

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

LAÉRCIO BARBOSA

**ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO-222 NAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS E SOLO DE CURITIBA E REGIÃO
METROPOLITANA**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2011**

LAÉRCIO BARBOSA

**ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO-222 NAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS E SOLO DE CURITIBA E REGIÃO
METROPOLITANA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Área de Concentração em Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk.

**CURITIBA
2011**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B238 Barbosa, Laércio

Análise da concentração de radônio-222 nas águas subterrâneas e solo de Curitiba e região metropolitana / Laércio Barbosa — 2011.

108 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Sergei Anatolyevich Paschuk.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2011.

Bibliografia: f. 77-82.

1. Radon. 2. Câmaras de ionização. 3. Águas subterrâneas – Curitiba (PR) – Análise. 4. Águas subterrâneas – Região Metropolitana de Curitiba (PR) - Análise. 5. Solos - Medição. 6. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Paschuk, Sergei Anatolyevich, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Título da Dissertação Nº 556

**“Análise da Concentração de Radônio-222 nas
Águas Subterrâneas e Solo de Curitiba e Região
Metropolitana”**

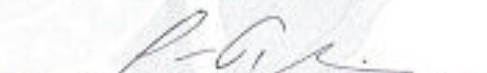
por

Laércio Barbosa

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE 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 9h do dia 31 de março de 2011. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:



Prof. Sergei Anatolyevich Paschuck, Dr.
(Presidente – UTFPR)



Prof. Joaquim Teixeira de Assis, Dr.
(UFRJ)



Prof. Valeriy Denyak, Dr.
(UTFPR)



Prof. Hugo Reuters Schelin, Dr.
(UTFPR)

Visto da coordenação:



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

Conhecereis a verdade e a verdade vos libertará (Jesus Cristo).

AGRADECIMENTOS

A Deus pela ajuda nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Sergei Anatolyevich Paschuk por suas idéias e incentivos.

Ao Prof. Hugo Reuters Schelin pelos incentivos.

Aos meus familiares.

Aos meus colegas, Janine, Tatyana, Cristiane, Allan pelo grande apoio para o desenvolvimento da pesquisa.

À UTFPR por toda sua estrutura

Ao Instituto de Águas do Paraná por indicar as localizações de poços artesianos.

A Sanepar por ter permitido a coleta de águas em seus poços artesianos.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

Ao amigo Edney Milhoretto

A amiga Karina Cristina Mafra

Ao Prof. Valeriy, pela ajuda em algumas coletas de campo e no desenvolvimento de algumas equações.

Às empresas que cederam amostras de águas de seus poços artesianos.

Às pessoas que forneceram amostra de águas oriundas de poços e permitiram a análise do solo.

BARBOSA, Laércio. Análise da concentração de ^{222}Rn nas águas subterrâneas e solo de Curitiba e região metropolitana. Dissertação Mestrado (Engenharia Biomédica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2011.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado apresenta um estudo da concentração do ^{222}Rn nas águas subterrâneas de Curitiba e Região Metropolitana, além de medições realizadas no solo e as concentrações do ^{226}Ra na água. A pesquisa mostra os passos para aquisição das amostras de águas nos poços convencionais e artesianos de Curitiba e Região Metropolitana, a determinação da concentração do ^{222}Rn com a câmara de ionização AlphaGUARD®, a construção de uma sonda e uma broca especial para coletar o ^{222}Rn no solo, a metodologia para a coleta do gás no solo e a determinação da concentração do ^{226}Ra através de equações com base nos valores de concentrações do ^{222}Rn . Foram coletadas amostras de 47 locais. Nas concentrações de ^{222}Rn na água houve uma maior frequência de amostras com valor de concentração entre 20,1 Bq/L a 50 Bq/L. Nas concentrações de ^{226}Ra a maior frequência de incidência se encontra entre 1,1 Bq/L e 2,0 Bq/L. No solo foram feitas medições em 4 regiões, onde a maior concentração encontrada foi 38523 Bq/m³. A região Sul de Curitiba foi o local onde foram encontradas as concentrações de ^{222}Rn e ^{226}Ra mais altas.

Palavras-chave: Radônio. Rádio. Câmara de ionização.

BARBOSA, Laércio. Analysis of concentration of ^{222}Rn in groundwater and soil in Curitiba and urban region. Dissertação Mestrado (Engenharia Biomédica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2011.

ABSTRACT

This present study describes the concentration of ^{222}Rn in groundwater in Curitiba and urban region, and measurement made in soil, and concentrations of ^{226}Ra in water. The research shows the steps for acquisition of water samples in conventional wells and boreholes in Curitiba and urban region, the determining the concentration of ^{222}Rn with the ionization chamber AlphaGUARD®, the construction of a probe and a special drill to collect the ^{222}Rn soil, the methodology for collecting the gas in the soil, and determining the concentration of ^{226}Ra using equations based on the values of concentrations of ^{222}Rn . Samples were collected from 47 locations. There was a higher frequency of samples with concentration of ^{222}Rn between 20.1 Bq/L to 50 Bq/L, and concentration ^{226}Ra between 1.1 Bq/L to 2.0 Bq/L. In the ground were made measurements in four regions, where the highest concentration found was 38,523 Bq/m³. The southern region of Curitiba was the place where there were higher concentrations of ^{222}Rn and ^{226}Ra .

Keywords: Radon. Radium. The ionization chamber.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - AMOSTRAS DE ^{222}Rn COLETAS NO BRASIL POR ESTADOS	16
FIGURA 2 - ESTRUTURA DA MATÉRIA	18
FIGURA 3 - ISÓTOPOS DO HIDROGÊNIO	19
FIGURA 4 - DECAIMENTO DO ^{226}Ra COM EMISSÃO DE PARTÍCULA ALFA	20
FIGURA 5 - TIPOS DE RADIAÇÕES E PENETRAÇÃO	20
FIGURA 6 - SÉRIE DO ACTINÔNIO ^{235}U	22
FIGURA 7 - SÉRIE DO TORÔNIO ^{232}Th	23
FIGURA 8 - SÉRIE DO URÂNIO ^{238}U	23
FIGURA 9 - ESCALA DE WENTWORTH	27
FIGURA 10 - ROCHA SEDIMENTAR PONTA GROSSA – PR.	27
FIGURA 11 - GRANITO – SERRA DO MAR – PARANÁ	28
FIGURA 12 - BASALTO - CATARATAS DO IGUAÇU	28
FIGURA 13 - SOLO DE CURITIBA	29
FIGURA 14 - AQÜÍFEROS	30
FIGURA 15 - TIPOS DE AQÜÍFEROS	31
FIGURA 16 - AQÜÍFERO KARST REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA	31
FIGURA 17 - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	33
FIGURA 18 - LABORATÓRIO ONDE O ELEMENTO RÁDIO FOI DESCOBERTO	34
FIGURA 19 - JORNAL DAILY TIMES DE CHICAGO 1937	34
FIGURA 20 - TRABALHAR COM NÍVEIS DE RADIAÇÃO ELEVADOS	37
FIGURA 21 - DOSE EFETIVA COLETIVA	38
FIGURA 22 - DOSE EFETIVA SEM EXPOSIÇÕES MÉDICAS	38
FIGURA 23 - INALAÇÃO DO RADÔNIO	40
FIGURA 24 - EMANAÇÃO DO RADÔNIO DE UM GRÃO NO SOLO	43
FIGURA 25 - FONTES E VIAS DE EXPOSIÇÕES PELO RADÔNIO	46
FIGURA 26 - FORMAÇÃO DE RADICAIS LIVRES	51
FIGURA 27 - DNA REPRESENTAÇÃO EM DUAS DIMENSÕES	51
FIGURA 28 - DNA SIMPLES QUEBRA	51
FIGURA 29 - DNA DUPLA QUEBRA	52
FIGURA 30 - DESENVOLVIMENTO DE TUMOR POR PARTÍCULAS ALFA	53

FIGURA 31 - DETECTORES DE ^{222}RN	56
FIGURA 32 - DETECTOR DE CARVÃO ATIVADO	56
FIGURA 33 - CÂMARA DE DIFUSÃO.....	57
FIGURA 34 - CÂMARA IÔNICA DE ELETRETO.....	58
FIGURA 35 - MONITOR CONTÍNUO DE ^{222}RN ALPHAGUARD®.....	58
FIGURA 36 – DISPOSITIVO PARA COLETA DE ÁGUA.....	60
FIGURA 37 - POÇO ARTESIANO - COLETA.....	61
FIGURA 38 - ALPHAGUARD®.	61
FIGURA 39 - FLOW MODE COM OPERAÇÃO EM 1 MINUTO.....	62
FIGURA 40 - ALPHAPUMP.....	63
FIGURA 41 - MONTAGEM DO ALPHAGUARD® PARA ANÁLISE DE ÁGUA.....	64
FIGURA 42 - CURVA DE DECAIMENTO DO ^{222}RN E CONCENTRAÇÃO DO ^{226}RA .	65
FIGURA 43 - FOTO DA BROCA, SONDA E HASTE	66
FIGURA 44 - PONTA DA BROCA	66
FIGURA 45 - SONDA	66
FIGURA 46 - VISUALIZAÇÃO DA PONTA DA SONDA FECHADA E ABERTA.....	67
FIGURA 47 - SONDA INSERIDA NO SOLO	68
FIGURA 48 - CONECTOR DA SONDA À CÂMARA DE IONIZAÇÃO.....	68
FIGURA 49 - MONTAGEM DO ALPHAGUARD® PARA MEDIÇÃO DO SOLO.....	69
FIGURA 50 - MEDIÇÃO DO ^{222}RN NO SOLO REGIÃO UMBARÁ	69
FIGURA 51 - MEDIÇÃO DO ^{222}RN NO SOLO REGIÃO JARDIM BOTÂNICO	70
FIGURA 52 - CONCENTRAÇÃO DE ^{222}RN NA ÁGUA POR REGIÕES	71
FIGURA 53 - CONCENTRAÇÕES DE ^{226}RA NA ÁGUA POR REGIÕES	72
FIGURA 54 - FREQUÊNCIA X CONCENTRAÇÕES DE ^{222}RN NA ÁGUA	73
FIGURA 55 - FREQUÊNCIA X CONCENTRAÇÕES DE ^{226}RA NA ÁGUA	73
FIGURA 56 - CONCENTRAÇÕES DE ^{222}RN NO SOLO POR REGIÕES	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - FATOR QUALIDADE.....	25
TABELA 2 - CRONOLOGIA DO RADÔNIO.....	30
TABELA 3 - CONCENTRAÇÃO DE ^{238}U E ^{232}Th NAS ROCHAS E SOLOS.....	41
TABELA 4 - ÁREAS DE RISCO DE RADÔNIO	42
TABELA 5 - CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NOS AMBIENTES DE CONVÍVIOS HUMANOS E NÍVEIS PARA TOMADA DE AÇÕES.....	47
TABELA 6 - CONCENTRAÇÃO DE ^{222}Rn NA ÁGUA DE ACORDO COM AS REGIÕES GEOGRÁFICAS DO BRASIL.....	49
TABELA 7 - CONCENTRAÇÃO DE ^{226}Ra NA ÁGUA DE ACORDO COM AS REGIÕES GEOGRÁFICAS DO BRASIL.....	49
TABELA 8 - DOSE EQUIVALENTE NOS TECIDOS POR CONTÍNUA EXPOSIÇÃO DE 1 Bq/m^3 DE ^{222}Rn NO AR	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
WHO	World Health Organization
ICRP	International Commission on Radiological Protection
UNSCEAR	United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
USEPA	United States Environmental Protection Agency
SI	Sistema Internacional
PET	Politereftalato de etileno
RMC	Região Metropolitana de Curitiba
ABINAM	Associação Brasileira de Indústria de Água Mineral
NCRP	National Council on Radiation Protection
WL	Working Level
OMS	Organização Mundial da Saúde

LISTA DE SÍMBOLOS

- a – massa atômica
- A atividade
- α partícula alfa.
- β partícula Beta
- γ radiações gama
- Rn radônio - 222
- Ra rádio - 226
- eV elétron-volt
- Ci Currie
- Bq Bequerel
- E dose equivalente
- W_R fator qualidade
- D dose absorvida
- $t_{1/2}$ Meia vida
- z número atômico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 A IMPORTÂNCIA DO PROBLEMA	14
1.3 A DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 CONCEITOS GERAIS	18
2.1.1 Estrutura da Matéria	18
2.1.2 Radioatividade	19
2.1.3 Séries Naturais	22
2.1.4 Grandezas e Unidades da Física das Radiações	24
2.2 GEOLOGIA	26
2.2.1 Solos de Curitiba	29
2.2.2 Aquíferos	30
2.2.3 Água Subterrânea	32
2.3 RÁDIO	33
2.4 RADÔNIO	35
2.4.1 Radônio no solo	40
2.4.2 Radônio – solo para o ar	43
2.4.3 Radônio no interior dos ambientes de convívio humano	44
2.4.4 Dinâmica da entrada de Radônio	44
2.4.5 Níveis de Radônio	47
2.5 RADIOATIVIDADE NA ÁGUA	48
2.6 EFEITOS DO ²²² Rn NA SAÚDE	50
2.6.1 Dosimetria do ²²² Rn inalado e seus riscos	53
2.6.2 Dose no pulmão pelo ²²² Rn	54
2.6.3 Dose em outros órgãos além do pulmão pelo ²²² Rn	54
2.6.4 Produtos de decaimento do ²²² Rn durante o banho	55
2.7 DETECÇÃO DE ²²² Rn	55
3 METODOLOGIA	59
3.1 ORIGENS DAS AMOSTRAS PARA COLETA	59
3.2 INFORMAÇÕES SOBRE A LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS	59

3.3 COLETAS DE AMOSTRA PARA POÇOS CONVENCIONAIS.....	59
3.3.1 Coletas de amostra para poços artesianos.....	60
3.4 EQUIPAMENTO ALPHAGUARD®.....	61
3.5 AQUISIÇÕES DAS CONCENTRAÇÕES DAS ÁGUAS DOS POÇOS	63
3.5.1 Concentrações de rádio nas águas dos poços	64
3.6 AQUISIÇÕES DA CONCENTRAÇÃO DO RADÔNIO NO SOLO	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5 CONCLUSÃO.....	75
5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
REFERÊNCIAS	77
APÊNDICES	83
ANEXOS.....	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal dessa pesquisa é avaliar a concentração do gás radônio nas águas subterrâneas e nos solos de Curitiba e Região Metropolitana.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Coletar amostras de águas de poços comuns e poços artesianos para analisar a presença do ^{222}Rn em vários bairros da cidade de Curitiba e Região Metropolitana.
- Construir uma sonda para medidas de concentração de radônio no solo.
- Realizar medidas de concentração de radônio no solo.
- Avaliar a concentração do ^{222}Rn nas águas dos poços de Curitiba e Região Metropolitana.
- Avaliar a concentração do ^{226}Ra nas águas dos poços de Curitiba e Região Metropolitana.

1.2 A IMPORTÂNCIA DO PROBLEMA

O radônio, descoberto em 1900 por Dorn, é um gás inerte, incolor e possui uma densidade de $9,73 \text{ kg/m}^3$ (densidade do ar é $1,2 \text{ kg/m}^3$). Há vinte isótopos conhecidos do radônio. Entre os principais são o ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Rn . O ^{222}Rn , da série radioativa natural do ^{238}U , vem do decaimento do ^{226}Ra e tem um meia-vida de 3,823 dias. O ^{220}Rn , da série radioativa natural do ^{232}Th , é oriundo do decaimento do ^{224}Ra e tem a meia-vida de 55,6 segundos. O ^{219}Rn , da série radioativa natural do ^{235}U , vem do decaimento do ^{223}Ra e tem meia-vida de 3,96 segundos. Todos são emissores de partículas alfas. A sua inalação representa um grande risco à saúde (LANL, 2003).

O ^{222}Rn é comumente chamado de radônio e seus produtos de meia-vida curta são o ^{214}Po , o ^{214}Bi e o ^{214}Pb enquanto os de meia-vida longa são o ^{210}Bi , o ^{210}Pb , e o ^{210}Po . Estes dois últimos ao decaírem emitem partículas alfas e representam um risco à saúde (IPEN, 2009; WHO, 2004).

A exposição das células à radiação ionizante, como as partículas alfas do radônio, podem iniciar uma série de eventos celulares e moleculares que poderão culminar no desenvolvimento de cânceres pulmonares (HALL, 1994).

A inalação do radônio é considerada a principal causa de câncer de pulmão depois do cigarro (IAEA, 2004; ICRP 60, 1991; NCI, 2004; NRPB, 2004; UNSCEAR, 2000; ALBERG, 2007).

Nos Estados Unidos, China e países europeus, estudos mostram uma clara associação entre os riscos de câncer de pulmão e a exposição residencial pelo radônio (UNESCEAR, 2006).

De 157.400 mortes por câncer de pulmão em 1995, nos Estados Unidos, 21.100 (13,4%) foram apontadas como causa, o radônio. As mortes induzidas por este gás tende a ocorrer mais cedo do que por outras causas. A média ocorre aos 65 anos, sendo que por outras causas ocorrem aos 72 anos. (USEPA, 2003).

