa 20	80	В	297	58,3	4,3
Casa 21	96	Α	184	36,1	2,7
Casa 21	80	В	324	63,6	4,7
Case 22	80	А	172	36,3	2,7
Casa 22	80	В	213	44,9	3,3
Casa 23	07	А	190	36,9	2,7
Casa 23	87	В	274	53,2	3,9
Casa 24	105	А	441	70,9	5,3
Casa 24	105	В	128	20,6	1,5
Cara 25	100	А	204	34,4	2,6
Casa 25	asa 25 100	В	297	50,1	3,7
Case 26	110	Α	295	45,3	3,4
Casa 26	110	В	248	38,1	2,8
C	105	А	227	36,5	2,7
Casa 27	105	В	304	48,9	3,6

Tabela 9 – Concentrações de ²²²Rn nas residências (continuação)

	Exposição	Detector	Densidade de traços	Concentração	Erro
C	140	А	522	62,9	4,7
Casa 28	140	В	413	49,8	3,7
Cara 20	204	А	464	38,4	2,8
Casa 29	204	В	438	36,2	2,7
Casa 20	107	А	236	37,2	2,8
Casa 30	107	В	413	65,1	4,8
Casa 21	100	А	169	26,2	1,9
Casa 51	109	В	639	98,9	7,3
Casa 22	112	А	361	54,4	4,0
Casa 52	112	В	330	49,7	3,7
Cara 22	97	А	130	25,5	1,9
Casa 55	80	В	177	34,7	2,6
Casa 34	05	А	153	30,4	2,3
Casa 34	83	В	273	54,2	4,0
Cara 25	97	А	217	42,6	3,2
Casa 55	5 86	В	373	73,2	5,4
C	36 85	А	116	23,0	1,7
Casa 30		В	142	28,2	2,1
Casa 27	107	А	140	22,1	1,6
Casa 57	107	В	201	31,7	2,4
Casa 29	111	А	163	24,8	1,8
Casa Jo	111	В	250	38,0	2,8
Casa 20	107	Α	160	25,2	1,9
Casa 39	107	В	177	27,9	2,1
Casa 40	111	А	270	41,1	3,0
Casa 40	111	В	297	45,2	3,3
Casa 41	112	А	250	37,7	2,8
Casa 41	112	В	266	40,1	3,0
Casa 42	Q /	Α	174	35,0	2,6
Casa 42	04	В	195	39,2	2,9
Casa 42	85	A	22	4,4	0,3
Casa 43	65	В	238	47,3	3,5
Casa 44	80	Α	181	38,2	2,8
Casa 44	00	В	192	40,5	3,0
Case 45	140	Α	593	71,5	5,3
Casa 45	140	В	515	62,1	4,6

Tabela 9 – Concentrações de ²²²Rn nas residências (continuação)

	Exposição	Detector	Densidade de traços	Concentração	Erro
Care AC	204	А	786	65,0	4,8
Casa 40	204	В	505	41,8	3,1
Casa 47	97	А	185	36,3	2,7
Casa 47	Casa 4 / 86	В	189	37,1	2,8
C	07	А	394	77,3	5,7
Casa 48	asa 48 86	В	1635	320,8	23,8
	Casa 49 86	А	144	28,3	2,1
Casa 49		В	159	31,2	2,3
			Média	47,0	3,5

Tabela 9 - Concentrações de ²²²Rn nas residências (continuação)

A primeira coluna apenas relaciona a amostra à residência investigada, a segunda coluna mostra o número de dias de exposição do detector, a coluna 3 identifica o ambiente onde o detector foi instalado, a coluna 4 mostra o número de traços contados em 1 cm^2 de área.

As colunas 5 e 6 mostram os resultados da concentração de ²²²Rn nas residências e os erros das medidas. No final da Tabela 9 encontra-se a média das concentrações de ²²²Rn em residências e o erro da média. A Figura 12 mostra um gráfico de frequência para as medidas em residências.



Figura 12 - Gráfico de frequência para as medidas de ²²²Rn em residências

A Tabela 10 apresenta as concentrações nos postos de trabalho, onde os detectores ficaram expostos por 104 dias.

Posto de trabalho	Densidade de traços (nº de traços/cm²)	Concentração nos ambientes (Bq/m³)	Erro da concentração (Bq/m³)
Posto A	382	56,30	4,2
Posto B	202	27,10	2,0
Posto C	127	14,93	1,1
Posto D	54	3,08	0,2
Posto E	147	18,17	1,4
Posto F	218	29,69	2,2
Posto G	224	30,67	2,3
Posto H	perdido	-	-
Posto I	175	22,72	1,7
Posto J	205	27,58	2,0
Posto K	187	24,66	1,8
Posto L	299	42,84	3,2
Posto M	433	64,58	4,8
Posto N	451	67,50	5,0
Posto O	303	43,49	3,2
Posto P	195	25,96	1,9
Posto Q	229	31,48	2,3
Posto R	285	40,56	3,0
Posto S	274	38,78	2,9
Posto T	316	45,59	3,4
	Média	34,51	3,7

Tabela 10 – Concentrações de 222Rn nos postos de trabalho

A primeira coluna apenas relaciona a amostra ao posto de trabalho investigado, a segunda coluna mostra o número de traços contados em 1 cm² de área. As colunas 3 e 4 mostram os resultados da concentração de ²²²Rn nos postos de trabalho e os erros das medidas. No final da Tabela 10 encontra-se a média das concentrações de radônio nos postos de trabalho e o erro da média. A Figura 13 mostra um gráfico de frequência para as medidas em residências.



Figura 13 - Gráfico de frequência para as medidas de ²²²Rn em postos de trabalho

A partir dos resultados das medidas nas residências e dos postos de trabalho foram emitidos pareceres cujo modelo se encontra no Apêndice E.

As concentrações de radônio *indoor* das residências foram correlacionadas com os locais medidos por meio de um mapa da região. O mapa encontra-se no Apêndice G.

4.1.2 Avaliação das concentrações com relação aos limites recomendados

Os valores encontrados para as medidas de radônio nas residências ficaram dentro da normalidade, segundo os padrões adotados para esta pesquisa e discutidos anteriormente (UNSCEAR, 2000, ICRP 60, 1993).

Em apenas um caso, o valor medido em um dos ambientes ficou entre 200 e 400 Bq/m^3 , nível de atenção. Mas se considerada a média dos dois detectores colocados na residência, o valor fica dentro da normalidade.

Com relação aos postos de trabalho, os valores encontrados foram bastante baixos e em caso algum se encontrou concentrações acima dos 100 Bq/m³. O parecer enviado à empresa seguiu o modelo 3, do Apêndice E.

4.1.3 Dose

O item 2.1.5 deste trabalho apresentou os níveis de referência de 10 mSv/a para avaliação da implementação de ações de intervenção. Este valor, como já foi mencinado, está relacionado à uma concentração de radônio de 300 Bq/m³.

Observando que os valores encontrados ficaram, exceto por uma residência, abaixo dos 100 Bq/m³, e que na residência em exceção o valor médio dos dois detectores instalados ficou abaixo dos 300 Bq/m³, observa-se que a dose equivalente relacionada ao radônio *indoor* é compatível como nível de referência de 10 mSy/a.

4.2 Medidas em águas

4.2.1 Níveis de concentração de ²²²Rn e ²²⁶Ra em águas de poços da região de Curitiba

As concentrações iniciais de ²²²Rn e ²²⁶Ra (A_{0Rn} e A_{0Ra}) foram calculadas a partir das medidas feitas da concentração de ²²²Rn no tempo ($A_{Rn}(t)$), da seguinte maneira:

As medidas de ²²²Rn foram feitas em intervalos de tempos, os quais foram identificados com decaimentos 1, 2,...etc. Considera-se que o radônio medido é proveniente de duas fontes: do solo para a água e do ²²⁶Ra contido na amostra.

Assim, embora não se possa identificar imediatamente qual a contribuição de cada fonte, o processo descrito no item 3.2.2.5, fornece a curva esperada considerando-se as duas fontes, em conjunto, e a partir da equação 3.4, calcula-se as concentrações iniciais mencionadas.