Um estudo de 20 casos controlados de exposição residencial pelo radônio, na América do Norte, durante um intervalo de 5 a 30 anos, mostrou que há um aumento de 11% nos cânceres pulmonares em pessoas expostas a 100 Bq/m^3 de concentração do gás (KREWSKI, LUBEN, 2005).

Com base em um estudo realizado com a participação da República - Checa, França, Canadá, Austrália, Estados Unidos, Suécia e China envolvendo aproximadamente 68.000 mineradores. Sabe-se que 2.700 morreram de câncer pulmonar (BEIR VI, 1999).

A mais importante fonte de exposição de curto prazo pelo radônio é ocorrida durante o banho. A concentração média da água fria na torneira foi de 60.000 Bq/m^3 , na média 6.000 Bq/m^3 permaneceram no vapor após o banho (FITZGERALD, 1997).

Segundo a legislação do código de águas minerais da ABINAM, as fontes minerais que contiverem radônio em dissolução, obedecendo aos seguintes limites na temperatura de 20°C e 760 mm de Hg de pressão são classificadas como: fracamente radioativas com teor de radônio compreendido entre $67,28$ e $134,5 \text{ Bq/L}$, radioativas com teor entre $134,5$ e Bq/L e

fortemente radioativas com teor acima de 672,8 Bq/L (BRASIL, 1945) Em uma pesquisa na internet verificou que apenas 3 empresas de águas mineiras do total de 7 colocam no rótulo das águas comercializadas esta informação.

Segundo o Ministério da Saúde, o qual estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, a radioatividade global alfa não deverá exceder 0,1 Bq/L (BRASIL, 2004).

As concentrações de radônio em quatro medições realizadas no aquífero Guarani no Paraná encontraram-se entre 41,83 e 57,34 Bq/L (BONOTTO, 2004).

No ano de 2006, foi construído um mapa com amostras coletadas no Brasil. Estas foram separadas por Estados, conforme figura 1 (GODOY, 2006).



Figura 1. Amostras de ^{222}Rn coletas no Brasil por Estados

Fonte: GODOY (2006).

No Estado de São Paulo, Brasil, em 2008, foram analisadas 162 amostras de águas de 8 municípios. As concentração de ^{222}Rn encontradas variaram de 0,04 a 204,9 Bq/L (BONOTTO, 2008).

Devido ao interesse de órgãos internacionais em se conhecer os níveis de exposição das pessoas ao radônio e a pouca quantidade de dados no Brasil, o grupo da UTFPR, com colaboração do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), iniciou uma pesquisa das concentrações do ^{222}Rn no ar (em ambientes de convívio humano), na água e no solo em Curitiba e Região Metropolitana.

Portanto, esta pesquisa esteve voltada para a realização dos levantamentos das concentrações de ^{222}Rn nas águas subterrâneas e no solo na cidade de Curitiba e Região Metropolitana.

1.3 A DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa tem como objetivo a determinação da concentração de ^{222}Rn nas águas subterrâneas na cidade de Curitiba e Região Metropolitana, além das concentrações no solo. A pesquisa foi composta por atividades para chegar aos objetivos esperados:

- levantamento dos locais que possuem poços artesianos, no Instituto de Águas do Paraná.
- levantamento dos locais que possuem poços convencionais, através de contatos com a comunidade.
- pesquisas na internet para descobrir os telefones da lista fornecida pelo Instituto de Águas do Paraná. Após esta etapa entrar em contato com as pessoas para permitirem a coleta de amostras de águas.
 - desenvolvimento de uma sonda para coleta do gás ^{222}Rn no solo.
 - definição de metodologia para as coletas de água e no solo.
 - coletas de amostras de água de: poço artesiano, convencional e solo.
 - aquisição de dados com o equipamento AlphaGUARD®.
 - cálculos para estimar a concentração do ^{226}Ra .

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITOS GERAIS

2.1.1 Estrutura da Matéria

Matéria é tudo o que tem massa e volume. Massa é a quantidade de matéria que um objeto possui e volume é a quantidade de espaço ocupado por este objeto. As estruturas fundamentais das substâncias são formadas por átomos. Estes são constituídos por um núcleo e uma eletrosfera. O núcleo é formado pelos prótons (partículas de cargas positivas) e pelos nêutrons (partículas de mesma massa, mas sem carga) (Figura 2). O número de prótons (Z) identifica o elemento químico.

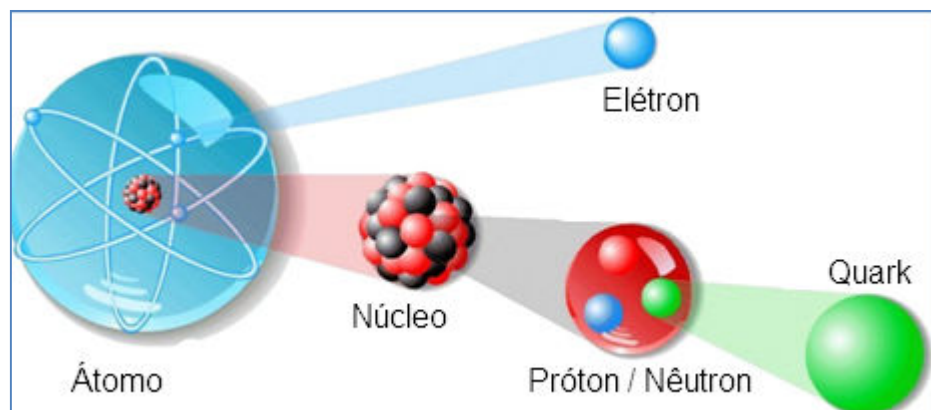


Figura 2. Estrutura da matéria

Fonte: UTORONTO (2009)

Os isótopos – são átomos de um mesmo elemento químico, mas com massas diferentes, pois o número de nêutrons de um núcleo pode variar, visto que este não possui carga elétrica (figura 3).

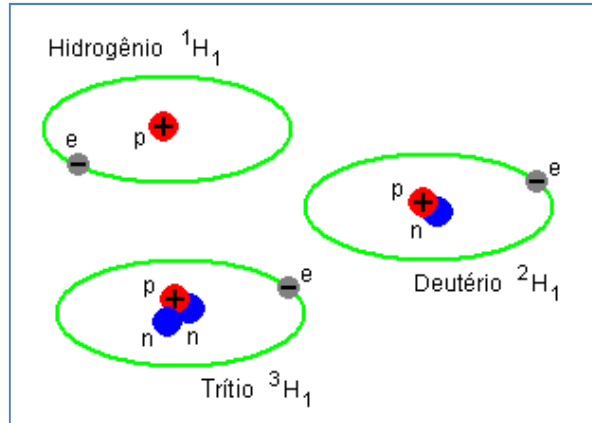


Figura 3. Isótopos do hidrogênio

Fonte: PORTAL SÃO FRANCISCO (2005)

2.1.2 Radioatividade

Na natureza tudo o que existe busca a estabilidade. Os núcleos podem ser estáveis ou instáveis dependendo do número de prótons e nêutrons. Núcleos instáveis passam por transformações emitindo o excesso de energia até atingir a estabilidade. Este processo é denominado radioatividade ou decaimento radioativo.

As principais maneiras de um núcleo se desintegrar são através de emissão de partícula alfa, partícula beta e radiações gama.

Partícula alfa (α) – consiste na emissão de uma partícula contendo dois prótons e dois nêutrons, similar ao núcleo do ${}^4\text{He}$. As partículas alfas são mais pesadas e com mais cargas que as partículas betas e radiações gamas e por este motivo tem pequeno alcance de penetração, podendo ser barradas por uma folha de papel. No ar, as partículas alfas provenientes de fontes naturais não ultrapassam mais que 10 a 18 cm (IPEN 2002; UFRGS, 2002) (figura 4).

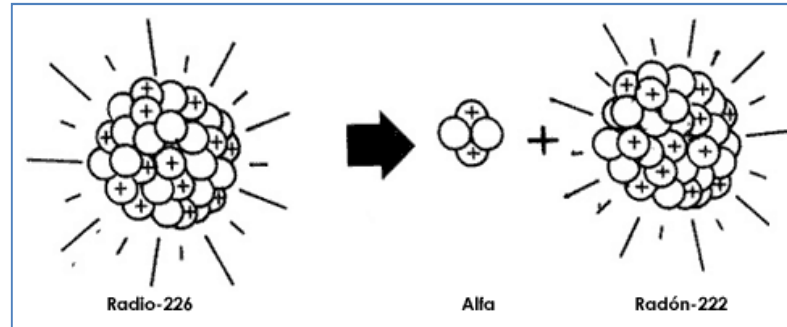


Figura 4. Decaimento do ^{226}Ra com emissão de partícula alfa

Fonte: BIBLIOTECA DIGITAL (2002).

Partícula Beta (β) – a radiação beta pode ser emitida de todos os tamanhos de núcleos. Quando um núcleo instável é rico em nêutrons ele emitirá uma partícula beta negativa (elétron) e mais um anti-neutrino. Quando um núcleo instável é rico em prótons ele emitirá um pósitron (partícula com mesma massa do elétron, mas carga positiva) e mais um neutrino.

Radiações gama (γ) – são raios eletromagnéticos de altas frequências. Estes podem ser produzidos pelas interações de partículas subatômicas ou em processos astrofísicos. No núcleo, estes raios são produzidos através do rearranjo das partículas nucleares e são destinadas a eliminar o excesso de energia. As intensidades de energias são características de cada elemento. Os raios gamas e raios-x são do mesmo tipo de radiação, porém a origem é diferente, ou seja, os raios gamas são produzidos no núcleo e os raios-x nas camadas de elétrons. Os raios gama não possuem massa e nem carga, assim interagem menos com a matéria do que as partículas ionizantes, por esta razão, têm um grande poder de penetração (Figura 5).

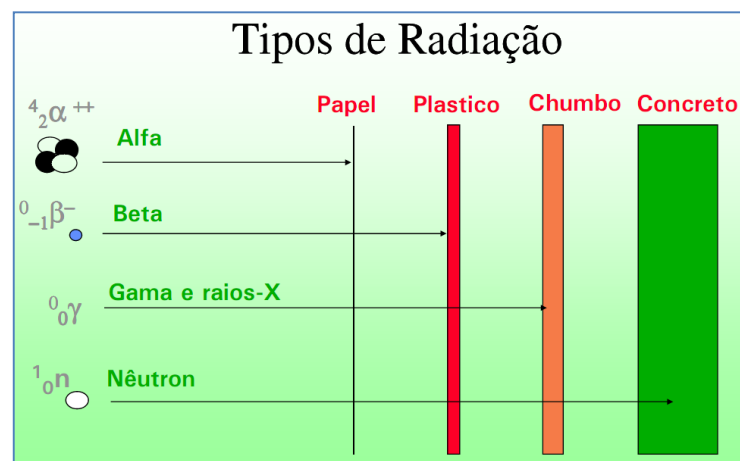


Figura 5. Tipos de Radiações e Penetração

Fonte: IPEN (2002)

História da radioatividade

- 1895 - Wilhelm C. Röntgen descobre os raios-x (CHOPPIN, 1995).
- 1898 – Becquerel, após a descoberta de Röntgen, descobre a radioatividade, cujo nome foi dado por Marie S. Curie (SNYDER, 1997).
- 1900 - Ernest Rutherford e Pierre Curie de forma independente identificaram as partículas alfas e beta. No mesmo ano Paul Willard identificou outra espécie de radiação eletromagnética que dominou de radiação gama (FONSECA, 2001).
- 1903- Ernest Rutherford propõe a existência do núcleo e que as emissões alfa, beta e gama eram fenômenos que ocorria com núcleos instáveis ficando conhecido como decaimento radioativo.
- 1932 – James Chadwick comprovaram a existência do nêutron (HUGHES, 1959).
- 1934 – Irène Curie e Frédéric Joliot descobriram a radioatividade artificial.
- 1934 – Enrico Fermi descobre a fissão nuclear.
- 1938 – Otto Hahn e Fritz Stassmann detectaram a presença de bário ($z=56$), após bombardear o urânio ($a=238$) com nêutrons além de notarem que houve a liberação de 2 ou 3 nêutrons e energia.
- 1940 – Surge o projeto Manhattan com o objetivo dos Estados Unidos desenvolverem uma bomba com base em energia nuclear. Este projeto foi proposto por Albert Einstein temendo que a Alemanha desenvolve-se a primeiro (PROJETO MANHATTAN, 2004).
- 1945 – no dia 16 de julho a primeira bomba é detonada no estado de Novo México EUA.
- 1945 – no dia 6 de agosto uma bomba é detonada em Hiroshima e após três dias é detonada outra em Nagasaki.
- 1986 – no dia 26 de abril ocorreu o mais grave acidente nuclear da história em Chernobyl na Ucrânia (DUPUY, 2007).
- 1987 – no dia 13 de setembro acontece o acidente em Goiânia com a cápsula de ^{137}Ce (CÉSIO, 2008).

2.1.3 Séries Naturais

Há quatro séries de decaimento. Cada uma é definida pelo mais pesado elemento natural. As séries são: ^{235}U (Série do Actinônio) (figura 6), ^{232}Th (Série do Torônio) (figura 7), ^{238}U (Série do Urânio) (figura 8) e o ^{237}Np (Série do Neptúnio). A série do Neptúnio não inclui nenhum isótopo do radônio. Uma das mais interessantes é a série do Urânio, pois esta inclui o ^{222}Rn , sendo este o único elemento gasoso da série. Este é um problema porque todos os produtos de decaimento desta série permanecem na terra ou no mar, porém o ^{222}Rn chega a atmosfera ou nas residências.

Os produtos de decaimento do ^{222}Rn são: $^{218}\text{Po} \Rightarrow ^{214}\text{Pb} \Rightarrow ^{214}\text{Bi} \Rightarrow ^{214}\text{Po} \Rightarrow ^{210}\text{Pb} \Rightarrow ^{210}\text{Bi} \Rightarrow ^{210}\text{Po}$. Há outros sinônimos para produtos de decaimento como ^{222}Rn filhos. O ^{218}Po é formado por carga positiva, este produz 1 trilhão de colisões até se tornar-se neutro. O ^{214}Pb possui uma energia de 100 keV. O ^{214}Bi possui apenas alguns elétrons volts e não tem energia suficiente para promover ionização.

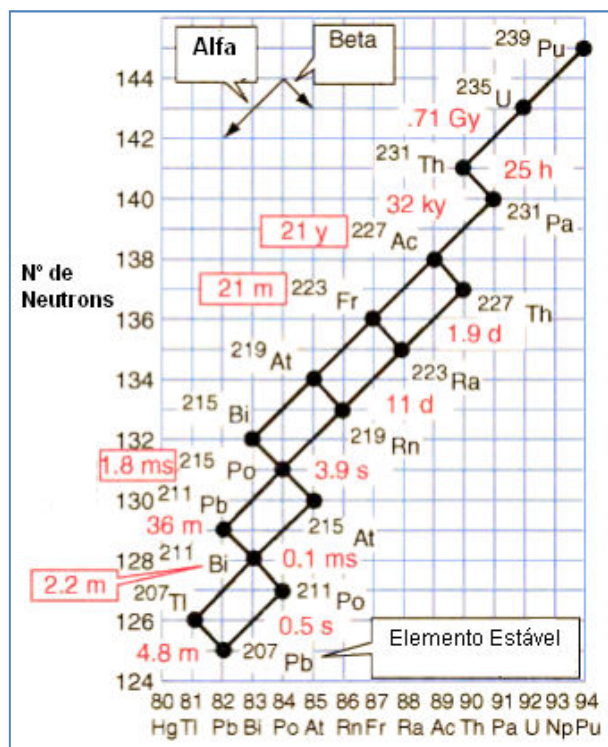


Figura 6. Série do Actinônio ^{235}U

Fonte: HYPERPHYSICS (2000)

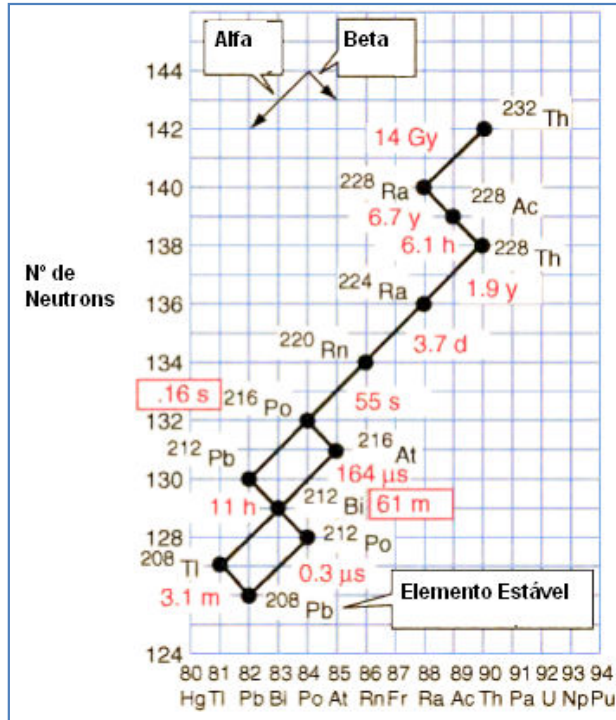


Figura 7. Série do Torônio ^{232}Th

Fonte: HYPERPHYSICS (2000)

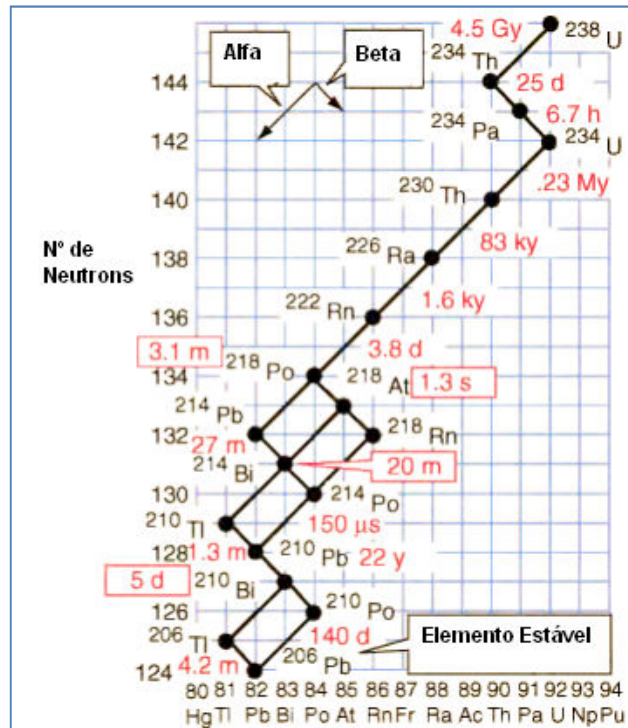


Figura 8. Série do Urânio ^{238}U

Fonte: HYPERPHYSICS (2000)

2.1.4 Grandezas e Unidades da Física das Radiações

Elétron volt - é definida como a quantidade de energia cinética ganha por um elétron quando acelerado por um diferencial de potencial elétrico de 1 volt.

Erg - é definida como a quantidade de trabalho feito pela força de 10^{-5} kgf pela distância de um centímetro.

Joule - é definida como a quantidade de energia aplicada de 1 Newton sobre a distância de 1 metro ou o trabalho necessário para mover a carga de um Coulomb através do diferencial de potencial elétrico.

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ Ergs}$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times \text{m}$$

$$1 \text{ J} = 6,2415 \times 10^{18} \text{ eV.}$$

Atividade - representa o número de átomos radioativos que decai por unidade de tempo. Pode ser medida em Ci (Currie) No SI a unidade é Bq que corresponde a uma desintegração por segundo $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

Meia-vida ($t_{1/2}$) - é definido pelo tempo em que metade dos átomos decai para o próximo nuclídeo na cadeia de decaimento. Se houver hoje 1000 átomos de ^{222}Rn em 3,82 dias irá haver 500 átomos e assim sucessivamente. Este também é chamado de lei de decaimento radioativo e pode ser calculado através da equação (1) e (2).

$$N(t) = N(o) \cdot \exp(-t \cdot \lambda) \quad (1)$$

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

Onde $N(o)$ é a quantidade de átomos iniciais, \ln é o logaritmo neperiano e λ é a constante de decaimento.

Exposição - é a grandeza que mede a quantidade de ionizações produzidas por raios-x e gama no ar. No Sistema Internacional (SI) esta grandeza é C/kg. 1 R (Roentgen) é a quantidade de fótons de energia requerida para produzir $1,610 \times 10^{12}$ pares de íons em 1 cm^3 de ar seco a 0°C e 760 mm Hg. A vantagem desta unidade é por ser fácil de ser medida. A desvantagem é a limitação de ser usada somente para a energia depositada no ar.

Dose Absorvida - como é mais importante conhecer a energia depositada no tecido do que no ar foi desenvolvido o conceito de dose absorvida que é a quantidade de energia

depositada por radiação ionizante em uma determinada massa. 1 rad é definido como 100 ergs / grama. Outra unidade utilizada é o gray (GY) que corresponde a 1 J/kg e 1Gy = 100 rad.

Dose equivalente (rem) - este termo é designado para se determinar o efeito que diferentes tipos de radiação têm sobre os tecidos. Para propósitos de proteção radiológica é muito usada. A dose equivalente é definida pelo produto entre a dose absorvida e o fator qualidade (Tabela 1), o qual varia conforme o tipo de radiação ionizante. Outra unidade usada para dose equivalente é o sievert. 1sievert (Sv) = 100 rem.

Este termo aplica-se a tecidos vivos, conforme equação (3).

$$E = W_R \cdot D \quad (3)$$

Onde E é a dose equivalente, W_R fator qualidade e D dose absorvida.

Tabela 1. Fator qualidade

<i>Tipos de Radiação</i>	<i>Fator Qualidade</i>
Raios-x e Gama	1
Partícula Beta	1
Nêutrons e Prótons com energia desconhecida	10
Partículas com cargas e energia desconhecida	10
Partícula Alfa	20
Partículas de carga e energia desconhecida	20

O equilíbrio secular - ocorre quando a meia-vida do filho é muito inferior quando comparada ao pai. Utilizando-se como exemplo o ^{226}Ra com meia-vida de 1600 anos e o ^{222}Rn com meia-vida 3,82 dias. Verifica-se que a quantidade do ^{226}Ra diminuiu muito pouco em um intervalo de tempo devido sua meia vida de 1600 anos, equação (4). Na equação (5) o ^{222}Rn decai em um intervalo de tempo pequeno, porém novos átomos do ^{222}Rn são produzidos, entrando em equilíbrio. Após um tempo as atividades do pai e do filho se tornam iguais (LEWIS, 2009).

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda \cdot N_1 \quad (4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = +\lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2 \quad (5)$$

A lei de coeficiente de partição - estabelece a distribuição de um soluto entre dois solventes imiscíveis. Este se distribui de modo que a concentração seja constante em ambos os solventes.

2.2 GEOLOGIA

Geologia é a ciência que estuda a composição, estrutura e os fenômenos genéticos formadores da crosta terrestre. Um dos ramos da geologia é a ambiental que estuda os problemas geológicos decorrentes da relação homem e superfície terrestre (GEOLOGIA, 2008).

Descrição e classificação do solo – O relativo fino manto que cobre a superfície da terra é um poroso material com uma grande variedade de propriedades. Este meio sólido consiste de produtos inorgânicos como rochas e produtos orgânicos como a fauna e flora. Alguns destes produtos são restos conhecidos na forma de pedras, areias, grãos, folhas, galhos, caules. Porém outros são resultantes de profundas mudanças químicas como argila e húmus. As suas misturas irão definir o solo.

O solo é composto da fração sólida e da vazia: A fração sólida consiste principalmente de grão de minerais de uma ampla faixa de tamanhos além de incluir pequenas quantidades de materiais orgânicos. A fração vazia consiste de fluídos como água e gases. Esta é conhecida também como porosidade do solo. A fração de água é normalmente chamada de teor de umidade.

Os solos são classificados de acordo com a distribuição do tamanho dos grãos sólidos (figura 9).

Rochas – são agregados de minerais sólidos e são os componentes básicos do solo. Existem três tipos: sedimentares, ígneas e metamórficas.

Intervalo granulométrico (mm)	Nome
>256	Matacão
256 a 64	Bloco ou Calhao
64 a 4,0	Seixo
4,0 a 2,0	Grânulo
2,0 a 1,0	Areia muito grossa
1,0 a 0,50	Areia grossa
0,50 a 0,250	Areia média
0,250 a 0,125	Areia fina
0,125 a 0,062	Areia muito fina
0,062 a 0,031	Silte grosso
0,031 a 0,016	Silte médio
0,016 a 0,008	Silte fino
0,008 a 0,004	Silte muito fino
<0,004	Argila

Figura 9. Escala de Wentworth

Fonte: GRANULOMETRIA (2008)

Rochas sedimentares - são estratificadas com granulação fina ou feitas de fragmento de rochas mais antigas como seixos, conchas e minerais de alteração como argila (figura 10).



Figura 10. Rocha sedimentar Ponta Grossa – Pr.

Fonte: VILA VELHA (2002)

Rochas ígneas – são produtos de intrusões ou extrusões de magmas em altas temperaturas, não estratificada. Na sua granulação grossa há o granito e na fina o basalto (figura 11 e 12).



Figura 11. Granito – Serra do Mar – Paraná

Fonte: LORENZO (2011)



Figura 12. Basalto - Cataratas do Iguazu

Fonte: MACHADO (2009)

Rochas metamórficas – são formadas a partir de rochas sedimentares e ígneas alteradas por calor e pressão. Devido suas origens tem aparências variáveis, sendo identificadas pelo tipo de mineral.

2.2.1 Solos de Curitiba

O solo de Curitiba é composto cerca de 20% de solos aluviais (formado por areias e argilas orgânicas) que apresentam grande quantidade de água. A formação Guabirotuba corresponde a 35%, esta é formada principalmente por argilas fissuradas. O restante 45% é compostos de solos residuais, os quais são formados por alterações de rochas que se encontram logo abaixo (NETO, 2002) (figura 13).

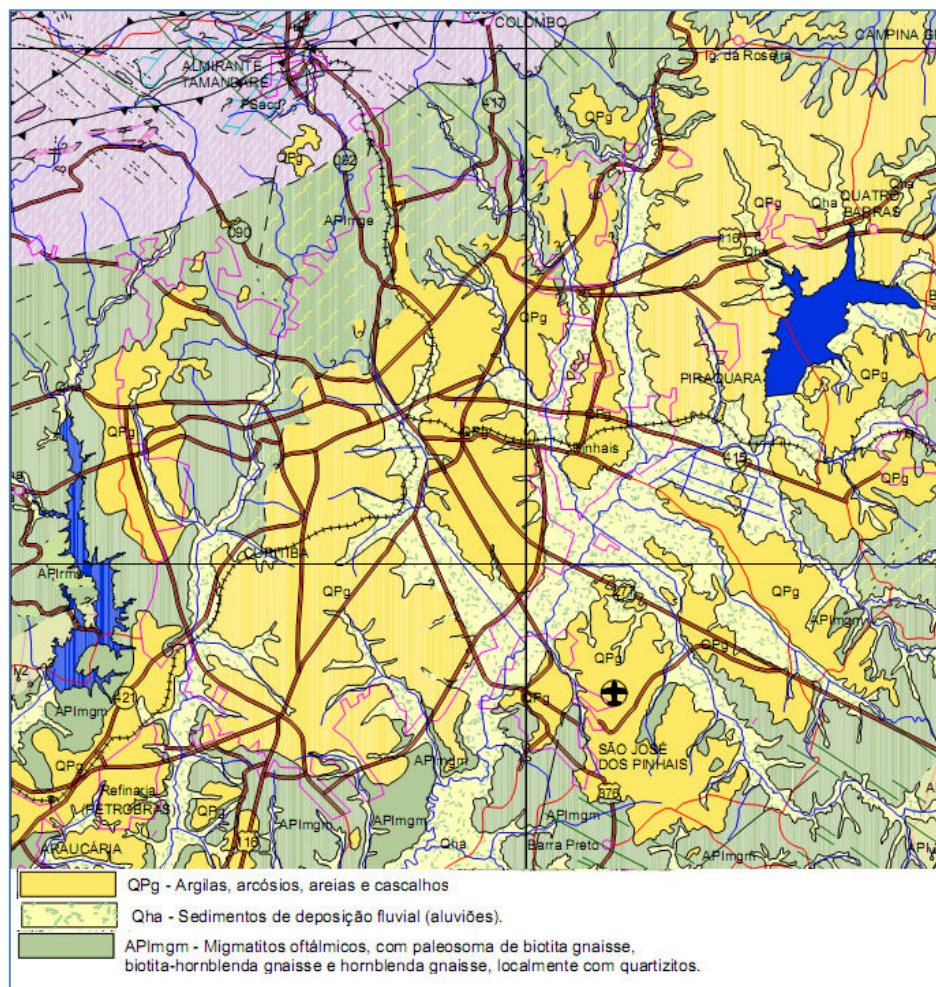


Figura 13. Solo de Curitiba

Fonte: MINEROPAR (2009)

2.2.2 Aquíferos

Aquíferos são formações geológicas que armazenam a água e possuem suficiente permeabilidade para que ela se movimente. Estas formações devem ter poros para permitir que a água passe de um local para outro sobre a ação de um diferencial de pressão hidrostática (ÁGUAS PARANÁ, 2010).

Tipos de Aquíferos:

- **Aquífero livre ou freático** – é parcialmente saturado de água e com base semipermeável ou impermeável, o topo é limitado pela superfície da água sobre pressão atmosférica. Tende a ter o mesmo perfil da superfície do terreno. Geralmente estão próximos da superfície.
- **Aquífero confinado ou artesiano** – é constituído por uma formação geológica permeável confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão no topo é maior que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água ascenda do poço (figura 14).

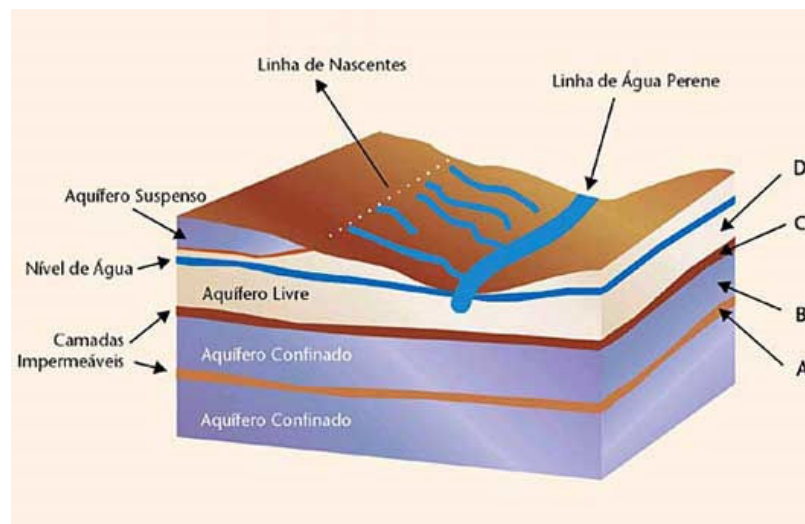


Figura 14. Aquíferos

Tipos de aquíferos relacionados com a rocha armazenadora

- **Aquíferos porosos** – ocorrem em rochas sedimentares. Constituem os mais importantes aquíferos pelo grande volume de água que armazenam. Estes tipos de aquíferos têm sua porosidade quase homogênea permitindo que a água escoe para qualquer direção em

função das diferenças de pressão hidrostática da região. Em Curitiba e região encontra-se o Aquífero Guabirota o qual possui estas características (AGUASPARANA, 2010).

- **Aquíferos fraturados ou fissurados** – ocorrem em regiões com rochas ígneas e metamórficas. A capacidade de retenção de água está relacionada com a quantidade de fraturas. A sua viabilidade está relacionada com a questão geográfica, pois fornece poucos metros cúbicos de água por hora. O aquífero Pré-Cambriano se encontra nesta classificação. Este é encontrado na RMC.

- **Aquíferos Cársticos** – são aquíferos formados por rochas calcárias ou carbonáticas. Estes constituem um tipo de aquífero fraturado, onde suas fraturas, devido à dissolução do carbonato na água, atingem grandes aberturas, criando rios subterrâneos (figura 15). Este tipo de aquífero ocorre na região metropolitana de Curitiba. (CÁRSTICO, 2009) (figura 16)

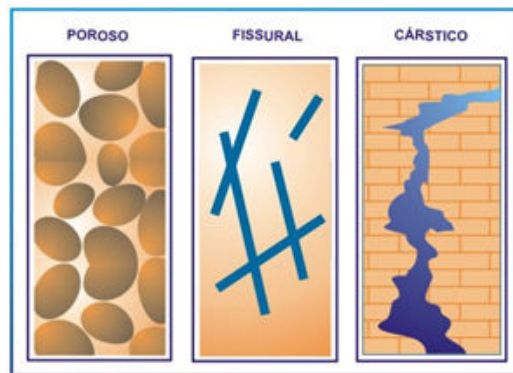


Figura 15. Tipos de aquíferos

Fonte: CÁRSTICO (2009)



Figura 16. Aquífero Karst Região Metropolitana de Curitiba

Fonte: MINEROPAR (2009)

2.2.3 Água Subterrânea

Água Subterrânea – é a água de subsuperfície que ocorre na zona saturada dos aquíferos, move-se sob efeito da força gravitacional. Sendo passível de ser captada em poços e drenos. Esta água é a maior reserva de água doce facilmente acessível, em termos de quantidade e qualidade. Apresenta vantagens com relação à água superficial como: não ocupar espaço na superfície, sofrer menos influência nas variações climáticas, passível de extração perto do local de uso, temperatura constante, melhor qualidade química física e biológica, tem proteção contra agentes poluidores. As desvantagens são: o poço não se vê, a água não se vê, necessita de pessoal especializado, pode ter conteúdo excessivo de sais dissolvidos, as alturas de recalques de água são maiores o que implica em um maior gasto de energia (ABAS, 2004).

As águas naturais possuem um conjunto de sais em solução, no entanto a água subterrânea apresenta teores mais elevados, pois estão intimamente expostas aos materiais solúveis presentes no solo e nas rochas. A quantidade e o tipo de sais dependerão do meio percolado, do tipo e velocidade do fluxo subterrâneo, da fonte de recarga do aquífero e do clima da região. Áreas com índice pluviômetro elevadas têm uma constante renovação do aquífero o que permite uma maior renovação das águas subterrâneas, como conseqüente diluição dos sais em solução. Em climas áridos a pequena precipitação leva a uma salinização do solo através da evaporação da água que sobe por capilaridade (MEIO AMBIENTE, 2002).