Desta forma, identifica-se a concentração de ²²²Rn no momento da coleta da água, e a concentração de ²²⁶Ra que pode ser considerada constante devido à meia-vida longa do elemento.

A Figura 14 exemplifica o processo de obtenção do resultado para um dos poços monitorados. Do lado esquerdo da figura aparece o gráfico da curva de decaimento para o ²²²Rn e ²²⁶Ra. Do lado direito aparecem as médias das concentrações obtidas nas medidas (na atmosfera do sistema AlphaGUARD) que foram convertidas de Bq/m³ para Bq/L, calculadas de acordo com o item 3.2.2.4, com seus respectivos erros associados.

Do lado direito, em baixo, é mostrada a concentração inicial, calculada a partir da curva de decaimento. Os gráficos de todos os poços monitorados encontram-se no Apêndice F.

Observa-se que o erro da determinação fica reduzido com o ajuste da curva. Isto proporciona um resultado interessante, já que para medidas de radônio, em geral, os erros associados às medidas individuais são grandes, às vezes maiores que as próprias medidas.



Figura 14 – Concentração de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 4

A Tabela 11 apresenta um resumo dos resultados das medidas de radônio em água de poços. Observa-se que a metodologia usada permitiu que também se obtivesse o resultado das concentrações de rádio, além de radônio, já que a curva de decaimento foi construída para estes dois elementos.

A primeira coluna apenas relaciona a amostra ao poço investigado, a segunda coluna mostra a concentração de ²²²Rn no momento da coleta, a coluna 4 mostra a concentração de ²²⁶Ra na amostra e as colunas 3 e 5 mostram os erros associados.

	Concentração de ²²² Rn (Bq/L)	Erro de ²²² Rn (Bq/L)	Concentração de ²²⁶ Ra (Bq/L)	Erro de ²²⁶ Ra (Bq/L)
poço 01	10,2	5,7	0,87	0,72
ро ç о 02	6,7	1,7	1,03	0,34
ро со 0 3	16,5	4,4	0,83	0,49
poço 04	26,1	5,5	0,99	0,54
poço 05	22,1	7,3	0,66	0,86
poço 06	7,7	3,9	0,61	0,55
ро со 0 7	22,6	4,5	1,35	0,63
poço 08	11,6	1,8	1,40	0,49
poço 09	10,0	3,3	1,05	0,70
poço 10	3,6	1,9	1,58	0,74
poço 11	10,9	4,9	2,51	0,82
poço 12	12,2	3,5	1,12	0,62
poço 13	4,0	2,9	0,72	0,36
poço 14	31,8	3,4	1,63	0,32
poço 15	5,2	1,5	1,91	0,63
poço 16	24,5	7,0	2,0	1,5
poço 17	141	31	2,5	2,0
poço 18	196	48	1,6	1,7
poço 19	215	56	1,8	1,8
poço 20	47	15	2,2	2,1
poço 21	6,8	3,0	1,66	0,63
ро ç о 22	1,6	1,3	0,69	0,40
ро ç о 23	40	20	1,25	0,85
poço 24	40	21	1,33	0,96
poço 25	50	23	1,5	1,1
poço 26	74,9	2,5	1,70	0,19
poço 27	72	23	0,50	0,78
poço 28	17,0	5,4	1,84	0,81
poço 29	18,5	2,4	3,73	0,48
poço 30	12,7	4,4	2,56	0,88
poço 31	203	14	6,8	2,0

Tabela 11 – Resultados das concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra nos poços

As concentrações de radônio nas águas de poços foram correlacionadas com os locais medidos por meio de um mapa da região. O mapa encontra-se no Apêndice H.

4.2.2 Avaliação das concentrações com relação aos limites recomendados

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram que cerca de 70% das amostras de águas de poços investigadas ficaram acima de 11,1 Bq/L, valor limitante proposto pela EPA (2000).

No entanto, a mesma agência sinaliza que o radônio contido na água contribui com apenas 1/10.000 de seu valor para a atmosfera do ambiente. Assim, as concentrações encontradas somente podem ser consideradas como risco à saúde se investigado o contexto do uso da água do poço em questão.

Observa-se também que a fonte de ²²²Rn na água é principalmente o solo, já que em caso algum o ²²⁶Ra foi responsável por concentração maior que 11,1 Bq/L, sendo o máximo valor encontrado para esta contribuição, de 6,76 Bq/L, em caso isolado.

Neste ponto, deve-se colocar que existem algumas situações onde há necessidade de ações mitigatórias com relação ao radônio, pois alguns dos poços onde foram encontradas concentrações altas, são usados para abastecer caldeiras de pequenas indústrias na Região Metropolitana de Curitiba, e observou-se que os trabalhadores das empresas permanecem tempo considerável em ambiente conjunto à caldeira.

4.2.3 Propostas de ações mitigatórias

As ações mitigatórias para o uso de águas de poços são simples e não envolvem custos altos. O simples fato de não usar a água diretamente do poço e sim ter uma caixa d'água externa com tempo de descanso de alguns dias diminui a concentração de radônio. A instalação de "lavadeiras" no caminho da água também propicia a diminuição do radônio na água.

4.2.3.1 Implementação de ação mitigatória para o uso de água de poço – Um estudo de caso

No ano de 2008 o Laboratório de Radiações Ionizantes da UTFPR fez medida da água de poço de um local em Curitiba, destinado à construção de residência, com projeto que incluía o uso de água de poço.

A medida mostrou-se acima dos 11,1 Bq/L, e na época, o proprietário se interessou em incluir no projeto construtivo um sistema que diminuísse a concentração de radônio na água a ser usada na futura residência.

O grupo de pesquisa do Laboratório de Radiações fez algumas sugestões e a residência foi então construída fazendo-se a implementação de ação mitigatória para o uso de água do poço do terreno.

Esta ação incluiu o uso de duas caixas d'água, para aumentar o tempo de descanso da água, e o principal, a instalação de um espirrador, que auxilia na saída do radônio.

Após a implementação do sistema foram feitas medidas das concentrações de radônio na água em três locais: no poço (Figura 15), na primeira caixa d'água e na segunda caixa d'água.



Figura 15 - Imagem do poço do estudo de caso

A Figura 16 mostra um esquema do sistema de mitigação em residência de Curitiba.



Figura 16 - Esquema do sistema de mitigação implementado em residência em Curitiba

As medidas foram feitas "*in loco*", portanto não há cálculos devido ao tempo de decaimento das amostras. Os valores das concentrações de radônio se encontram na Tabela 12.

Tabela 12 - Concentrações de radônio em três pontos do sistema de mitigação

Concentração de ²²² Rn	Concentração de ²²² Rn	Concentração de ²²² Rn
(Bq/L) no poço	(Bq/L) na caixa 1	(Bq/L) na caixa 2
37,8±9,8	16,7±5,8	6,5±3,4

Para estas medidas, como foram únicas, observa-se que neste caso, como não foram feitas medidas do decaimento para a construção de curva, como foi feito nas medidas de água apresentadas anteriormente, o erro das medidas é relativamente alto.

No entanto, observa-se que as concentrações de radônio diminuem cerca de 56% na primeira caixa d'água e 83% na segunda caixa d'água, em relação ao poço. Este fato mostra que as ações para mitigação de radônio são viáveis e não exigem grandes modificações nos sistemas usuais da construção civil.

4.3 Correlação entre as medidas *indoor* e dos poços de residências

Em oito locais (residências) houve medidas *indoor* e de água do poço do local. Estes valores já foram apresentados de forma geral nos resultados dos itens 4.1 e 4.2.

Para avaliar se há correlação entre as medidas de água e dos respectivos ambientes, utilizou-se o modelo de regressão linear cujo cálculo apresento coeficiente de correlação igual a -0,68. Este resultado mostrou que apesar de haver uma relação linear moderada entre as variáveis, esta é negativa, portanto, inversa ao que poderia se esperar.

A Tabela 13 apresenta os valores das medidas de concentração para os locais onde há medidas *indoor* e de água de poço.