Na Terra a maioria da água se encontra nos mares e oceanos, apenas 1% é efetivamente para o consumo humano, uso agrícola e industrial, destes 97 % encontra-se no subsolo (figura 17) (AGUASPARANA, 2010).

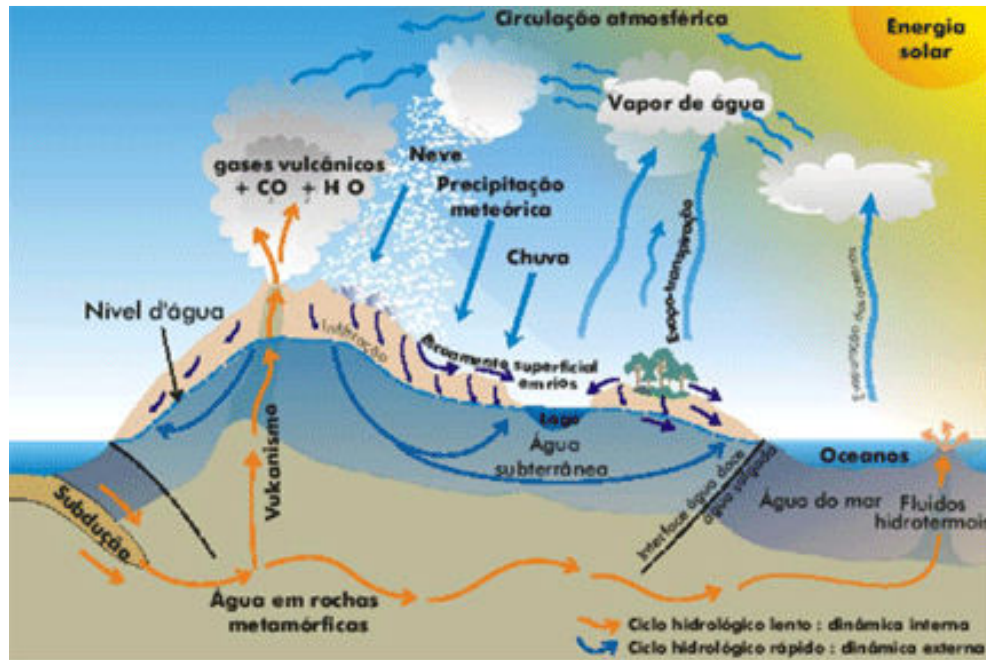


Figura 17. Águas Subterrâneas

Fonte: ÁGUAS PARANÁ (2010)

2.3 RÁDIO

O elemento químico rádio foi descoberto em 1898 pela Marie Curie e Pierre Curie. Há cerca de 1g de Rádio em 7 toneladas de uraninita. O elemento foi isolado em 1911 por M. Curie e Debierne pela eletrólise de uma solução de cloreto de rádio puro empregada em um cátodo de mercúrio com uma atmosfera de hidrogênio produzindo o metal puro (figura 18).

O rádio é um membro da família dos metais alcalino-terrosos. Ele emite partículas betas, radiações gamas. Um grama de ^{226}Ra sofre $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo, a unidade Curie se baseia nesta radioatividade. Vinte e cinco isótopos são conhecidos, o mais comum é o ^{226}Ra o qual tem uma meia-vida de 1600 anos, perdendo 1% de sua atividade em 25 anos. O ^{226}Ra é presente em todos minerais que contém ^{238}U . O rádio é um milhão de vezes mais radioativo que a mesma massa de urânio. Seu principal produto de decaimento é o gás ^{222}Rn . No século 20 trabalhadoras que pintavam ponteiros de relógios usando uma tinta a base de ^{226}Ra tiveram vários problemas de saúde como anemia e câncer de ossos (LANL, 2010) (figura 19).



Figura 18. Laboratório onde o elemento rádio foi descoberto



Figura 19. Jornal Daily Times de Chicago 1937

2.4 RADÔNIO

O radônio é um elemento químico com número atômico 86, símbolo Rn e peso atômico de 222,01. Foi descoberto na Alemanha em 1898 por Fredrich Ernst Dorn. O qual chamou de emanção do rádio.

Existem pelo menos 20 isótopos. Os principais são: O ^{220}Rn é emanado naturalmente do ^{224}Ra . O ^{219}Rn é emanado do ^{223}Ra e o ^{222}Rn , emanado do ^{226}Ra , o qual possui uma meia-vida de 3,82 dias e é um emissor de partículas alfa.

O Radônio tem um ponto de fusão de -71°C , ponto de ebulição de $-61,8^{\circ}\text{C}$, densidade de 9,73 g/L. Este é um gás incolor a temperatura ambiente e também o mais pesado dos gases nobres. A inalação dos produtos de decaimentos do radônio representa um risco à saúde (LANL, 2001).

O radônio começou a ser estudado na década de 50 nas minas de Urânio no Colorado nos EUA. O serviço de saúde dos Estados Unidos, liderado pela equipe de Duncan Holaday, foi o primeiro a comentar sobre os potenciais efeitos na saúde devido à exposição dos produtos do decaimento do radônio nas minas. Após a equipe encontrar amostras com concentrações elevadas, o serviço de saúde estimou que a máxima concentração permitida fosse de 100 pC/L. Dr. John Harley do Laboratório de Saúde e Segurança e Willian Bale da Universidade de Rochester encontraram que não o radônio mas seus produtos de decaimento que são prejudiciais a saúde. Em 1968 O Conselho Federal de Radiação enviou ao presidente dos Estados Unidos um guia para o controle de radiações danosas em mineradores de urânio (Tabela 2) (LEWIS, 2009).

Nos Estados Unidos recomenda-se tomar medidas corretivas quando a concentração no ar, em ambiente de convívio humano, exceda o limite máximo de contaminação recomendado pela USEPA de 150 Bq/m³ no ar e 11 Bq/ l na água. (USEPA, 1999; LANL, 2003).

Tabela 2. Cronologia do Radônio

ANO	HISTÓRIA CRONOLÓGICA DO RADÔNIO
1597	Georgius Agricola constatou grande nº de casos de câncer de pulmão em trabalhadores de minas (Saxônia e Boêmia)
1879	Harting e Hess (físicos alemães) dizem que muitas mortes de trabalhadores de minas estão relacionadas com câncer de pulmão (Schneeberg)
1896	Antoine Henri Becquerel – descobriu que o sal emite radiações espontâneas
1898	Pierre e Marie Curie descobrem outros elementos radioativos (polônio e rádio)
1898	Rutherford descobre as partículas alfa e beta
1899	Rutherford descobre a emissão do ^{232}Th (decaimento até ^{220}Rn)
1900	Dorn descobre a emissão do ^{238}U (^{226}Ra – decaimento até ^{222}Rn)
1901	Rutherford e Brooks mostram que o radônio é um gás radioativo
1902	Thomson encontra radônio na água
1903	Rutherford e Soddy – meia-vida do radônio: 3,7 dias
1913	Arnstein identifica morte de trabalhador de mina por câncer de pulmão através de autópsia
1914	Primeira consideração de radônio em propósitos médicos
1921	Margaret Ulig sugere que o câncer de pulmão é causado pela emissão do radônio nas minas
1925	Primeira menção da palavra radônio na literatura
40/anos	Muitas evidências de que o radônio provoca câncer de pulmão
1941	Proposta de concentração máxima de radônio no ar de 10 pCi/l (370 Bq/m ³)
1955	Introdução do termo <i>working level</i>
1957	Célula de Lucas
1957	Novas evidências da presença de radônio na água nos EUA (Maine)
1984	Altas concentrações de radônio são encontradas em residências nos EUA (New Jersey)

Fonte: COTHERN (1987)

Em dezembro de 1984, na Pensilvânia EUA, um trabalhador da construção civil ao entrar em uma usina nuclear que estava sendo construída dispara os monitores de radiação. Como a usina ainda não estava gerando produtos da fissão, os físicos do serviço da saúde fizeram um levantamento da origem da radiação e encontraram elevados níveis descendentes do ^{222}Rn cerca de 2700pCi/L (USEPA, 2010) (Figura 20).



Figura 20. Trabalhar com níveis de radiação elevados

Fonte: USEPA (2010).

O Conselho Nacional de Medições e Proteção Radioativo (NCRP) desenvolveu um gráfico com a exposição à radiação da população dos Estados Unidos. Neste apresenta um aumento da exposição médica desde a década de 80, principalmente pela tomografia computadorizada e medicina nuclear. O radônio / tório representa 37% do total da dose efetiva coletiva para a população geral. O segundo gráfico exclui as exposições médicas (figuras 21 e 22) (NCRP, 2009).

O isótopo ^{219}Rn não é usualmente considerado na estimativa de induzir efeitos na saúde porque não é abundante no meio ambiente, além de possuir uma meia-vida extremamente curta 4 segundos. O ^{220}Rn não tem sido considerado também, embora muitos estudos recentes incluem as medidas do ^{220}Rn quanto do ^{222}Rn , no entanto a quantidade do ^{220}Rn que entra no meio ambiente é muito menor que ^{222}Rn devido sua meia vida de 56 segundos.

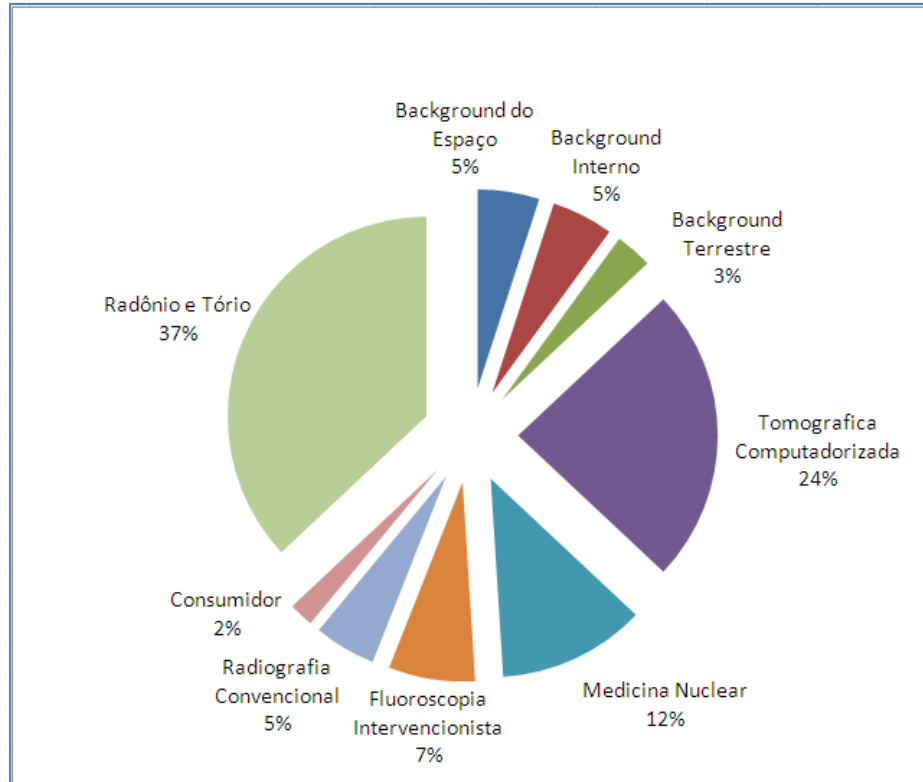


Figura 21. Dose efetiva coletiva

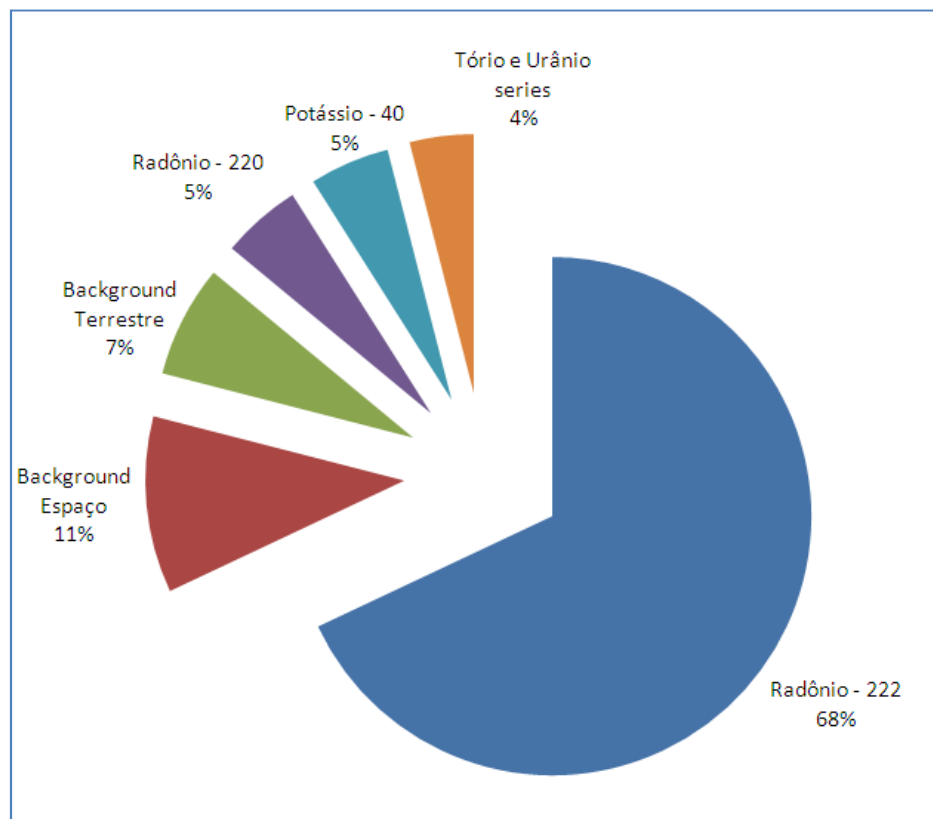


Figura 22. Dose efetiva sem exposições médicas

O radônio tem pouco interesse comercial, tendo uso para terapias, porém não tem um efetivo suporte para seu uso. Ele pode ser usado para detectar atividades sísmicas. Além de ser usado para exploração de petróleo e urânio (ATDSDR, 2011).

Estima-se que anualmente são lançados 2400 milhões de Ci de ^{222}Rn do solo para o meio ambiente. Fontes de água lançam 500 milhões de Ci.

A geologia, umidade do solo e condições meteorológicas podem afetar a quantidade de ^{222}Rn exalada pelo solo.

Níveis de ^{222}Rn no ambiente externo são muitos menores que de ambientes internos (ambientes de convívios humanos). O gás entrando nas construções através do solo é o principal causa para elevar os níveis, no entanto este pode entrar através do uso de água para propósitos domésticos ou através dos materiais de construções utilizados.

Profissionais que trabalham em minas de urânio têm um alto risco ocupacional. Outros profissionais como profissionais de mitigação de ^{222}Rn e cientistas também têm estes riscos.

A evidência de que ^{222}Rn induz efeitos na saúde humana deriva de numerosos estudos com mineiros, principalmente de urânio, expostos no século 20 nos Estados Unidos e vários países na Europa. Estes estudos de mortalidade envolvem estimativas de exposição por longos períodos de tempos com base no tempo de trabalho e com incertezas inerentes a fatores como cigarros e a exposição de suspeitos carcinogênicos como arsênico e pó de sílica. Os resultados demonstram o aumento de risco de câncer pulmonar com o aumento da exposição do ^{222}Rn .

Diversas publicações têm associado o ^{222}Rn e câncer de pulmão em lares em níveis bem inferiores àqueles encontrados em minas.

A concentração do ^{222}Rn no ar é especificada em pCi/L ou Bq/m^3 . Um pCi/L equivale a $37 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

Quando o ^{222}Rn e seus produtos decaem, eles emitem partículas alfa, beta e radiação gama. O perigo para saúde não vem primeiramente do ^{222}Rn mas preferencialmente de seus produtos de decaimentos.

Quando o ^{226}Ra se transforma em ^{222}Rn a partícula alfa é neutralizada para formar o Hélio. Os produtos do ^{222}Rn agem similarmente, porém agrupando a partículas de poeira no ar. O principal problema é quando estes produtos são inalados. Eles se depositam nas vias aéreas (particularmente na árvore traqueobronquial) e bombardeiam as células com partículas alfas. Estas partículas podem depositar uma alta dose de radiação (figura 23).