	Concentração de ²²² Rn (Bq/L) no poço	Concentração de ²²² Rn (Bq/m ³) <i>indoor</i>
poço 01 casa 25	10,2	42,3
poço 02 casa 35	6,7	57,9
poço 07 casa 02	22,6	50,7
poço 08 casa 18	11,6	34,8
poço 12 casa 11	12,2	37,5
poço 13 casa 08	4,0	51,2
poço 14 casa 42	31,8	37,1
poço 27 casa 37	72,5	26,9

Tabela 13 - Concentração de radônio indoor e em águas de poços no mesmo local

Isto corrobora o fato de que não se observa, realmente, uma relação clara entre as medidas de água e dos ambientes. Mesmo nos locais onde a concentração de radônio é alta, como no poço 14 e no poço 27, as concentrações dentro das residências são bastante baixas.

4.4 Influência da geologia nas medidas de radônio

A cidade de Curitiba faz parte da formação Guabirotuba, que por sua vez tem composições graníticas na sua composição. A Figura 17 mostra uma carta geológica da Mineropar (2005) indicando esta formação.



Figura 17 - Carta geológica do Paraná (formação Guabirotuba e outras) (MINEROPAR, 2005)

Os valores altos encontrados para águas de poços podem estar relacionados a esta característica geológica da região, que é fator bastante importante, senão o mais preponderante na contribuição para a concentração de radônio nas águas de poços.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com relação à exposição ao radônio ²²²Rn em residências do Paraná os resultados das concentrações mostraram-se dentro da normalidade, já que nenhum valor foi encontrado acima dos 400 Bq/m³, o que significaria alguma proposta de mitigação. A maioria dos valores ficou abaixo de 100 Bq/m³ e apenas um caso isolado ficou entre 200 e 400 Bq/m³, sendo este local específico selecionado para medidas posteriores a serem feitas pelo Laboratório de Radiações Ionizantes da UTFPR a partir de agosto de 2011.

As medidas de concentrações de radônio nos postos de trabalho mostraram que a empresa, como um todo, tem concentrações *indoor* abaixo de 100 Bq/m³ e ainda, nenhum dos postos teve valor que excedeu esta concentração, não sendo necessárias propostas de mitigação

Os níveis de concentração de ²²²Rn em águas de poços da Região de Curitiba mostraram-se altos, já que cerca de 70% das amostras de águas de poços investigadas ficaram acima de 11,1 Bq/L. Este fato não constitui um problema por si só, já que o tipo de uso da água é determinante para a contribuição do radônio da água para a atmosfera.

No entanto, a região onde os valores de concentração na água foram expressivos coincide com o uso desta água em caldeiras em ambientes frequentados por trabalhadores. Este fato constitui certamente risco à saúde, já que é comprovada a influência do radônio na formação de tumores cancerígenos no pulmão.

A elaboração e qualificação de metodologias para medidas de concentração de radônio no ar e na água foi feita e ficou explicitada por meio de manuais explicativos.

Não houve relação clara entre as medidas *indoor* e de água de poços. Todavia observou-se que as concentrações nos poços, por vezes acima dos limites recomendados, podem estar relacionadas à geologia da região onde foram feitas as medidas.

O estudo de caso apresentado mostrou que medidas prévias de radônio são recomendadas para que um projeto de construção seja implementado. No caso em questão, o conhecimento prévio da concentração de radônio (alta) no poço propiciou a inclusão de um sistema de mitigação, que implementado, mostrou resultados positivos.

Este fato corrobora a necessidade de medidas de radônio no Brasil, que, se considerado o tamanho do país, ainda encontram-se em pequeno número. Todavia,
observa-se um grande interesse sobre o assunto e aumento no número de medidas e pesquisas sobre radônio nos últimos anos.

Isto fica evidente se observados os trabalhos de pesquisas mencionados nesta tese, além de outros, na colaboração já mencionada entre os laboratórios que propiciaram esta pesquisa e na própria produção científica e técnica advinda desta colaboração.

Com relação às sugestões para trabalhos futuros, fez-se a proposta de se repetir a medida *indoor* que ficou acima de 200 Bq/m³, o que deve ser feito em breve pelo Laboratório de Radiações da UTFPR, já que o morador está disposto a participar de mais uma tomada de dados.

Há também sugestões no que toca o aperfeiçoamento dos gráficos de decaimento, bem como no método de obtenção das concentrações iniciais de ²²²Rn e ²²⁶Ra, mas talvez o mais importante seja a extenção das investigações sobre estas concentrações para toda a região Sul do Brasil.

REFERÊNCIAS

ABUMRAD, K.M.; ATALLAH, M.; KULLAB, M.K.; ISMAIL, A. Determination of radon soil concentration levels in the governorate of Irbid, Jordan. **Radiation Measurements**, v. 28, p. 585-588, 1997.

AHN, G.H., LEE, J.K. Construction of an environmental radon monitoring system using CR-39 nuclear track detectors. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 37, n. 4, 2005.

ALMEIDA, R.M.R.; LAURIA, D.C.; FERREIRA, A.C.; SRACEK, O. Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 73, p. 323-334, 2004.

AMARAL, E.C.S. Modificação da Exposição à Radiação Natural Devido a Atividades Agrícolas e Industriais numa Área de Radioatividade Natural Elevada no Brasil. Rio de Janeiro, 1992. Tese de Doutorado. Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, UFRJ.

BONOTTO, D.M., MELLO, C.B. A combined method for evaluating radon and progeny in waters and its use at Guarani aquifer, São Paulo State, Brazil. Journal of Environmental Radioactivity, v. 86, p. 337-353, 2006.

BURKE, A.K.; STANCATO, A.C.; PAULON, V.A. Study of radon emanation from polymer-modified cementitous materials. **Building and Environment**.v. 38, p. 1291-1295, 2003.

CEMBER, H. Introduction to Health Physics. New York: Pergamon Press Inc, 1983.

CLEVER, H.L. Solubility Data Series , Krypton-, Xenon, Radon Gas Solubilities. v. 2, p. 463-468, Pergamon press, Oxford, 1985.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. **NE 3.01. Diretrizes básicas de radioproteção (1998)**. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp . Acesso em: janeiro de 2010.

CNEN – **Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia**. NN 3.01 Diretrizes básicas de proteção radiológica (2005) Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: http://www.cnen.gov.br . Acessado em: janeiro de 2010.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Posição Regulatória 3.01/007**. Níveis de intervenção e de ação para exposição crônica. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

COMMISSION RECOMMENDATION of the Protection of the Public Against Exposure to Radon in Drinking Water Supplies. **Journal of the European Communities**. Document number 4589, 2001.

CORRÊA, J.N. **Avaliação da concentração de gás radônio em ambientes de convívio humano na região metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2006. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia e materiais, UTFPR.

COSMA, C.; MOLDOVAN, M.; DICU, T.; KOVACS, T. Radon in water from Transylvania (Romania). **Radiation Measurements**, v. 43, p. 1423-1428, 2008.

DA SILVA, A. A. R. **Radônio e filhos em residências da Cidade de São Paulo**. São Paulo, 2005. Tese de Doutorado. Instituto de Física, USP.

EISENBUD M.; GESELL, T. Environmental Radioactivity From Natural, Industrial and Military Sources. 4 ed. California, USA: Academic Press, 1997.

EPA - Environmental Protection Agency. National primary drinking water regulations; radionuclides; final rule. v. 65, n. 236, 2000. Washington, D.C, 2000.

FARID, S.M. Indoor and soil radon measurements in Swaziland by track detectors. Journal of Environmental Radioactivity, v. 34, n.1, 1997.

GENITRON INSTRUMENTS. AlphaGUARD portable radon monitors user manual. Germany, 1998.

GERALDO, L.P.; SANTOS, W., MARQUES, A.L.; BOTARI, A. Medidas dos níveis de radônio em diferentes tipos de ambientes internos na região da Baixada Santista, SP. **Radiologia Brasileira**, v. 38, n.4, p. 283-286, 2005.

GODOY, J.M., GODOY, M.L. Natural radioactivity in Brazilian groundwater. Journal of Environmental Radioactivity, v. 85 p.71-83, 2006.

HEYDE, K. Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics. An Introduction Aproach. 2 ed. London: Institute of Physics Publishing, 1999.

HULKA, J., VLCEK, J. THOMAS, J. Natural radioactivity in building materials – Czech experience and European legislation. International Symposium Las Vegas, 2008. **Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists**. NV, 2008.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. ICRP 60 - Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon Press, v. 2, n. 1-3, 1991.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **ICRP 65 - Protection Against Radon-222 at Home and at Work**. Oxford: Pergamon Press, v. 23, n. 2, 1993.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. ICRP 99 - Low Dose Extrapolation of Radiation Related Cancer Risk. Oxford: Pergamon Press, v. 35, n. 4, 2005.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **ICRP 106 Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals.** Oxford: Pergamon Press, v. 38, n. 1-2, 2008.

KHAN, H. A.; QURESHI I. E.; TUFAIL M. Passive dosimetry of radon and its daughters using solid state nuclear track detectors (SSNTDs). **Radiation Protection Dosimetry**, v. 46, n. 3, p. 149-170, 1993.

KUMAR, R., MAHUR, A.K., RAO, N.S., SENGUPTA, D., PRASAD, R. Radon exalation rate from sand samples from the newly discovered high background radiation area at Erasma beach placer deposit of Orissa, India. **Radiation Measurements**, v. 43, p. S508-S511, 2008.

LUCAS, F.D., RIBEIRO, B. F. Radon content in groundwaters drawn from the metamorphic basement, eastern São Paulo state, Brazil. **Radiation Measurements**, v. 42, p. 1703-1714, 2007.

LYMAN, G.H. **Indoor Air Pollution and Health**. Radon. In: Bardana, E.J., Montanaro, A. New York: Marcel Dekker, p. 83-103, 1997.

MAGALHÃES, M.H. **Dinâmica do Radônio no Ar em Ambientes Tropicais**, Rio de Janeiro, 1999. Dissertação de Mestrado. UERJ.

MARQUES, A.L., GERALDO, L.P., SANTOS, W. Níveis de radioatividade natural decorrente do radonio no complexo rochoso da Serra de São Vicente, SP. **Radiologia Brasileira**, v. 39, n.3, p. 215-218, 2006.

MAZUR, D., JANIK, M., LOSKIEWICZ, J., OLKO, P., SWAKON, J. Measurements of radon concentration in soil gas by CR-39 detectors. **Radiation Measurements**, v. 31, p. 295-300, 1999.

MELO, V. P. Avaliação da Concentração de Radônio em Residências do Município de Monte Alegre-PA. Rio de Janeiro, 1999. Dissertação de Mestrado. Instituto de Biofísica, UFRJ.

MINEROPAR. Minerais do Paraná S.A. **Panorama da produção mineral paranaense** 1995-2001: sumário executivo. Curitiba: Mineropar, 2005.

NAZAROFF, W.W., DOYLE, S.M., NERO, A.V., SEXTRO, R.G. (1987). Potable water as a source of airborne Rn-222 in U.S. dwellings: A review and assessment. **Health Physics**, v.52, p. 281-295, 1987.

NAZAROFF, W.W., NERO, A.V. Radon and Its Decay Products in Indoor Air. New York: Wiley, 1988.

NEMAN, R. S. Medida da contaminação radioativa do ar ambiental por radônio-222 e filhos em residências de Campinas-SP, Brasil. Campinas, 2000. Dissertação de Mestrado. Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas.

NEZNAL, M., NEZNAL, M., SMARDA, J. Intercomparison measurement of soil-gas radon concentration. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 72, n.2, p.139-144, 1997.

NIRS. National Institute of Radiological Sciences. **Estudo da eficiência dos detectores CR-39.** Trabalho técnico desenvolvido pelos laboratórios de radônio do CDTN e da UTFPR em 2010.

NNDC. National Nuclear Data Center. **Chart of Nuclides from Brookhaven National Laboratory**. Disponível em: <u>www.nndc.bnl.gov/chart</u>. Acesso em: fevereiro de 2011.

NRPB – **National Radiological Protection Board**. Disponível em: <<u>www.nrpb.org</u>>. Acesso em: março 2009.

ONER, F. YALIM, H.A., AKKURT, A., ORBAY, M. Measurements of radon concentrations in drinking water and the Yesilirmak river water in the area of Amasya in Turkey. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 133, n. 4, p. 223-226, 2009.

PÖRSTENDORFER, J. – Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air – Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment. Commision of the European Communities, 1993.

RAHMAN, S., MATI, N., MATIULLAH, GHAURI, B. Radon exhation rate from the soil, sand and brick samples collected from NWFP and Fata, Pakistan. **Radiation Protection Dosimetry**, v.124, n. 4, p. 392-399, 2007.

REBELO, A.M.A.; BITTENCOURT, V.L.; MANTOVANI, L.E. Anomalias geoquímicas e U e de Th, solos residuais e geoformas em paisagens tropicais úmidas sobre granito. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba: Editora da UFPR, n. 51, p. 33-44, 2002.

RIO DOCE, A.P.C. Determinação da Taxa de Exalação de ²²²Rn em Materiais de Construção. Rio de Janeiro, 1997. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ.

SANTOS, T. O. Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte, 2010. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Nuclear, UFMG.

SHARAF, M. A.; ABO-ELMAGD, M. Thermal Effects on CR-39 Detector Response and Permeability of some Membranes Used in Radon Measurements. **Radiation Measurements**, v. 39, p. 441-445, 2005.

SCHUBERT, M., BUERKIN, W., PENA, P. LOPEZ, A. E., BALCAZAR, M. On-site determination of the radon concentration in water samples: Methodical background and results from laboratory studies and a field-scale test. **Radiation Measurements**, v. 41, p. 492-497, 2006.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, anexo A, 1993. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, anexo I, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Effects of Ionizing Radiation**, anexo E, 2006. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

URBAN, M.; PIESCH, E. Low Level Environmental Radon Dosimetry with a Passive Track Etch Detector Device. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 1, n. 2, p. 97-109, 1981.

VEIGA, L.H.S.; KOIFMAN, S.; MELO, V.P.; AMARAL, E.C.S. Preliminary indoor radon risk assessment at the Poços de Caldas Plateau, MG – Brazil. Journal of Environmental Radioactivity, v. 70, p. 161-176, 2003.

VEIGA, L.H.S.; MELO, V.P.; KOIFMAN, S.; AMARAL, E.C.S. High radon exposure in a Brazilian underground coal mine. Journal of Radiological Protection, v. 24, p. 295-305, 2004.

VILLALOBOS, A. P. O. Medidas do Coeficiente de Difusão do Rn-222 através de Tintas Usadas na Construção Civil. Campinas, 1991. Dissertação de Mestrado. Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas.

WHO – World Health Organization. **Handbook on Indoor Radon**. A Public Health Perspective, Switzerland: WHO press, 2009.

APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES SOBRE RADÔNIO DO GRUPO VINCULADO AO LABORATÓRIO DE RADIAÇÕES DA UTFPR

1. PERNA, Allan Felipe Nunes ; <u>PASCHUK, Sergei Anatolyevich</u> ; CORRÊA, Janine Nicolosi . MEDIDAS DE RADÔNIO EM CASAS E ÁGUAS DE POÇOS DA REGIÃO DE CURITIBA-PR. In: XV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR - SICITE 2010, 2010, Cornélio Procópio, PR. ANAIS DE XV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR - SICITE 2010. Curitiba, PR : Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2010. v. 1. p. 1-4.

2. <u>PASCHUK, Sergei Anatolyevich</u>; CORRÊA, Janine Nicolosi; <u>SCHELIN, Hugo</u> <u>Reuters</u>; BARBOSA, L.; SADULA, T.; MATSUZAKI, C.A. . Radon in Soil Gas Survey in Curitiba (Brazil). In: 4th International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009, 2009, Rio de Janeiro. Innovations in Nuclear Technology for a Sustainable Future. Proceedings of 4th International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009. Rio de Janeiro : Brazilian Association for Nuclear Energy - ABEN, 2009. v. 1. p. 7-10.