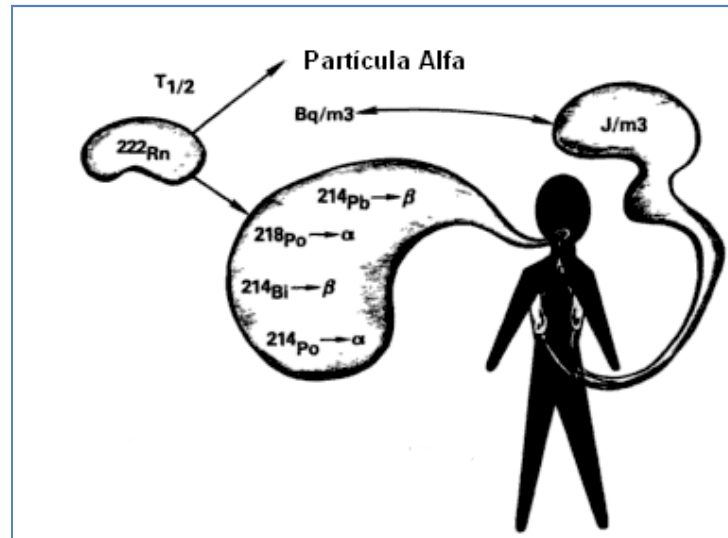


Figura 23. Inalação do radônio

Fonte COTHERN (1987)

A exposição de radônio refere-se ao total de energia das partículas alfas do ^{222}Rn e seus produtos de decaimentos. Como a medição da atividade dos produtos de decaimento do ^{222}Rn não é viável na natureza então se estabeleceu o termo Nível de Trabalho (WL) que tem o propósito de quantificar a exposição do radônio. O WL é uma unidade que mede a concentração de produtos de decaimentos do radônio em um litro de ar com a emissão de $1,3 \times 10^5$ MeV. (COTHERN, 1987).

1 WL corresponde à concentração de atividade de $100\text{pCi/L} = 3700 \text{ Bq/m}^3$.

Em 2005 a OMS estabeleceu o Projeto Internacional do Radônio para identificar estratégias efetivas para a redução do impacto sobre a saúde e aumentar o conhecimento da população sobre as conseqüências da exposição do radônio (WHO, 2009).

2.4.1 Radônio no solo

A origem do ^{222}Rn na crosta da Terra está ligada diretamente com o ^{238}U e ^{232}Th e seus produtos de decaimentos distribuídos no solo com poucos metros da superfície da Terrestre. Os átomos de ^{222}Rn uma vez formado dentro do solo, este alcança o ar pela capilaridade do solo através do processo de difusão ou fluxo de pressão induzida (WILKENING, 1990)

Alguns tipos de rochas são mais suscetíveis a ter mais urânio e rádio que são responsáveis pelo aumento da concentração de radônio. Entre os principais são o xisto, arenito, granitos, rochas vulcânicas, depósitos glaciais (Tabela 3) (GUNDERSEN, 1992).

Tabela 3. Concentração de ^{238}U e ^{232}Th nas rochas e solos

Tipo de Rocha	Concentração Bq/kg	
	Urânio-238	Tório -232
Ígnea		
basalto	7-10	10-15
granito	40	70
Sedimentar		
xisto	40	12
arenito	25	2
Crosta Continental - média	36	44
Solos	66	37

Fonte: NCPR (1987)

Classificação de áreas de riscos de ^{222}Rn com base em critérios geológicos (tabela 4).

Tabela 4. Áreas de risco de radônio

Classificação	Critério
Áreas de alto risco	Concentração de radônio no solo > 1350 pCi/L Granitos e gnaisse ricos em urânio Xisto Solos altamente permeáveis
Risco médio	Concentração de radônio no solo entre 270 a 1350 pCi/L Rochas com baixa ou média concentração de urânio e rádio Solos com média permeabilidade
Baixo risco	Concentração de radônio no solo < 270 pCi/L Rochas com baixa concentração de urânio e rádio Arenitos Calcário Ígneas Solos com baixa permeabilidade e com água saturada

Fonte: COTHERN (1987)

Altos níveis de concentração de ^{222}Rn podem existir em águas subterrâneas originárias de aquíferos associados a formações graníticas. As concentrações médias de radônio na água proveniente de aquíferos com esta formação geralmente atingem 300 Bq/L ou mais. Algumas

concentrações medidas em poços domésticos, no Maine, EUA, chegaram a 55.500 Bq/L (OLIVEIRA, MOREIRA, 1994).

Na Espanha, um estudo realizado na cidade de Cantábria, aquífero composto por arenitos e calcários, foi encontrado concentrações entre 1 e 75 Bq/L. Na cidade de Salamanca, aquífero composto por granitos e argilas, foi encontrado concentrações entre 100 e 25.000 Bq/L (SOTO, 1988).

Existem no Brasil alguns trabalhos com estudos sobre as concentrações de ^{222}Rn na água, ar e materiais de construção. Na cidade de Poço de Caldas um estudo encontrou concentrações variando entre 0,9 a 131 Bq/L (OLIVEIRA, MAZZILLI, 1994).

Emanação

A efetividade do ^{226}Ra em suprir o ^{222}Rn para os poros do solo para transportar para atmosfera não depende apenas da concentração total do ^{226}Ra , mas também da fração destes átomos que estão localizados na matriz do solo ou superfície das partículas para que os átomos de ^{222}Rn possam escapar pelo poros ou por capilaridade (figura 24). O conceito de coeficiente de emanção pode ser descrito pela taxa de volume na superfície para um dado conjunto de partículas que compõe o solo. O coeficiente de difusão de ^{222}Rn no sólido é aproximadamente 10^{-7} para o ar. Somente partículas formadas perto da superfície das partículas do solo irão alcançar os espaços de ar no solo. A transferência dos átomos de ^{222}Rn dos minerais para a capilaridade do solo dependem também da presença de água nos espaços intersticiais dos poros. Se há um filme de água ao redor da superfície dos grãos, há uma grande probabilidade de que o ^{222}Rn irá permanecer no espaço entre as partículas. Se há muita água o processo de difusão é impedido.

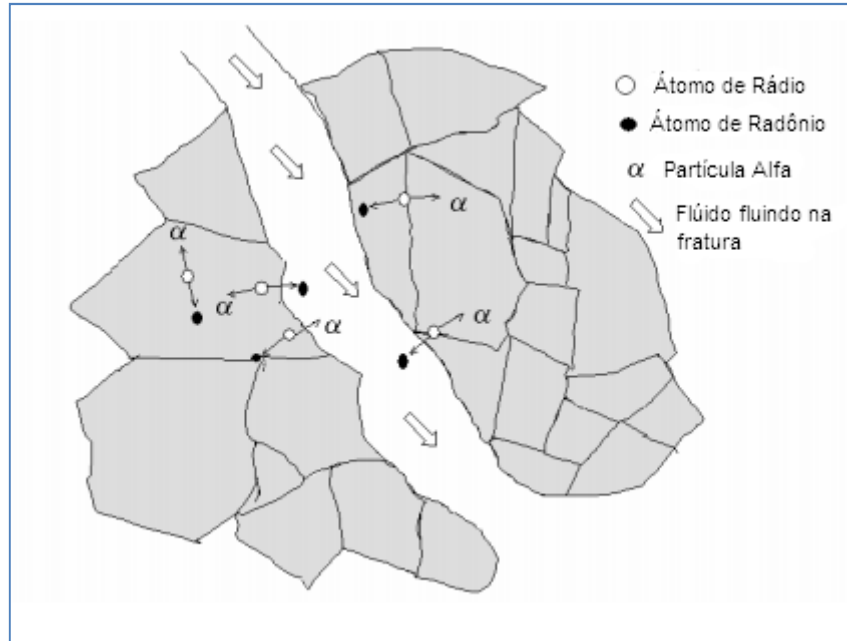


Figura 24. Emanação do Radônio de um grão no solo.

Fonte: SKEPPSTROM (2007)

2.4.2 Radônio – solo para o ar

Os processos que envolvem o transporte do radônio são importantes para se determinar os níveis de radônio nas casas, na predição de terremotos e para entender a radiação no meio ambiente. Estes processos estão relacionados com o tamanho e a configuração do espaço ocupado pelo gás no solo. O transporte perto da superfície pode ser desmembrado em duas categorias: processos microscópios no qual os fluxos por difusão e viscosidade são dominantes e processo macroscópico no qual o fluxo ocorre através de rachaduras, fissuras e canais subterrâneos.

Fluxo por difusão e viscosidade – de acordo com a teoria cinética dos gases, o gás radônio flui na direção oposta ao aumento do gradiente de concentração conforme equação (6).

$$Jd = -D \frac{dC}{dz} \quad (6)$$

Onde Jd é a densidade de difusão, D é coeficiente de difusão em massa e C é a concentração de ^{222}Rn no espaço intersticial.

2.4.3 Radônio no interior dos ambientes de convívio humano

As concentrações de radônio nas áreas de convívio humano correspondem a 90% no gás que vem do solo, 8% a 9% da água usada nas tarefas domésticas e poços e 1% a 2% dos materiais de construções, porém estes valores podem variar conforme as condições meteorológicas, a taxa de ventilação, tipo do solo e tipos de materiais de construções usados (MULLER ASSOCIATES, 1986).

Fatores meteorológicos são inter-relacionados na sua influência das concentrações de ^{222}Rn no interior das casas. Quanto menor a taxa de troca de ar no ambiente aumenta a concentração do gás. No entanto as forças que auxiliam a trocar de ar como vento e o calor também aumentam a entrada do gás do solo.

A umidade do ar afeta a emissão do gás. Quando o solo tem pouca umidade os átomos de ^{222}Rn tem poucas oportunidades para entrar nos espaços dos poros no solo e este pode se incorporar ao mineral. Solos úmidos parecem levar a condições ideais para emissão. Solos muito úmidos causam a diminuição da difusão e conseqüentemente diminuem a emissão (HOFFMAN, 1995).

2.4.4 Dinâmica da entrada de Radônio

A concentração de ^{222}Rn em um ambiente de convívio humano depende da taxa de ventilação através de janelas e portas. O gás entra no domicílio através de difusão a partir do solo, dos materiais de construções, da água. No solo o gás entra através de rachaduras e fendas na fundação. Estas aberturas oferecem pouca resistência ao fluxo. A permeabilidade do solo para o ar é o principal fator que interfere na concentração do ^{222}Rn (GARBESI, 1999; EPA, 2009).

Dois processos são os principais fatores para a exalação do ^{222}Rn do solo para o ar: fluxo convectivo e difusão. Fluxo convectivo é devido à diferença de pressão entre o solo e o ar. Estas diferenças podem ser induzidas pelo solo e pelas diferenças de temperatura, pressão barométrica e movimento dos ventos. A poucos centímetros do solo a temperatura sofre significantes mudanças durante o dia e a noite que irá resultar no fluxo convectivo. No entanto a principal ocorre através da difusão (BRADY, 1974).

As características do solo como tamanho do grão, permeabilidade, porosidade e umidade tem grandes influências no transporte do radônio no solo. O solo é dividido em porção sólida e vazia - composta pela porosidade a qual consiste de ar ou água. A fração de água é chamada umidade. O solo é saturado quando a teor de umidade é igual à porosidade.

Teor de umidade – um importante fator para a emissão e migração do radônio no solo. Para solos bem drenados a quantidade de ar nos poros é maior que a quantidade de água. A capilaridade da água cria um filme ao redor das partículas do solo e esta aumenta a fração de emissão do ^{222}Rn . A água não aumenta a resistência ao fluxo de ar, uma vez que os poros grandes são os principais responsáveis por este fluxo no solo.

Permeabilidade – descreve a facilidade que um fluido tem em se deslocar no solo. A permeabilidade reflete o fluxo do fluido no solo pelo gradiente de pressão. Sua importância para o radônio deve se a fato de existir no solo uma grande variedade de permeabilidade. Solos com grãos grandes geralmente possui grande permeabilidade. Solos comuns têm grãos na ordem de 10^{-8} m^2 para cascalho e 10^{-16} m^2 para argila.

Difusividade – é a tendência de uma substância migrar para o seu gradiente de concentração em um material. O termo usado para descrever este fluxo é o coeficiente de difusão. O movimento do radônio do solo para a atmosfera é inicialmente por difusão molecular. O coeficiente de difusão do ^{222}Rn no ar é $1,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e em solos úmidos $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e para solos saturados $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Sendo a água presente no solo um fator importante para esta difusão.

Coefficiente de emissão – é a fração do radônio gerado que deixa os grãos sólidos e entra nos poros do solo. Os ^{222}Rn criados em regiões profundas nos cristais são incapazes de chegar aos poros. Um átomo de ^{222}Rn entrando em um espaço poroso parcialmente cheio de água tem uma alta probabilidade de parar na água e dali facilmente ser transferido para o ar. A combinação transporte emissão é maior quando o solo está úmido.

A localização de uma casa pode interferir a distribuição da umidade do solo e conseqüentemente a emissão e migração do ^{222}Rn . A casa funciona como um guarda-chuva, nas precipitações ao redor o solo fica mais úmido do que no interior abaixo da estrutura (TANNER, 1964).

O suprimento de água pode contribuir para a quantidade de ^{222}Rn que entra na casa. Quando a água sai da torneira os gases dissolvidos nela são liberadas para o ambiente. Este processo pode ser elevado durante o banho, pelo agitação e aquecimento durante a lavagem de roupa ou durante o cozimento. O aumento da concentração de radônio no interior

ocasionado pela água é descrito pelo coeficiente de transferência (equação 7) (NAZAROFF, 1987).

$$T = \frac{\Delta Ca}{Cw} \quad (7)$$

Onde ΔCa é o aumento da média da concentração interna do radônio que resulta da água e Cw é a concentração média do radônio.

Estudos revelaram que as concentrações de ^{222}Rn presentes no ar são mais prejudiciais à saúde que o radônio ingerido a partir da água potável no dia-a-dia. Conseqüentemente a maior parte dos trabalhos de risco relacionados à presença de radônio na água de abastecimento tem focado a transferência por emanação do ^{222}Rn da água para o ar dentro das moradias (CROSS, 1985).

O fator de emanação do ^{222}Rn da água potável para o ar, em uma residência, foi estimado em um fator de 10^4 , por exemplo, se houver 20.000 Bq/m^3 na água, haverá 2 Bq/m^3 no ar (UNSCEAR, 1993).

As várias fontes e vias de exposições pelo Radônio. As exposições por radiação gama vêm de alguns procedimentos durante mitigações (figura 25).

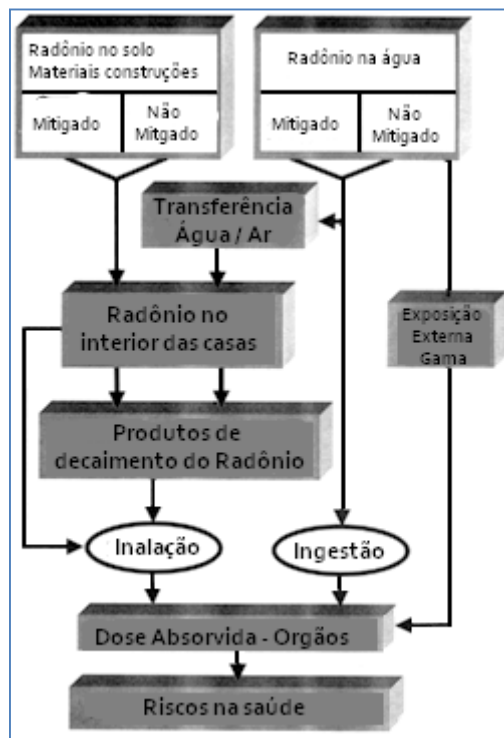


Figura 25. Fontes e vias de exposições pelo Radônio.

Fonte: Risk Assessment of Radon in Drinking Water (1999)

2.4.5 Níveis de Radônio

Águas subterrâneas de poços usualmente contém concentrações de ^{222}Rn de 5 – 50 Bq/L em solos com baixas concentrações de ^{238}U e 10-100 Bq/L em solos com concentrações normais. O ^{222}Rn é um problema quando o poço é cavado em rocha cuja concentração de ^{238}U é média ou alta. (AKERBLOM E LINDGREN, 1997).

Os limites de ^{222}Rn variam por países (tabela 5). Na Suécia águas com concentração de ^{222}Rn na faixa de 1000 Bq/L são inadequadas para consumo. Na faixa acima de 100 Bq/L devem ser tomadas ações para reduzir este nível. A união Européia não tem um limite regulatório, porém recomenda para suplemento de água público e privado limites similares ao da Suécia (EUROPEAN COMMISSION, 2001).

Tabela 5. Concentração de ^{222}Rn nos ambientes de convívios humanos e níveis para tomada de ações.

País	Concentração média nos lares (Bq/m ³)	Nível para ação (Bq/m ³)
Austrália	*	200
Bélgica	*	400
República Tcheca	140	200
Finlândia	123	400
Alemanha	50	250
Irlanda	60	200
Israel	*	200
Lituânia	37	100
Luxemburgo	*	250
Holanda	*	20
Noruega	51-60	200
Polónia	*	400
Rússia	19-250	*
Suécia	108	400
Suíça	70	1000
Reino Unido	20	200
Comunidade Europeia	*	400
EUA	46	150
Canadá	*	200

Fonte WHO (2009)

Nos Estados Unidos recomenda-se tomar medidas corretivas quando a concentração no ar, em ambiente de convívio humano, exceda o limite máximo de contaminação recomendado pela USEPA de 150 Bq/m³ no ar e 11 Bq/L na água. (USEPA, 1999; LANL, 2003).

No Brasil existe uma legislação para a radioatividade da água. O valor de referência para a radioatividade alfa total (incluindo o ²²⁶Ra) é de 0,1 Bq/L (CNEN - NE 3.01).

Existem no Brasil alguns trabalhos com estudos sobre as concentrações de ²²²Rn na água, ar e materiais de construção. Na cidade de Poço de Caldas um estudo encontrou concentrações variando entre 0,9 a 131 Bq/L (OLIVEIRA, MAZZILLI, 1994).