3. CORRÊA, Janine Nicolosi ; <u>PASCHUK, Sergei Anatolyevich</u> ; <u>SCHELIN, Hugo</u> <u>Reuters</u> ; BARBOSA, L. ; SADULA, T. ; MATSUZAKI, C.A. . Measurements of Radon Concentration Levels in Drinking Water at Urban Area of Curitiba (Brazil). In: 4th International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009, 2009, Rio de Janeiro. Innovations in Nuclear Technology for a Sustainable Future. Proceedings of 4th International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009. Rio de Janeiro : Brazilian Association for Nuclear Energy - ABEN, 2009. v. 1. p. 1-6.

4. <u>FIOR, Loriane</u>; CORRÊA, Janine Nicolosi; <u>PASCHUK, Sergei Anatolyevich</u>; SCHELIN, Hugo Reuters; PECEQUILO, Brigitte R.S. . RADON ACTIVITY MEASUREMENTS IN RELATION TO CONSTRUCTION MATERIALS. In: 2010 Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA XII), 2010, Ann Arbor, USA. Abstract Book of the 2010 Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA XII). Ann Arbor, USA : The University of Michigan, 2010. v. 1. p. 80-80.

5. <u>PASCHUK, Sergei Anatolyevich</u>; CORRÊA, Janine Nicolosi; <u>SCHELIN, Hugo</u> <u>Reuters</u>; BARBOSA, L.; SADULA, T.; MATSUZAKI, C.A.; DENYAK, Valeriy Viktorovich . NORM CONTAMINACAO PELO 222Rn E SEUS FILHOS EM MATERIAIS DE CONSTRUCAO, SOLO E AGUA. In: XXXIII Reuniao de Trabalho sobre Fisica Nuclear no Brasil, 2010, Campos do Jordão, SP. Programa e Resumos da XXXIII Reuniao de Trabalho sobre Fisica Nuclear no Brasil. São Paulo, SP : Sociedade Brasileira de Física, 2010. v. 1. p. 30-30.

6. <u>PASCHUK, Sergei Anatolyevich</u> ; CORRÊA, Janine Nicolosi ; <u>SCHELIN, Hugo</u> <u>Reuters</u> ; BARBOSA, L. ; SADULA, T. ; MATSUZAKI, C.A. . Measurements of Radon in Soil Gas. In: XXXII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil., 2009, Águas de Lindóia, SP. Resumos de XXXII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil.. São Paulo, SP : Sociedade Brasileira de Física, 2009. v. 1. p. 16-16. **7.** CORRÊA, Janine Nicolosi ; <u>PASCHUK, Sergei Anatolyevich</u> ; <u>SCHELIN, Hugo</u> <u>Reuters</u> ; BARBOSA, L. ; SADULA, T. ; MATSUZAKI, C.A. . Measurements of Radon in Drinking Water (Curitiba, PR, Brazil). In: XXXII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, 2009, Águas de Lindóia, SP. Resumos de XXXII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil. São Paulo, SP : Sociedade Brasileira de Física, 2009. v. 1. p. 15-15

8. Fernanda Cristina Medeiros ; MATOSKI, Adalberto ; CORREA, Janine Nicolosi ; PASCHUK, S. A. ; Ana Carolina Virmond Portela Giovannetti . PROPOSTAS DE AÇÕES DE MITIGAÇÃO DE RADÔNIO EM RESIDÊNCIAS. Tecnologia & Humanismo, v. 34, p. 149-153, 2008.

9. CORREA, Janine Nicolosi ; PASCHUK, S. A. ; FIOR, Loriane ; SCHELIN, Hugo Reuters ; SILVA, Ruben Dario Flores da ; Fabiana Pöttker ; MELO, Vicente de Paula . Rn-222 Measurements at Federal University of Technology (UTFPR, Curitiba, PR, BRAZIL). AIP Conference Proceedings, v. 1034, p. 197-201, 2008.

10. Tatyana Sadula ; PASCHUK, S. A. ; CORREA, Janine Nicolosi . AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE Rn-222 NO AR EM RELAÇÃO AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ. In: XIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 2008, Curitiba, PR. Anais de XIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Curiiba, PR : Universidade Tecnológica Fedeal do Paraná, UTFPR, 2008. v. 1. p. 439-443.

11. Cristiana Akári Matsuzaki ; MATOSKI, Adalberto; CORREA, Janine Nicolosi; PASCHUK, S. A. MEDIDAS DE RADÔNIO EM RESIDÊNCIAS E PROPOSTA DE AÇÕES DE MITIGAÇÃO. In: XII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 2008, Curitiba, PR. Anais de XII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Curitiba, PR : Universidade Tecnológica Federal doParaná, UTFPR, 2008. v. 1. p. 407-411.

12. CORREA, Janine Nicolosi ; FIOR, Loriane ; PASCHUK, S. A. ; SCHELIN, Hugo Reuters ; Brigitte R. S. Pecequilo ; MELO, Vicente de Paula . Rn-222 Studies and Mapping in the City of Curitiba - Brazil. In: 12th International Congress of the International Radiation Protection Association - IRPA 12, 2008, Buenos Aires, Argentina. Proceedings of the 12th International Congress of the International Radiation Protection Association - IRPA 12, 2008, Buenos Aires, Argentina. Proceedings of the 12th International Congress of the International Radiation Protection Association - IRPA 12, 2008, Buenos Aires, Argentina.

13. PASCHUK, S. A. ; CORREA, Janine Nicolosi ; FIOR, Loriane ; SCHELIN, Hugo Reuters ; Fabiana Pöttker ; MELO, Vicente de Paula . Construction Materials and Radon. In: 12th International Congress of the International Radiation Protection Association - IRPA 12, 2008, Buenos Aires, Argentina. Abstracts 0f the 12th International Congress of the International Radiation Protection Association - IRPA 12, 2008. v. 1. p. 446-446.

14. CORREA, Janine Nicolosi ; PASCHUK, S. A. ; SCHELIN, Hugo Reuters ; Fabiana Pöttker ; MATOSKI, Adalberto ; MELO, Vicente de Paula . Rn-222 Studies and Mapping at Curitiba (Brazil). In: 12th International Congress of the International Radiation Protection Association - IRPA 12, 2008, Buenos Aires, Argentina. Abstracts of the 12th International

Congress of the Internationl Radiation Protection Association - IRPA 12, 2008. v. 1. p. 447-447.

15. CORREA, Janine Nicolosi, PASCHUK, S. A., FIOR, Loriane, SCHELIN, Hugo Reuters, MELO, Vicente de Paula, DENYAK, Valeriy Viktorovich, G.I.MIRANDA, Laryssa Rn-222 Indoor Concentration Measurements Related to Construction Materials. AIP Conference Proceedings., v.884, p.501 - 503, 2007.

16. SILVA, Ruben Dario Flores da, CORREA, Janine Nicolosi, PASCHUK, S. A., Fabiana Pöttker, FIOR, Loriane, SCHELIN, Hugo Reuters, MELO, Vicente de Paula ELECTROCHEMICAL ETCHING BATH DEVELOPMENT FOR ALPHA TRACK DETECTORS. In: International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2007, 2007, Santos, SP, Brasil. **Proceedings of International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2007**. Rio de Janeiro, RJ, Brazil: Brazilian Association for Nuclear Energy, ABEN, 2007. v.1.

17. SILVA, Ruben Dario Flores da, PASCHUK, S. A. MONITORAÇÃO DE Rn-222 E FILHOS EM RELAÇÃO AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO In: XII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 2007, Curitiba, PR. Anais de XII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR. Curitiba, PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, 2007. v.1.

18. FIOR, Loriane, CORREA, Janine Nicolosi, PASCHUK, S. A., SILVA, Ruben Dario Flores da, SCHELIN, Hugo Reuters, DENYAK, Valeriy Viktorovich, MELO, Vicente de Paula, MESA, Joel HormazaRn-222 INDOOR CONCENTRATION LEVELS RELATED TO CONSTRUCTION MATERIALS. In: International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2007, 2007, Santos, SP, Brasil. **Proceedings of International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2007**. Rio de Janeiro, RJ: Brazilian Association for Nuclear Energy, ABEN, 2007. v.1.

19. SILVA, Ruben Dario Flores da, CORREA, Janine Nicolosi, PASCHUK, S. A., Fabiana Pöttker, FIOR, Loriane, SCHELIN, Hugo Reuters, MELO, Vicente de Paula ELECTROCHEMICAL ETCHING BATH DEVELOPMENT FOR ALPHA TRACK DETECTORS. In: International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2007, 2007, Santos, SP, Brasil. Abstracts of International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2007. v.1. p.14 – 14.

20. FIOR, Loriane, CORREA, Janine Nicolosi, PASCHUK, S. A., SILVA, Ruben Dario Flores da, SCHELIN, Hugo Reuters, Fabiana Pöttker, MATOSKI, Adalberto, MELO, Vicente de Paula Present Status of Rn-222 Monitoring and Mapping at UTFPR In: XXX Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, 2007, Águas de Lindóia, SP. **Programa e Resumos de XXX Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil**. São Paulo, SP: Sociedade Brasileira de Física, 2007. v.1. p.34 – 34.

21. FIOR, Loriane, CORREA, Janine Nicolosi, PASCHUK, S. A., SILVA, Ruben Dario Flores da, SCHELIN, Hugo Reuters, DENYAK, Valeriy Viktorovich, MELO, Vicente de Paula, MESA, Joel Hormaza Rn-222 INDOOR CONCENTRATION LEVELS RELATED TO CONSTRUCTION MATERIALS. In: International Nuclear Atlantic Conference,

INAC 2007, 2007, Santos, SP, Brasil. Abstracts of International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2007. Rio de Janeiro, RJ: Brazilian Association for Nuclear Energy, ABEN, 2007. v.1. p.183 – 183.

22. FIOR, Loriane, CORREA, Janine Nicolosi, PASCHUK, S. A., SILVA, Ruben Dario Flores da, Fabiana Pöttker, SCHELIN, Hugo Reuters, DENYAK, Valeriy Viktorovich, MELO, Vicente de Paula, MESA, Joel Hormaza Rn-222 Measurements at Federal University of Technology (UTFPR, Curitiba, PR, BRAZIL) In: 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE NATURAL RADIATION ENVIRONMENT (NRE-VIII), 2007, Búzios, RJ, Brasil. Book of Abstracts of 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE NATURAL RADIATION ENVIRONMENT (NRE-VIII). Rio de Janeiro, RJ, Brazil: Natural Radiation Environment Association, 2007. v.1. p.181 – 181.

APÊNDICE B - ESTUDO PRELIMINAR PARA IDENTIFICAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO DE REVELAÇÃO DO CR-39

Tempo de revelação (min)	Visualização dos traços (aumento 100x)
< 330	Não visíveis
330	Incipentes
360	Incipientes
390	Pequenos (identificação visual prejudicada)
420	Pequenos (identificação visual prejudicada)
450	Pequenos (identificação visual prejudicada)
480	Pequenos (identificação visual prejudicada)
540	Pequenos (identificação visual prejudicada)
600	Médios (identificação visual prejudicada)
660	Médios (identificação visual prejudicada)
720	Médios (identificação visual prejudicada)
780	Grandes (identificação razoável)
840	Grandes (tamanho ótimo)

Tabela B1 – Estudo preliminar para definição do tempo de revelação dos detectores

APÊNDICE C - PLANILHA DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE RADÔNIO INDOOR

Este apêndice se refere à calibração dos detectores CR-39 feita em coOperação com o laboratório de radônio do CDTN tendo como base irradiação no laboratório nirs (2010).

- Foram enviados ao Japão, para o laboratório especializado NIRS, 10 detectores da UTFPR e 10 detectores do CDTN.
- Dos detectores, metade foi irradiada com 1,02 kBq/m³ +/- 0,07 por 96 horas e a outra metade com 9,9 kBq/m³ +/- 0,3 por 100 horas.
- Os detectores UTFPR foram lidos, foram eliminados 1 detector de cada irradiação por estarem como traços pequenos prejudicando a leitura.

• Os resultados UTFPR encontram-se na Tabela C1, em conjunto com as leituras de background feitas pela UTFPR e pelo CDTN, que foram elementos base para o cálculo do erro do Zero da calibração.

Detectores UTFPR / Leitura UTFPR Zero UTFPR e Zero CDTN			
Conc. kBq/m ³	erro kBq/m ³	n de traços	
9,9	0,3	2488	
9,9	0,3	2627	
9,9	0,3	2858	
9,9	0,3	3096	
1,02	0,07	391	
1,02	0,07	520	
1,02	0,07	505	
1,02	0,07	367	
Zero1 (detector UTFPR	/ leitura UTFPR)	254	
Zero 2 (detector CDTN/ leitura CDTN)		933	
Zero 3 (detector CDTN/ leitura CDTN)		944	
Zero 4 (detector UTFPR	933		

Tabela C1 - Resultado da leitura dos detectores

• Foi calculado o coeficiente CDTN/UTFPR para o zero, a partir da leitura do detector Zero 1 (UTFPR/UTFPR) e pelo Zero 4 (CDTN/CDTN), pela razão 933/254=3,673228346.

• Foram calculados os valores para as contagens dos detectores Zero 1, 2, 3 e 4, a partir do do coeficiente encontrado. Os resultados encontram-se na Tabela C2.

Leitura	N ^o de traços
UTFPR	254
CDTN	254
CDTN	256,99
Média	255,00
Desvio	1,00

Tabela C2 – Valores do zero (background)

• Devido ao fato de existirem apenas 3 valores de desvio, o mesmo foi corrigido pelo fator de 1,3 (coeficiente de Student para n=3) tendo como resultado o valor de 1,30.

• Dividiu-se o desvio pelo número de horas em que o detector de background ficou aberto desde a abertura do pacote até a revelação: 1,30/2380,3=0,000545.

• Assim, calculou-se a média para as concentrações 9,9 e 1,02 kBq, e pelo fato de existirem apenas 4 valores de concentrações, mutiplicou-se o resultado da média pelo fator de 1,2 (coeficiente de Student para n=4).

Média(9.9 kB)	Desvio	Desvio corrigido pelo fator de 1,2 (n=4)
2770	130	160,24
(Média(9,9 kB)-Background)/hora	Desvio	
25,1	1,6	
Média(1,02 kB)	Desvio	Desvio corrigido pelo fator de 1,2 (n=4)
446	39	47
(Média(1,2 kB)- Background)/hora	Desvio	
1,99	0,49	

Tabela C3 – Média excluído o background, divididos pelo número de horas de exposição

• A Tabela C4 mostra uma síntese dos resultados obtidos para o número de traços por hora e os erros associados, resultados estes usados para a contrução da reta de calibração.

Conc. Bq/m ³	n traços/hora	erro do n traços/hora
Х	у	Erro y
9900±300	25,1	1,6
1020±70	1,99	0,49
0	0	0,000545

Tabela C4 - Resumo dos resultados obtidos

• Os valores da Tabela C4 foram usados para o ajuste de uma reta, feito no programa Origin 8.0. A hipótese da linearidade da função é baseada no fato da deposição dos traços ser diretamente proporcional à concentração de radônio no ar. O Resultado obtido foi a reta:

Reta obtida e erros das constantes	
y=a+bx	
a=0±0,00064	
b=0,00248±0,00018	

• Observando que há erros em x (concentração) e em y (número de traços) fez-se a transferência do erro de x para y. O erro total em y passa a ser a soma estatística dos dois erros (raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros na concentração – calculados na escala dos traços por hora – e os erros dos traços por hora).

• Então ajustou-se uma nova reta (Origin) onde os erros em y foram recorrigidos (de 1,6 foi para 1,8 e de 0,49 foi 0,51).

Reta obtida e erros das constantes	
y=a+bx	
a=0±0,00060	
b=0,00247±0,00018	

• Observa-se que neste caso o número de traços é função da concentração, como de fato. Todavia, para utilização da reta é melhor ter a concentração em função do número de traços. Assim, acha-se a função composta e faz-se a

transferência dos erros de y(x) para o novo y(x) da função composta, por meio da teoria dos erros.