Na cidade de Curitiba e Campo Largo foram realizadas medições de concentração de ²²²Rn no ar sendo 74% dos resultados na faixa de até 50 Bq/m³, 10% na faixa de 50 a 100 Bq/m³, 9% de 100 a 200 Bq/m³ e 7% dos resultados acima de 200 Bq/m³ (CORRÊA, 2006).

Em outro estudo, realizada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, foram desenvolvidas células testes para analisar a concentração de ²²²Rn em materiais de construção. A concentração de média por etapa construtiva foi de 651, 776, 1032 e 422 Bq/m³ para as células-teste de blocos cerâmicos e 594, 427, 875 e 471 Bq/m³ para as células-teste de blocos de concreto (FIOR, 2008).

2.5 RADIOATIVIDADE NA ÁGUA

No Brasil os valores de referência para a radioatividade alfa total (incluindo o ²²⁶Ra) é de 0,1 Bq/L, e os valor de referência para a radioatividade beta total é de 1 Bq/L. Se os valores encontrados forem superiores aos referidos acima, deverá ser feita a identificação dos radionuclídeos presentes e a medida das concentrações respectivas. Nesses casos, deverão ser aplicados para os radionuclídeos considerados, os valores estabelecidos pela Norma Experimental da Comissão Nacional de Energia Nuclear, Diretrizes Básicas de Radioproteção para se concluir sobre a potabilidade da água (CNEN - NE 3.01).

A norma recomenda também a realização do levantamento geral em cada Estado e no Distrito Federal, a fim de possibilitar o conhecimento dos níveis de radioatividade dos corpos de água destinada ao abastecimento público em cada região. Estes dados são praticamente inexistentes no Brasil. É importante ressaltar que os valores de referência para radioatividade alfa e beta total estabelecidos como padrões de qualidade radioativa para a água potável destinada ao abastecimento público na portaria n° 36/GM(norma potalidade de água), foram

definidos a partir de valores de referência recomendados pela EPA nos Estados Unidos e pelo WHO na Comunidade Européia.

Godoy, em 2006, apresentou as concentrações de ^{222}Rn e ^{226}Ra nas águas subterrâneas brasileiras por regiões, conforme tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Concentração de ^{222}Rn na água de acordo com as regiões geográficas do Brasil

Região	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Concentração Máxima (Bq/L)	525	80,6	51,6	3542	1402
Concentração Mínima (Bq/L)	<2,4	<1,2	<5	<1,2	<1,2
Número de Amostras	10	44	23	234	47

Fonte: GODOY (2006)

Tabela 7. Concentração de ^{226}Ra na água de acordo com as regiões geográficas do Brasil

Região	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Concentração Máxima (Bq/l)	0,36	0,96	0,037	3,79	0,19
Concentração Mínima (Bq/l)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Número de Amostras	10	44	23	234	47

Fonte: GODOY (2006)

No Estado de Santa Catarina, na cidade de Tubarão, foram encontradas concentrações de ^{222}Rn com valor de 1402 Bq/L (CAMARGO, 1974; MOURÃO, 1992).

Na cidade de Águas de Prata encontrou-se a concentração de 3542 Bq/L, Caldas 430 Bq/L e Poços de Caldas 350 Bq/L, ambas na região Sudeste do Brasil (GODOY, 2006).

Na região de Lagos no Rio de Janeiro a concentração de ^{222}Rn encontrada foi de 3 a 75 Bq/L (ALMEIDA, 2004).

Em São Paulo foram realizadas análises de concentração de ^{222}Rn em três poços com diferentes tipos de rochas metamórficas, durante um ano. Os valores encontrados foram: 76 ± 7 Bq/L, 26 ± 3 Bq/L e 39 ± 4 Bq/L (LUCAS, 2007).

Em um estudo do ^{222}Rn no complexo rochoso da Serra de São Vicente, São Paulo, foi encontrado a concentração em fontes de água natural entre 8,1 e 36 Bq/L, em residências entre 68 e 610 Bq/m³ e solo entre 0,41 e 3460 Bq/m³ (MARQUES, 2006).

Na região de Água das Pratas foi desenvolvido um estudo para avaliar o risco de indução de câncer por radiação na ingestão de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{222}Rn em fontes minerais. A concentração do ^{222}Rn variou entre 0,8 a 216 Bq/L. Dentre 10⁶ pessoas expostas, 23 casos de cânceres estomacais fatais foram estimadas pela sua ingestão (JACOMINO, 1996).

2.6 EFEITOS DO ^{222}RN NA SAÚDE

Radiobiologia é o estudo da ação de radiação ionizante em seres vivos. Quando o material biológico absorver a energia desta radiação, poderá estimular uma excitação ou ionização. Se o elétron ao receber esta energia não for ejetado da eletrosfera então é chamado de excitação, porém se houver energia suficiente para ejetar do átomo ou da molécula então é chamado de ionização (RADIOBIOLOGY FOR THE RADIOLOGIST, 1972).

As células expostas à radiação ionizante densa como as partículas alfas do radônio, podem iniciar uma série de eventos moleculares e celulares que podem culminar no desenvolvimento de câncer pulmonar (HALL, 1994).

Ionização leva a danos celulares, quebra no DNA, reparações imprecisas, mutações genéticas, alterações no cromossomo e instabilidade genética. A radiação induz mudanças moleculares que resultam no ganho ou na perda de funções nos genes críticos, o que permite células fugirem de seu controle normal e se tornarem tumores malignos. As partículas alfas podem quebrar o DNA ou induzir a formação de radicais livres (Figura 26).

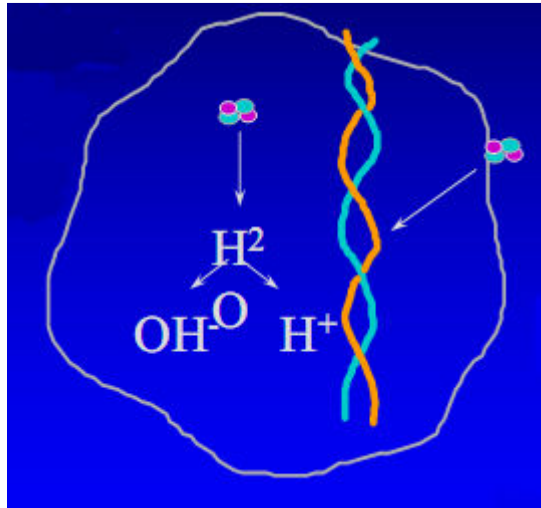


Figura 26. Formação de radicais livres

Fonte USEPA (2010)

O DNA (figura 27), ao ser irradiado, poderá quebrar de várias maneiras. Se apenas uma das fitas forem quebradas haverá pequenas consequências biológicas, pois a base oposta servirá como base para a reconstrução (figura 28). Se a quebra ocorrer em ambas às fitas, esta poderá ocasionar duas novas peças e resultar na morte celular, mutação ou câncer (figura 29). Há duas maneiras na qual o DNA pode ser reparo: Recombinação homóloga – a qual é livre de erros, mas raramente ocorre nos mamíferos, ocorre através do alinhamento de seqüências similares. Recombinação não homóloga é propensa a erros e provavelmente é responsável pelas lesões mutagênicas. Ela reúne os términos das seqüências quebradas, porém há uma seqüência perdida neste processo e o reparo pode ser mutagênico.

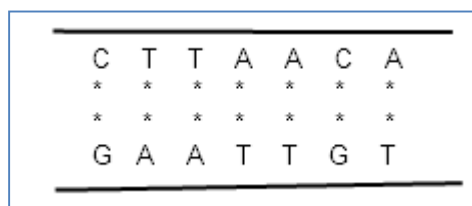


Figura 27. DNA representação em duas dimensões.

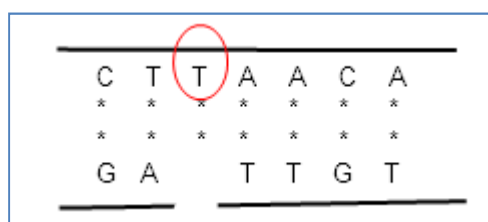


Figura 28. DNA simples quebra.

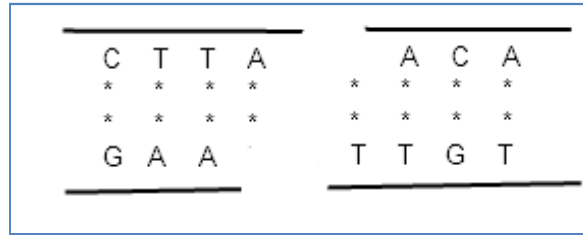


Figura 29. DNA dupla quebra

A proteína p53 é responsável pela manutenção da integridade do código genético, durante o ciclo genético, esta faz a verificação de uma mutação, caso encontre então será ativadas proteínas de reparação. Quando o DNA está muito danificado ela impede a mitose e meiose através da apoptose (indução de morte celular). Mutações deste gene são encontradas em muitos tumores humanos (figura 30) (WARD, 1988; RADIOBIOLOGY FOR THE RADIOLOGIST, 1972).

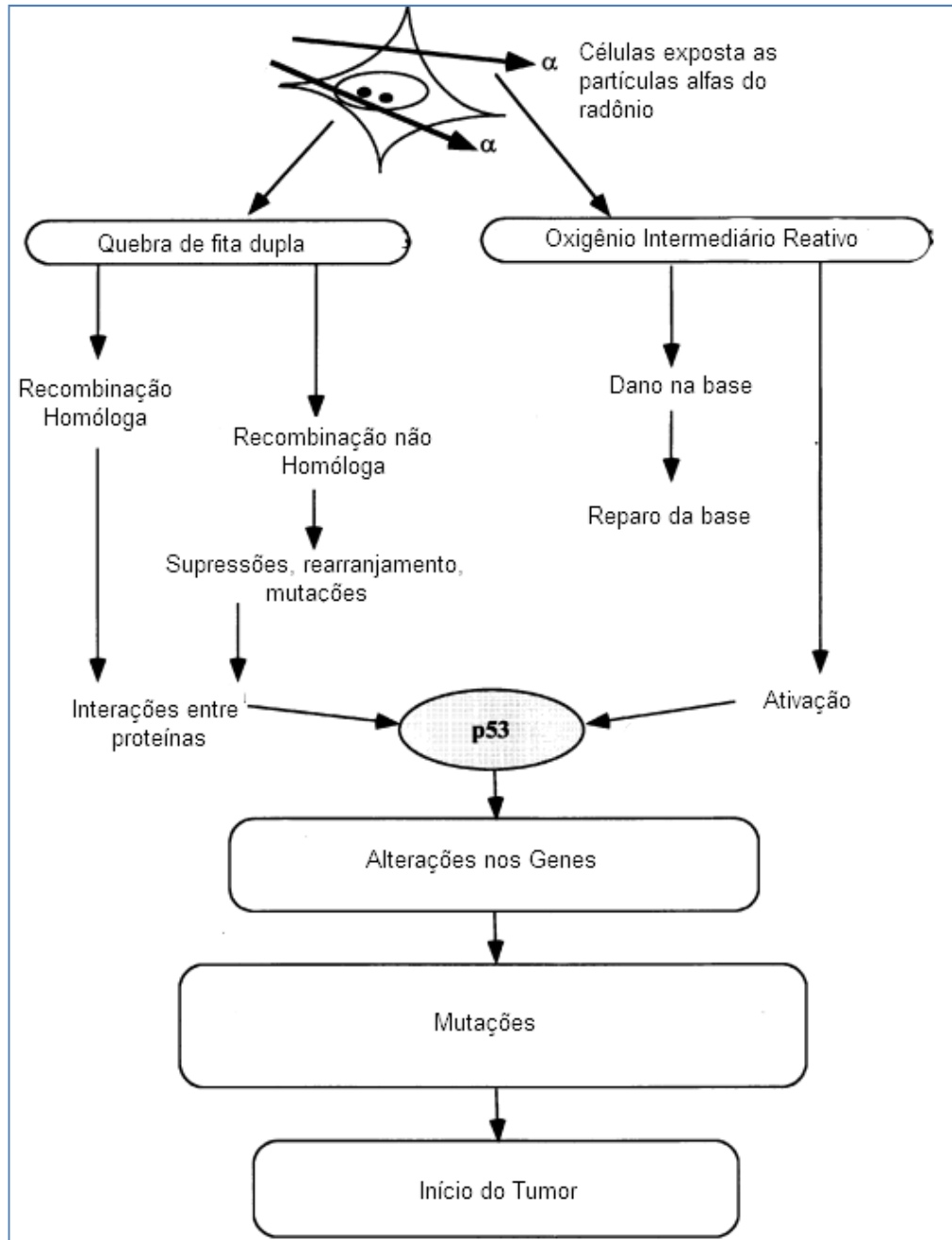


Figura 30. Desenvolvimento de tumor por partículas alfa

2.6.1 Dosimetria do ^{222}Rn inalado e seus riscos

A ocorrência de câncer pulmonar broncogênico após a inalação de ^{222}Rn e seus produtos de decaimento é bem estabelecido por vários estudos de mineradores (UNSCEAR, 1993).

2.6.2 Dose no pulmão pelo ^{222}Rn

A dose da partícula alfa entregue a célula alvo no epitélio bronquial aumenta com os produtos de decaimento de curta-vida depositados na superfície das vias aéreas bronquiais. A dose da partícula alfa do ^{222}Rn é pequena em relação ao seus produtos de decaimento por causa de sua localização na vias aéreas. Os seus produtos, no entanto, estão na superfície a aproximadamente 20 a 30 μm das células alvos, assim têm maior probabilidade de atingi-las (NCPR, 1981).

2.6.3 Dose em outros órgãos além do pulmão pelo ^{222}Rn

Todos os gases são levemente solúveis nos tecidos do corpo. O radônio se difunde no pulmão e é transportado para outros órgãos onde, juntamente com seus produtos de decaimento, irão entregar doses nos tecidos (tabela 8).

Tabela 8. Dose equivalente nos tecidos por contínua exposição de 1 Bq/m^3 de ^{222}Rn no ar.

Tecido	mSv y^{-1} por Bq/m^3 (10^{-5})
Fígado	5,1
Rins	5,6
Baço	5,2
Medula óssea	9,6
Superfície dos ossos	2,5
Tecidos moles	3,0
Tecidos adiposo	9,0
Pele	50,0
Medula normal	6,3
Tecido adiposo medular	16,0
Superfície dos ossos (medula)	1,5
Superfície dos ossos (Tecido adiposo medular)	3,0
Linfócitos	0,01
Alvéolos capilares	20,0

Fonte: JACOBI AND EISFELD (1980); HARLEY AND ROBBINS (1992)

2.6.4 Produtos de decaimento do ^{222}Rn durante o banho

As variáveis mais importantes na dose das partículas alfas nas células bronquiais são: a frequência respiratória, o tamanho dos aerossóis e a localização do núcleo das células alvos.

As casas abastecidas por água subterrâneas facilitam a entrada de ^{222}Rn no ambiente. Cada caso de uso da água contribui para o risco total como no banheiro, na cozinha e na lavanderia. O maior potencial de exposição de curta duração ^{222}Rn ocorre no banho e a subsequente inalação de seus produtos de decaimentos. Para se determinar a atividade do ^{222}Rn e seus descendentes é necessário prever as suas distribuições em função do tempo durante e após o banho. Uma alta concentração ocorre após 30 minutos do banho, tempo necessário para os produtos de decaimentos entrarem em concentração de equilíbrio (FITZGERALD, 1997).

2.7 DETECÇÃO DE ^{222}Rn

Os testes para se detectar a presença de ^{222}Rn podem ser feitos de duas maneiras.

Teste de longa duração – exposição maior que 90 dias. São feitos com as condições normais de vida. Além de medirem as variações sazonais.

Teste de curta duração – tipicamente de 2 a 7 dias, não menor que 2 dias. Devem ser feitos com a casa fechada. Ambos os testes apresentam boa acurácia.

Existem alguns equipamentos para realizar estes testes e se dividem em passivos e ativos. Os passivos são aqueles que não necessitam de energia elétrica para funcionar como o carvão ativado, detectores de traço alfa, câmara iônica de eletreto. Os detectores ativos necessitam de energia elétrica como os monitores contínuos de ^{222}Rn (figura 31).