Reta obtida e erros das constantes
y=a+bx
a=0±0,24
b=405±30

Onde y é a concentração de radônio em Bq/m^3 e x é o número de traços por hora.

APÊNDICE D - PROCEDIMENTO PRÁTICO PARA REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM ÁGUA

COLETA DAS AMOSTRAS DE ÁGUA

Para realização da coleta de amostras de água é necessária a utilização do Kit Coleta, o qual é composto pelos seguintes materiais: 4 garrafas, 4 tampas, 1 barbante e 1 peso.

A coleta de amostras deve acontecer com os seguintes procedimentos:

- a. Encaixe o peso na garrafa, amarre o barbante no gargalo e jogue o recipiente aberto segurando a extremidade do barbante;
- b. Deixe a garrafa afundar 1 metro ou mais da superfície da água;
- c. Espere a garrafa encher e puxe-a para fora do poço, evitando derrubar a água;
- d. Tire o barbante e o peso com cuidado;
- e. Ao fechar a garrafa com a tampa, certifique-se que não tenha ficado ar no interior do recipiente. Se necessário, aperte a garrafa nas laterais fazendo com que a água ocupe o recipiente por completo e em seguida, feche-a.

Nota: Repita esse procedimento com todas as garrafas. Anote a Data, o horário e o local da retirada das amostras e entregue-as o mais rápido possível para o Laboratório de Radiações Ionizantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NAS AMOSTRAS DE ÁGUA

Para a medição da concentração do radônio na amostras de água utilizam-se o aparelho AlphaGuard e um conjunto de matérias específicos para realização das medições, AquaKit.

O AquaKit é composto pelos seguintes materiais:

- Espuma de apoio
- Filtro de segurança
- Bomba AlphaPUMP
- 1 tubo de desgaseificação (100ml)

- 1 tubo de segurança (100ml)
- 1seringa plástica
- Mangueiras

MONTAGEM DO AlphaGuard E DO AquaKit

As conexões dos tubos devem ser feitas da seguinte forma:

- a. O bocal inferior do tubo de desgaseificação deve ser unido ao bocal inferior do tubo de segurança. Esta conexão é composta por duas mangueiras de 150 mm com o dispositivo de fechamento rápido (*quick-lock clucht*), conhecido também como "relógio".
- b. O bocal superior do tubo de segurança deve ser conectado ao bocal "IN" do *AlphaPUMP* com a mangueira de 400 mm (intercalar o filtro, se necessário).
- c. O bocal "OUT" do *AlphaPUMP* deve ser conectado com o adaptador ativo localizado na lateral do *AlphaGUARD* (comprimento da mangueira de 500 mm).
- d. O bocal do adaptador de fluxo, atrás do *AlphaGUARD*, deve ser conectado com o bocal superior do tubo de desgaseificação (comprimento da mangueira de 600 mm).

Notas:

É necessário fazer as ligações dos componentes como descrito. Ao manter o fluxo de gás do *AlphaPUMP* dessa maneira, a total segurança do *AlphaGUARD* estará assegurada contra a invasão de água por meio do filtro interno contra água.

Usar somente os tubos originais ou tubos de material similar. Quando utilizar outras mangueiras, prestar atenção se o diâmetro e comprimento são correspondentes aos originais. Caso contrário, as medidas dos valores do sistema devem ser corrigidas. (ver manual *AquaKIT*).

Importante: O material das mangueiras não é comum. É um material que não permite o ²²²Rn sair do sistema. Portanto, outras mangueiras devem ser pesquisadas e estudadas antes de ser utilizada para medições.

As conexões e os anéis de fechamento adjacentes devem ser mantidos longe de partículas de sujeira, ou seja, têm de ser limpos antes da medição

Para a configuração e operação do *AlphaGUARD* e do *AlphaPUMP* leia os manuais separados.

MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NAS AMOSTRAS DE ÁGUA

Para realização das medidas de concentração de radônio nas amostras de água o seguinte procedimento deve ser realizado.

- a. Organize o equipamento com o *AquaKIT*, *AlphaPUMP* e *AlphaGUARD PQ2000 PRO* como descrito anteriormente.
- b. Ligue o monitor do *AlphaGUARD* e selecione o modo de medição "1 min FLOW" (a configuração é feita pelo menu do *AlphaGUARD* ou utilizando o software *AlphaEXPERT*).
- c. Deixe as torneiras tripartidas dos tubos de desgaseificação e de segurança na posição de 3 horas do relógio prevista para a amostragem (para detalhes ver o manual *AquaKIT*).
- d. Com a seringa, transfira a amostra de água para o tubo de desgaseificação.
- e. Esvazie a seringa lentamente no tubo. Evite fazer bolhas ao transferir a amostra de água.
- f. Deixe as torneiras tripartidas dos tubos de desgaseificação na posição de 6 horas do relógio imediatamente para o modo de medição (para detalhes ver o manual *AquaKIT*). Com isso o ciclo de gás estará fechado.
- g. Remova a injeção plástica do soquete de conexão vertical do tubo de desgaseificação.
- h. Escolha o nível de fluxo do *AlphaPUMP* para a escala de 0,5 L/min.
- i. Coloque o interruptor de operação do *AlphaPUMP* na posição "ON" (começa a medição da amostragem).
- j. Realize a medição durante 60 minutos e desligue os equipamentos.
- k. Remova a amostra de água medida da unidade de desgaseificação e reúna o equipamento. Desconecte o tubo do adaptador ativo na parte traseira do *AlphaGUARD*.
- Escolha o nível de fluxo do *AlphaPUMP* para a escala de 1 L/min e deixe o interruptor na posição "ON" (limpeza da instalação de medição com ar ambiente).
- m. Se a amostra apresentar uma concentração de ²²²Rn elevada, faça a limpeza do equipamento utilizando a bomba de carvão ativo.

Notas:

Maiores explicações para a operação do *AlphaGUARD*, *AlphaPUMP* e *AlphaEXPERT* podem ser obtidas em seus respectivos manuais

Ao iniciar a medição, anote em uma folha o número da corrida, que aparece no visor do AlphaGuard, e os seguintes dados: hora loca, hora do aparelho, data, temperatura, pressão, e umidade do ar. Ao término da medição, após uma hora, estes dados também devem ser anotados.

Fazer quatro medições com intervalo de aproximadamente dois dias entre elas para verificar a curva de decaimento do ²²²Rn. Repetir o procedimento em todas as medições.



APÊNDICE E – GRÁFICOS DAS MEDIDAS DE ÁGUAS DE POÇOS

Figura E01 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 1



Figura E02 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 2



Figura E03 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 3



Figura E04 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 4



Figura E05 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 5



Figura E06 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 6



Figura E07 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 7



Figura E08 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 8



Figura E09 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 9



Figura E10 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 10



Figura E11 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 11



Figura E12 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 12



Figura E13 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 13



Figura E14 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 14



Figura E15 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 15



Figura E16 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 16



Figura E17 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 17



Figura E18 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 18



Figura E19 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 19



Figura E20 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 20



Figura E21 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 21



Figura E22 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 22



Figura E23 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 23



Figura E24 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 24



Figura E25 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 25



Figura E26 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 26



Figura E27 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 27



Figura E28 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 28



Figura E29 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 29



Figura E30 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 30



Figura E31 – Concentrações de ²²²Rn e ²²⁶Ra para o poço 31

APÊNDICE F - PARECER RESIDÊNCIAS (NORMAL), PARECER RESIDÊNCIA (ATENÇÃO) E PARECER EMPRESA



Ministério da Educação Universidade Tecnológica Federal do Paraná Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial Av. Sete de Setembro, 3165 – 80230-901 – Curitiba – PR Brasil



E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Ofício nº 20/06/2011-1

Curitiba, 20 de junho de 2011.

Ao: Sr. Fulano Referência: Medidas da Concentração de Radônio (²²²Rn) em Residência (Endereço completo)

PARECER TÉCNICO (Modelo 1)

Introdução

Com o objetivo de pesquisa, o Grupo do Laboratório de Radiações Ionizantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR realizou duas medidas da Concentração de radônio (²²²Rn) nas dependências da residência descrita acima, em Curitiba, capital do Paraná. Portanto, este parecer técnico tem como fim apresentar algumas considerações relevantes sobre os resultados encontrados.

Análise da Coleta de Dados

Vimos por meio desta, primeiramente, apresentar os agradecimentos pelo apoio e oportunidade de realizar nossa pesquisa sobre o gás radônio em ambientes. Os dados obtidos em sua residência contribuíram muito para nossos estudos e, consequentemente, para a compreensão das concentrações de radônio na região de Curitiba.

Comunicamos que, segundo os limites estabelecidos pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Ionizantes - UNSCEAR e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica - ICRP, a concentração de gás radônio no interior de ambientes entre 0-200 Bq/m³ é considerada normal, de 200-400 Bq/m³ é tida como nível de atenção, de 400-600 Bq/m³ sugere-se uma monitoração continuada com ações mitigadoras e que acima do valor de 600 Bq/m³ recomenda-se intervenção para ação mitigadora. Como os resultados das medidas dos dois detectores instalados em sua residência por um período de XX dias apresentaram concentrações de radônio de XX,XX Bq/m³ e XX,XX Bq/m³ consideramos que os valores obtidos estão dentro da normalidade, segundo os órgãos internacionais mencionados acima, e que não há recomendações quanto a possíveis ações mitigadoras a serem adotadas.

Agradecemos pela atenção. Grupo de Pesquisa sobre radiações ionizantes da UTFPR


Ministério da Educação **TPR** Universidade Tecnológica Federal do Paraná Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial Av. Sete de Setembro, 3165 - 80230-901 -Curitiba – PR Brasil



Ofício nº 20/06/2011-48

Curitiba, 20 de junho de 2011.

Ao: Sr. Fulano Referência: Medidas da Concentração de Radônio (222Rn) em Residência (Endereço Completo).

PARECER TÉCNICO (Modelo 2)

Introdução

Com o objetivo de pesquisa, o Grupo do Laboratório de Radiações Ionizantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR realizou duas medidas da Concentração de radônio (222Rn) nas dependências da residência descrita acima, em Curitiba, capital do Paraná. Portanto, este parecer técnico tem como fim apresentar algumas considerações relevantes sobre os resultados encontrados.

Análise da Coleta de Dados

Vimos por meio desta, primeiramente, apresentar os agradecimentos pelo apoio e oportunidade de realizar nossa pesquisa sobre o gás radônio em ambientes. Os dados obtidos em sua residência contribuíram muito para nossos estudos e, consequentemente, para a compreensão das concentrações de radônio na região de Curitiba.

Comunicamos que, segundo os limites estabelecidos pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Ionizantes - UNSCEAR e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica - ICRP, a concentração de gás radônio no interior de ambientes entre 0-200 Bq/m³ é considerada normal, de 200-400 Bq/m³ é tida como nível de atenção, de 400-600 Bq/m³ sugere-se uma monitoração continuada com ações mitigadoras e que acima do valor de 600 Bq/m³ recomenda-se intervenção para ação mitigadora. As medidas obtidas pelos dois detectores instalados em sua residência por um período de 86 dias apresentaram concentrações de radônio de XXX,XX Bq/m³ e XXX,XX Bq/m³. Consideramos que os valores obtidos estão dentro da normalidade, segundo os órgãos internacionais mencionados acima, e que não há recomendações quanto a possíveis ações mitigadoras a serem adotadas apesar de um dos detectores ter apresentado valor de concentração de radônio dentro do nível de atenção. Gostaríamos de repetir as medidas em sua residência, se possível, para uma nova avaliação.

Agradecemos pela atenção.

Grupo de Pesquisa sobre radiações ionizantes da UTFPR



Ministério da Educação

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

Av. Sete de Setembro, 3165 – 80230-901 – Curitiba – PR Brasil



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Ofício nº 05/05/2011 2011.

Curitiba, 5 de maio de

À Empresa X Referência: Medidas da Concentração de Radônio (²²²Rn) na Unidade Y - Edifício Tal

PARECER TÉCNICO (Modelo 3)

Introdução

Atendendo solicitação, o Grupo de Pesquisa do Laboratório de Radiações Ionizantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR foi requisitado a fazer medidas da Concentração de radônio (²²²Rn) nas dependências da Unidade Y da Empresa X, edifício Tal, em Curitiba, capital do Paraná. Portanto, este parecer técnico tem como objetivo apresentar algumas considerações relevantes sobre os resultados encontrados.

Análise da Coleta de Dados

Foram instalados 20 (vinte) detectores CR-39, distribuídos em pontos distintos dos pavimentos inferiores Unidade Y da Empres X. Os dados foram coletados durante o período de 29/10/2010 a 10/02/2011. Dos 20 (vinte) detectores instalados foram recolhidos 19, com perda de um detector e uma câmara. Os 19 detectores recolhidos e mais dois detectores de *background* foram revelados e lidos nas dependências do Laboratório de Radiações Ionizantes da UTFPR. Os resultados das concentrações, em Bq/m³, estão contemplados na tabela abaixo.

DADOS REFERENTES ÀS CONCENTRAÇÕES DE Rn MEDIDAS NAS DEPENDÊNCIAS DA UNIDADE Y DA EMPRESA X			
Local de Instalação do Detector	Concentração Bq/m ³	<i>Erro Bq/m³</i>	
Sala dos seguranças	56,3	4,2	
Corredor	27,1	2,0	
Recepção	14,9	1,1	

Sala "Saúde"	3,08	0,23
Recepção subsolo	18,2	1,4
Sala "Treinamento"	29,7	2,2
Sala reunião 3 (subsolo)	30,7	2,3
Sala reunião 4 (subsolo)	Detector perdido	_
Sala vídeoconferência (subsolo)	22,7	1,7
Sala reunião 14 (subsolo)	27,6	2,0
Sala reunião 13 (subsolo)	24,7	1,8
Sala de limpeza (subsolo)	42,8	3,2
Sala 15 (subsolo)	64,6	4,8
Sala da Telecomunicações		
(subsolo)	67,5	5,0
Sala da telefonisa (subsolo)	43,5	3,2
Sala de monitoramento (subsolo)	26,0	1,9
Sala do xerox (subsolo)	31,5	2,3
Ambiente 1 da Unidade	40,6	3,0
Ambiente 2 da Unidade	38,8	2,9
Ambiente 3 da Unidade	45,6	3,4
Média dos Resultados	34,5	
Desvio Padrão (σ)	16,1	
Desvio Médio (σ_m)	3,7	
Resultado (média ± erro)	<i>34,5</i> ± <i>3,7</i>	

Conclusões

Segundo os limites estabelecidos pela United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation – UNSCEAR (2000) e o International Commission on Radiological Protection – ICRP (1993), para radônio indoor, em Bq/m³, considera-se: 0-200 (normal), 200 a 400 (atenção), 400 a 600 (monitoração continuada com ações mitigadoras), acima de 600 (intervenção para ação mitigadora).

Todos os locais medidos apresentaram concentrações de radônio abaixo de 200 Bq/m^3 , sendo que a média ficou em $34,5 \pm 3,7 Bq/m^3$, menor do que as médias encontradas até agora em residências da cidade de Curitiba - PR.

Por fim, considerando os valores obtidos das concentrações das medidas realizadas no local mencionado acima não há recomendações quanto a possíveis ações mitigadoras a serem adotadas.

Grupo de Pesquisa sobre radiações ionizantes da UTFPR

APÊNDICE G – MAPA DE CONCENTRAÇÕES DE ²²²Rn *INDOOR*

CONCENTRAÇÃO DE ²²²Rn EM AMBIENTES INTERNOS DE CURITIBA E REGIÃO METROPOLITANA



APÊNDICE H - MAPA DE CONCENTRAÇÕES DE ²²²Rn EM ÁGUAS

CONCENTRAÇÃO DE ²²²Rn EM ÁGUAS DE POÇOS DE CURITIBA E REGIÃO METROPOLITANA