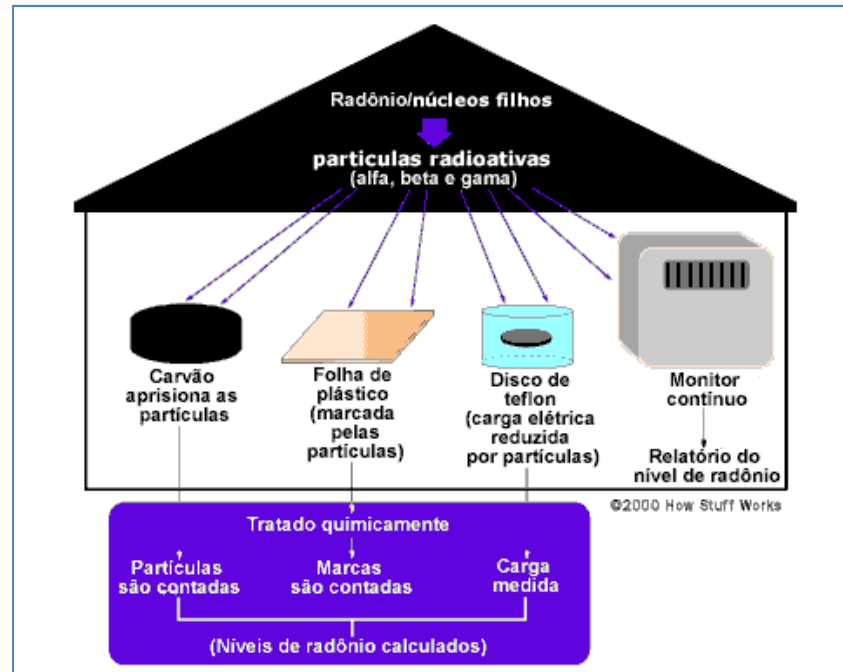


Figura 31. Detectores de ^{222}Rn

Fonte: DETECTORES (2000)

Carvão ativado – São equipamentos para testes de curta duração, ótimos para 2 a 3 dias. São convenientes, fáceis de usar, possui uma longa vida útil, com razoável acurácia. No entanto requerem controles externos e laboratórios para analisar os resultados. O carvão absorve o gás radônio e seus produtos de decaimento que entram no dispositivo. No laboratório, através da contagem por cintilação por iodeto de sódio, são detectados os raios gamas proveniente dos produtos de decaimento do radônio. Em lugares com altos níveis de umidade as medidas podem variar (IIMOTO, 2005) (Figura 32).



Figura 32. Detector de carvão ativado

Fonte: USEPA (2010)

Detectores de traço alfa – são detectores de plástico (policarbonato) que armazenam a incidência de partículas alfas que colidem nele. O tempo de exposição destes detectores pode variar de alguns dias até anos. O tempo ideal segundo alguns estudos é de 3 meses. Após este tempo este plástico é tratado quimicamente para deixar os traços visíveis para posterior contagem. Um exemplo deste plástico é o LEXAN fabricado pela empresa General Electric Co, EUA (PRESSYANOV, 2004).

As câmaras de difusão têm a função de homogeneizar o processo de detecção do filme a fim de garantir os produtos registrados são os alvos de investigação. Um filtro é colocado na entrada da câmara com o objetivo de controlar a entrada dos elementos. Um modelo que cumpre a função foi desenvolvido pelo centro de pesquisa nuclear, KfK (KernforschungsZentrum), da Universidade Karlsruhe, Alemanha (Figura 33).

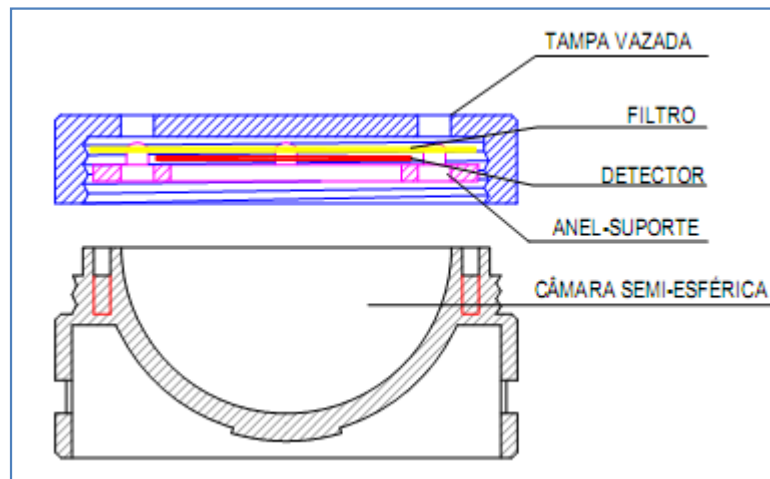


Figura 33. Câmara de difusão

Câmara iônica de eletreto – são dispositivos passivos com um valor acessível, leves e com uma boa acurácia para medições de contaminações alfas. A vantagem é que não necessita de um técnico para manuseá-lo. Este detector contém um disco de Teflon eletrostaticamente carregado. Os íons gerados pelo decaimento do radônio atingem a superfície e reduzem a sua voltagem. Com a medição da redução da voltagem, a concentração do radônio é determinada (CIE, 2007) (Figura 34).



Figura 34. Câmara Iônica de Eletreto

Monitores contínuos de ^{222}Rn – são dispositivos ativos que fazem a medição e a gravação da concentração de radônio de forma contínua. Eles requerem pessoas treinadas para manuseá-lo, além de serem mais caros (Figura 35).

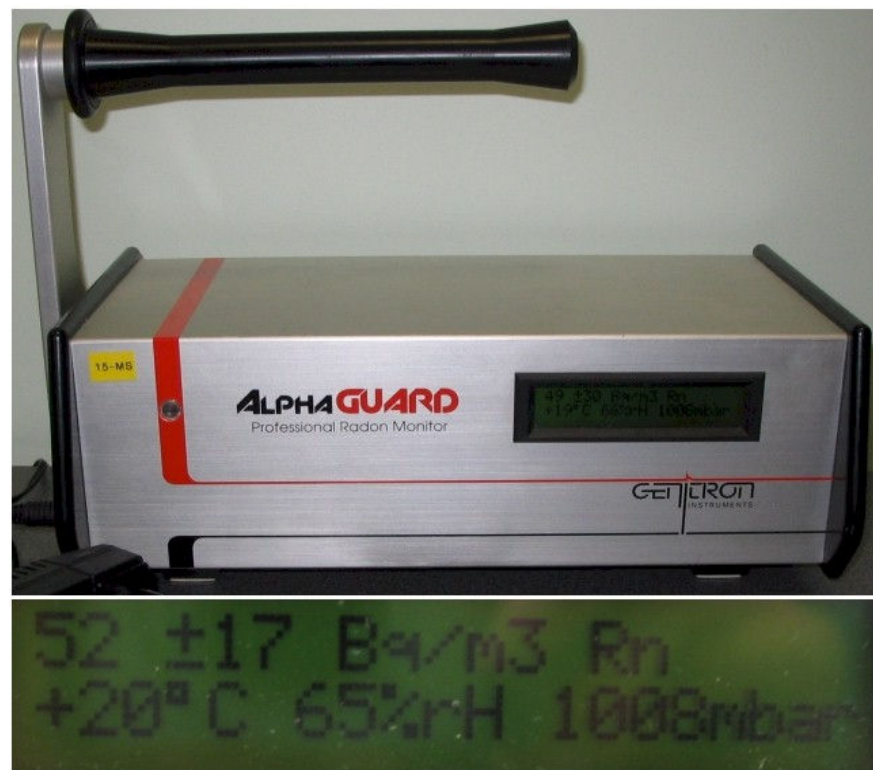


Figura 35. Monitor contínuo de ^{222}Rn AlphaGUARD®

3 METODOLOGIA

Para avaliar a contaminação do gás radônio na água na cidade de Curitiba e Região Metropolitana foram feitas coletas de água em poços comuns e poços artesianos em recipientes (garrafas PET de 600 mL). Posteriormente estas foram analisadas no laboratório da UTFPR com uma câmara de ionização modelo AlphaGUARD®, para determinar a concentração do ^{222}Rn .

3.1 ORIGENS DAS AMOSTRAS PARA COLETA

As amostras foram coletadas de poços convencionais e artesianos. Os poços convencionais são cavidades construídas no solo para o suprimento de água às pessoas. A profundidade varia conforme a distância até o lençol freático. Os poços artesianos, com o mesmo objetivo do poço convencional, diferem nas questões do diâmetro menor, da profundidade maior e da não necessidade de haver bombas para levar a água do fundo até a superfície, já que estas fluem naturalmente do solo ocasionadas por sua própria pressão.

3.2 INFORMAÇÕES SOBRE A LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS.

Para obter a informação sobre o local dos poços artesianos foram necessários contatos com o Instituto de Águas do Paraná, esta é uma entidade do Estado que dentre outras atividades controla a perfuração de poços artesianos e possui todos os locais das perfurações no Paraná. Para obtenção dos locais de poços convencionais foi necessário fazer diversos contatos com a comunidade em geral. As águas foram coletadas dos aquíferos Karst, Pré-Cambriano e Guabirota.

3.3 COLETAS DE AMOSTRA PARA POÇOS CONVENCIONAIS

Para as coletas utilizou-se quatro recipientes. Foi usado um dispositivo simples confeccionado para este fim, composto de uma corda, uma peça metálica com 200 gramas e do recipiente (figura 36). Este foi lançado no poço, como o peso do conjunto é superior ao empuxo exercido pela água este afundou. Borbulhas iniciaram-se mostrando que a água estava entrando e o ar saindo. Após cessar as borbulhas puxou-se a corda, pois a garrafa está

completamente cheia. Tampou-se a garrafa. O passo seguinte foi fazer o registro da amostra. Repetiram-se todos os passos para os outros três recipientes.

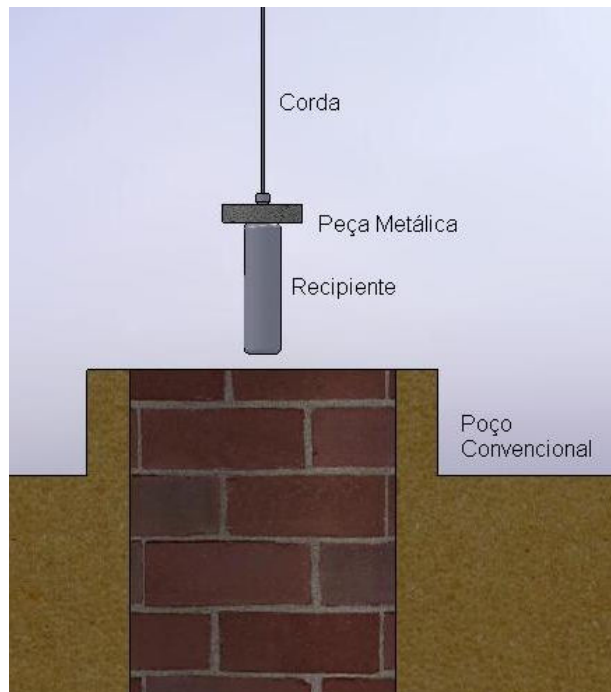


Figura 36. Dispositivo para coleta de água

3.3.1 Coletas de amostra para poços artesianos

Nesta coleta foram utilizados os mesmo recipientes. No poço foi aberto o registro e deixado à água fluir por um tempo de 5 minutos, este tempo é necessário para que se tenha certeza que água venha do fundo e não daquela que estava na tubulação, para evitar o efeito de partição. Passado este tempo encheu-se as garrafas. Tendo o cuidado de não deixar que a água entre com muita pressão o que resultaria em bolhas liberando o gás radônio. Tampou-se a garrafa. Deixando completamente cheia a garrafa, pois se houvesse espaços com ar poderia ocorrer à exalação do ^{222}Rn para esta região e no momento em que fosse abrir, para colocar no aparelho, o gás sairia para o ambiente e não se obteria a medição correta. Fez-se o registro e repetiu-se os procedimentos para as outras amostras (figura 37).

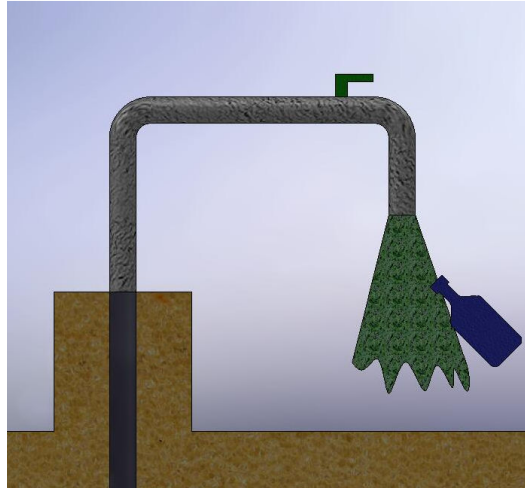


Figura 37. Poço artesiano - coleta

3.4 EQUIPAMENTO ALPHAGUARD®

O AlphaGUARD®, como mostra a (figura 38) é um equipamento portátil que faz a medição da atividade do gás radônio no ar, além de gravar simultaneamente a temperatura ambiental, umidade relativa e pressão atmosférica. O equipamento incorpora uma câmara de ionização por contagem de pulso, sendo capaz de monitorar concentrações de ^{222}Rn entre 2 a 2000000 Bq/m³. O equipamento é capaz de detectar e analisar ^{222}Rn no modo difusão no qual o ar entra diretamente no equipamento e no modo *flow* onde se necessita uma bomba para injetar o ar para dentro da câmara. No modo difusão o equipamento pode operar em ciclos 10 a 60 minutos e no modo *flow* em ciclos de 1 a 10 minutos. Na figura 39 verifica-se o modo *flow* de 1 minuto.



Figura 38. AlphaGUARD®.

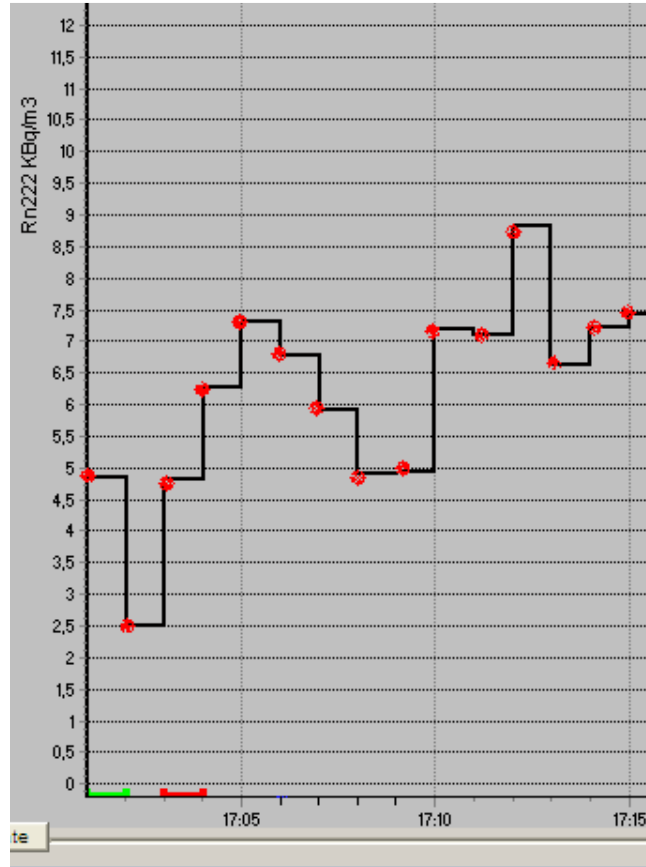


Figura 39. Flow mode com operação em 1 minuto

A concentração de ^{222}Rn na água $C_{\text{água}}$ é obtida pela equação (8) que envolve a quantidade de ^{222}Rn detectada no aparelho.

$$C_{\text{água}} = \frac{Car \cdot \left(\frac{Vol.equip - Vol.am}{Vol.am} + k \right) - Cbg \cdot \left(\frac{Vol.equip - Vol.am}{Vol.am} \right)}{1000} \quad (8)$$

Onde $C_{\text{água}}$ é a concentração em Bq/L, Car é a concentração em Bq/m³. Cbg é a concentração de background em Bq/m³, $Vol.equip$ é o volume interno do equipamento 1530 mL, $Vol.am$ é o volume da amostra de água 100 mL

O coeficiente de partição K , segundo manual do usuário AlphaGUARD® (GENITRON,1998), é calculado através da equação (9)

$$K = 0,105 + 0,405 \cdot \exp(0,502 \cdot T (^{\circ}\text{C})) \quad (9)$$

O equipamento possui uma bomba chamada AlphaPUMP que é responsável por bombear o ^{222}Rn para o interior da câmara de ionização. A faixa de bombeamento varia entre 0,03 a 1 L/min. Durante as medições utiliza-se a vazão de 0,03 L/min. (figura 40).



Figura 40. AlphaPUMP

3.5 AQUISIÇÕES DAS CONCENTRAÇÕES DAS ÁGUAS DOS POÇOS

Nas amostras de cada local foram marcadas as seqüências 1, 2, 3 e 4, as quais foram submetidas as análise em intervalos de 4 dias, para posteriormente construir os gráficos do decaimento radioativo do ^{222}Rn . Por exemplo: no primeiro dia é realizada a amostra número 1, após 4 dias será feita a amostra número 2 e assim por diante.

As concentrações foram determinadas com auxílio do AlphaGUARD®, conforme a figura 41. A amostra foi introduzida no equipamento com a taxa “flow mode” de 1 minuto, após um intervalo de 60 minutos o processo finalizou-se. Houve o cuidado em não agitar a água na hora de colocar no equipamento, para que o gás não fosse eliminado antes de ser feitas as medições, para isto foi utilizado a seringa que vem com o equipamento. Foi reservada uma das amostras analisadas para posterior medição da concentração do ^{226}Ra .

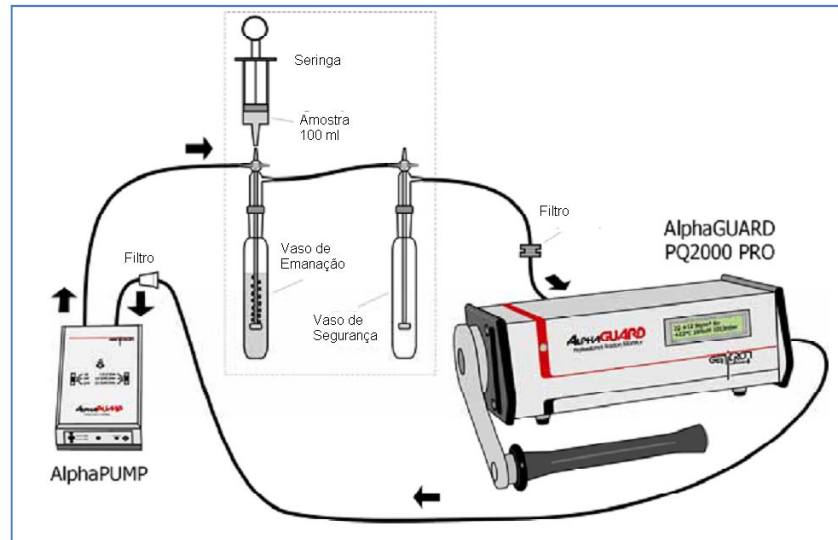


Figura 41. Montagem do AlphaGUARD® para análise de água

3.5.1 Concentrações de rádio nas águas dos poços

Foi feita mais uma medição com a amostra que havia sido armazenada, a qual se realizou após um intervalo de 10 meias-vidas do radônio, tempo necessário para ocorrer o equilíbrio secular entre o ^{222}Rn e o ^{226}Ra . O objetivo desta análise foi verificar a concentração do elemento ^{226}Ra , pois este é um emissor alfa e contribui para determinar a radioatividade global alfa na água (BRASIL, 2004).

Com as cinco medições analisadas foi construída a curva de decaimento e juntamente determinada a concentração do ^{226}Ra . Na figura 42 é apresentada a curva feita no software Origin8.1. Na legenda são apresentadas as concentrações iniciais e os erros do ^{222}Rn (A_{20}) e do ^{226}Ra (A_{10}). Os pontos referem-se às análises realizadas no laboratório. Para se determinar estas concentrações considerou-se o equilíbrio secular. A equação (10) mostra a concentração do ^{222}Rn (A_2) em função das concentrações iniciais do ^{222}Rn (A_{20}) e do ^{226}Ra (A_{10}).

$$A_2(t) = A_{10} \cdot (1 - \exp(-\lambda_{\text{Rn}} \cdot t)) + A_{20} \cdot \exp(-\lambda_{\text{Rn}} \cdot t) \quad (10)$$

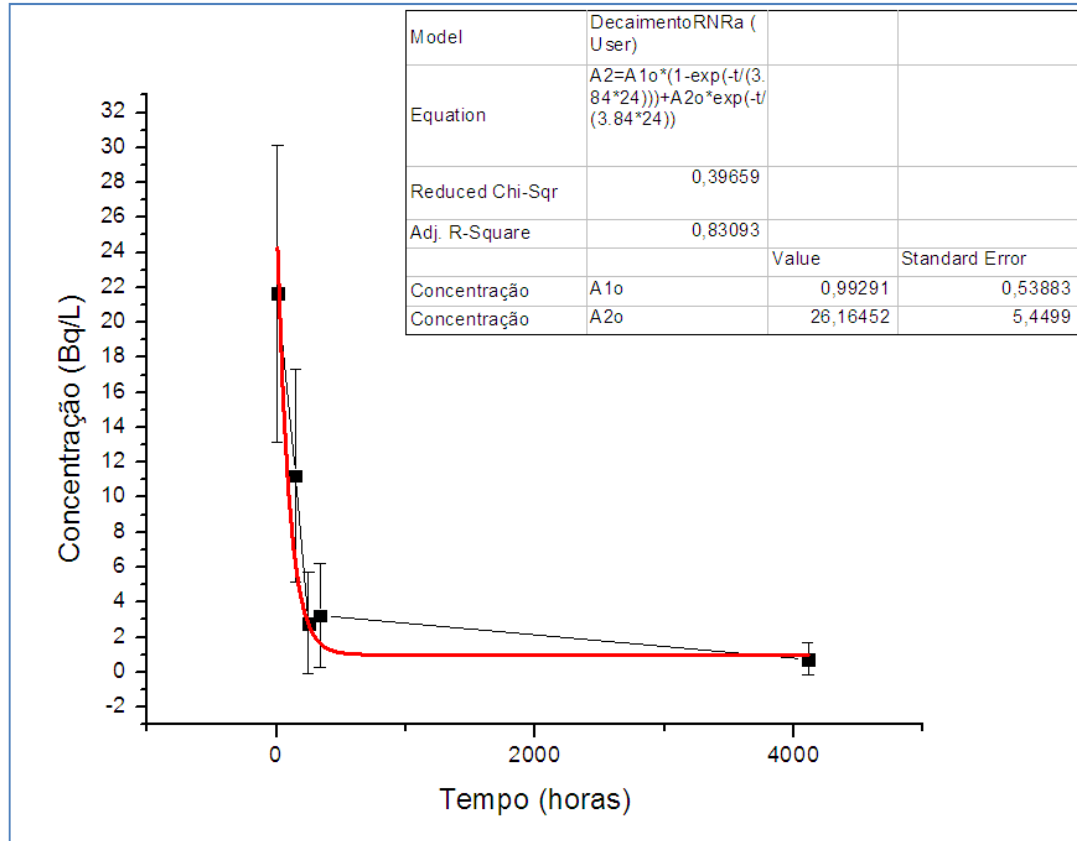


Figura 42. Curva de decaimento do ^{222}Rn e concentração do ^{226}Ra

3.6 AQUISIÇÕES DA CONCENTRAÇÃO DO RADÔNIO NO SOLO

Para as medições das concentrações do ^{222}Rn no solo foram desenvolvido uma broca e uma sonda (figura 43). A broca consiste em um tubo de aço SAE1020 com $\text{Ø}16\text{ mm} \times 1100\text{ mm}$, haste para girar 350 mm e broca com $\text{Ø}30\text{ mm}$ (figura 44). A sonda foi fabricada com um tubo do mesmo aço com diâmetro externo de 22 mm, diâmetro interno 13 mm e ponteira móvel com $\text{Ø}35\text{ mm}$ (figura 45). O equipamento foi desenvolvido com este tubo para que os gases possam sair do solo e serem captados pelo AlphaGUARD®, no caso o ^{222}Rn .



Figura 43. Foto da broca, sonda e haste

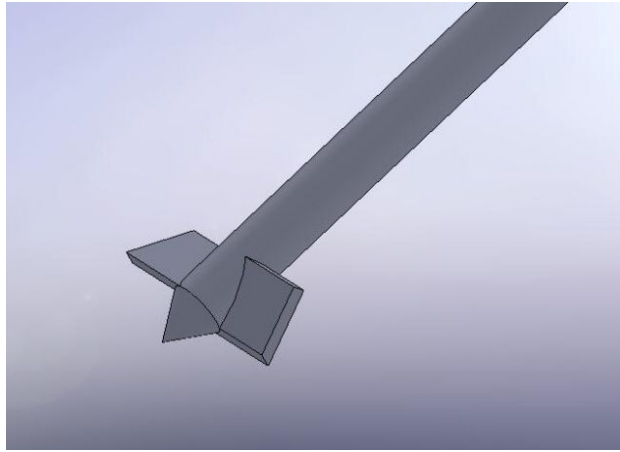


Figura 44. Ponta da broca

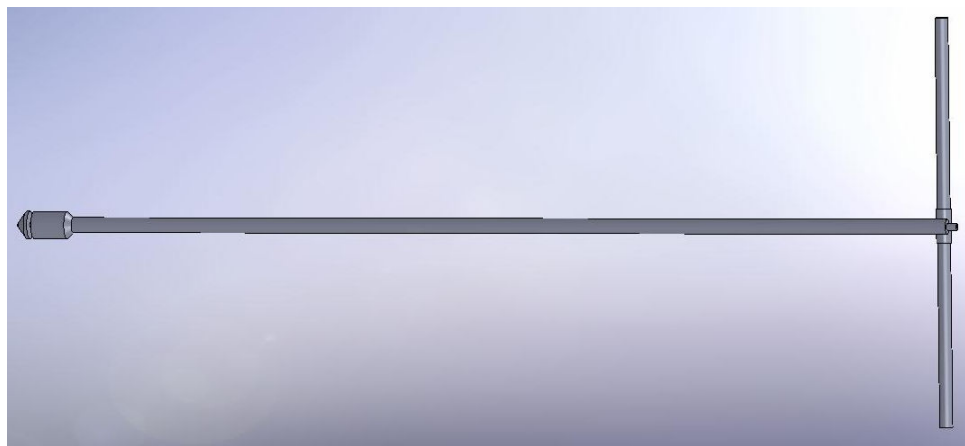


Figura 45. Sonda

Inicialmente foi feito um furo no solo com a broca manual com a profundidade de um metro. Em seguida foi introduzida a sonda. No momento que esta toca no fundo puxou-se 5 cm para abrir a ponteira e permitir a passagem dos gases, inseriu-se uma quantidade do solo, retirado com a broca, entre o furo e a sonda com o objetivo de vedar. Nas figuras 46 e 47 são mostradas a ponteira aberta, fechada e a sonda inserida no solo. Uma mangueira conectou o aparelho a sonda (figura 48). Ligou-se a bomba com um fluxo de bombeamento de 1 L/min. durante 5 minutos para retirar todo o volume de ar (0,348 litros) que havia no conjunto sonda, mangueira e AlphaGUARD® (figura 49), desta forma, garantindo que a medição foi efetuada com os gases provenientes do solo.

Após este tempo o equipamento ficou pronto para começar a fazer as medições. A taxa *flow mode* do equipamento foi ajustada para 1 minuto. A taxa de bombeamento alterada para 0,03 L/min. A medição foi realizada em 45 minutos. Na figura 50 e 51 são apresentadas fotos com todo equipamento em funcionamento.

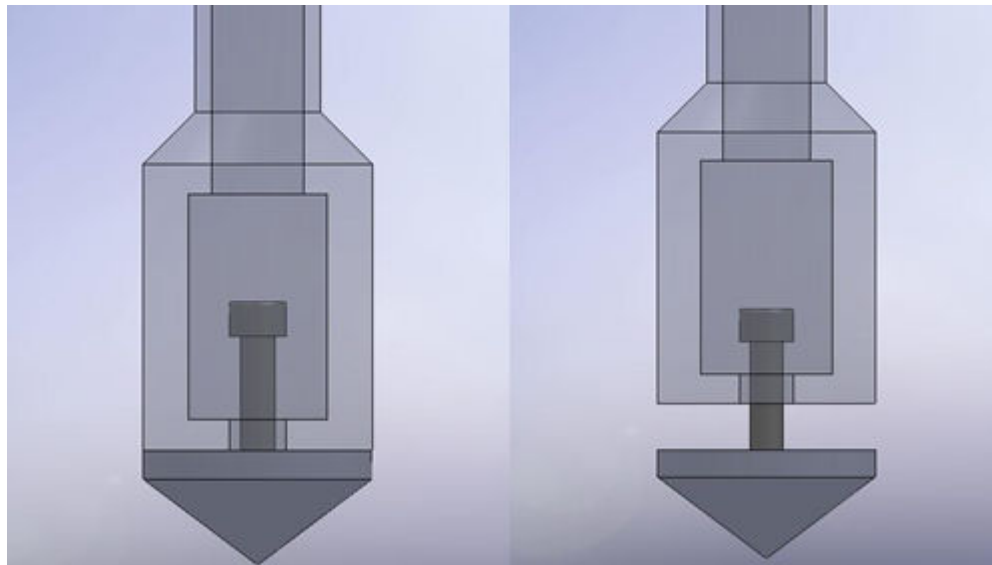


Figura 46. Visualização da ponta da sonda fechada e aberta

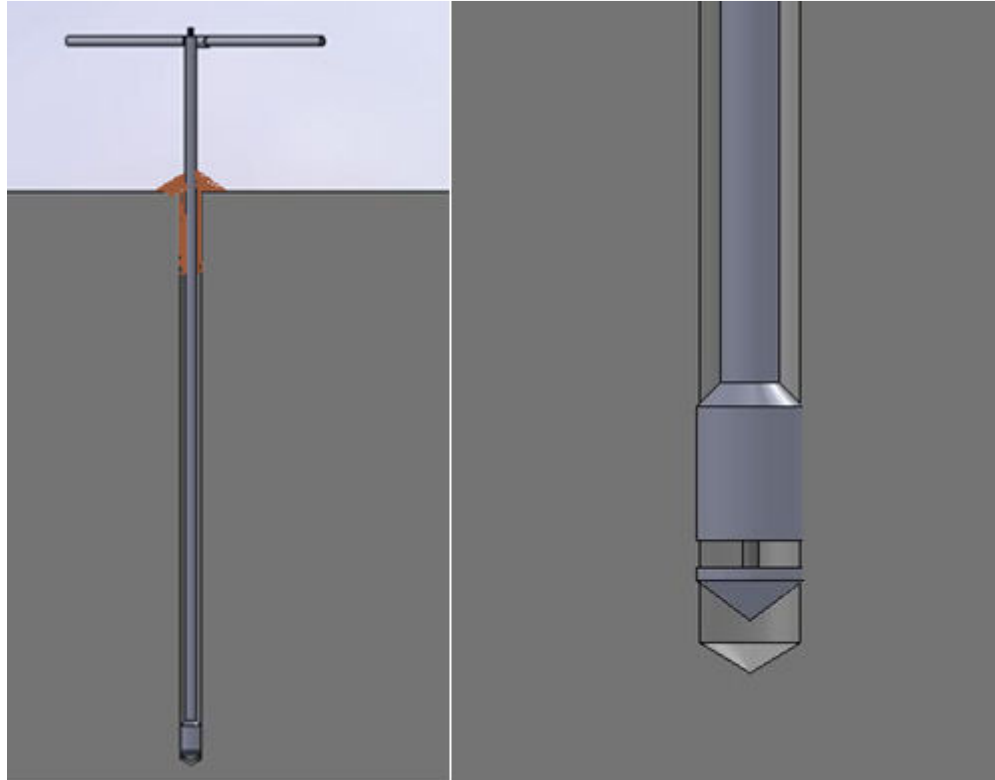


Figura 47. Sonda inserida no solo

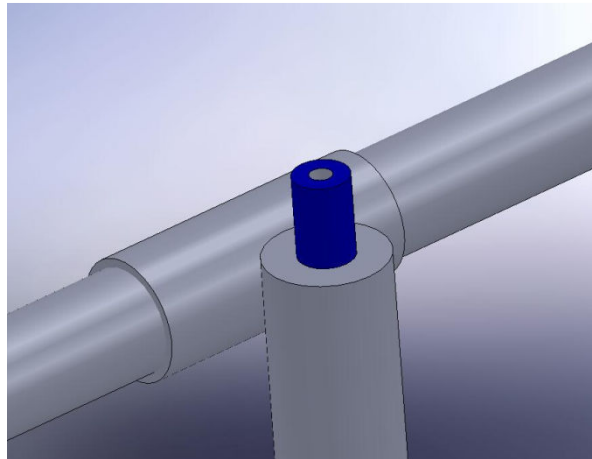


Figura 48. Conector da sonda à câmara de ionização

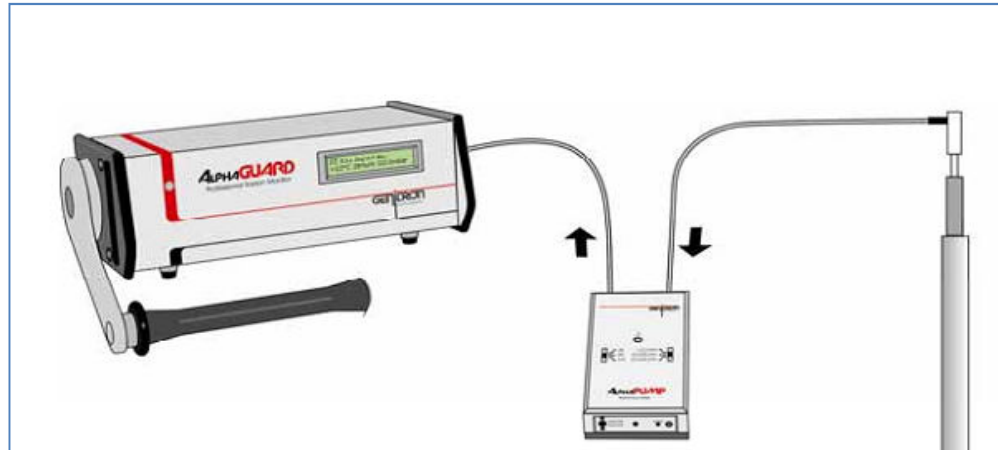


Figura 49. Montagem do AlphaGUARD® para medição do solo



Figura 50. Medição do ^{222}Rn no solo região Umbará



Figura 51. Medição do ^{222}Rn no solo região Jardim Botânico

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas figuras são apresentadas os valores de concentração do ^{222}Rn que foram coletados, tanto na água como no solo, além da concentração do ^{226}Ra .

No gráfico da figura 52 é apresentada a concentração de ^{222}Rn na água por regiões. Foram coletadas um total de 47 amostras de águas de poço. Foram calculadas as médias por região. Observou-se que grande parte das concentrações está acima do valor estabelecido pela norma da USEPA (USEPA, 1999), representada pela linha tracejada vermelha. Os níveis mais elevados da pesquisa foram encontrados na região do Novo Mundo.

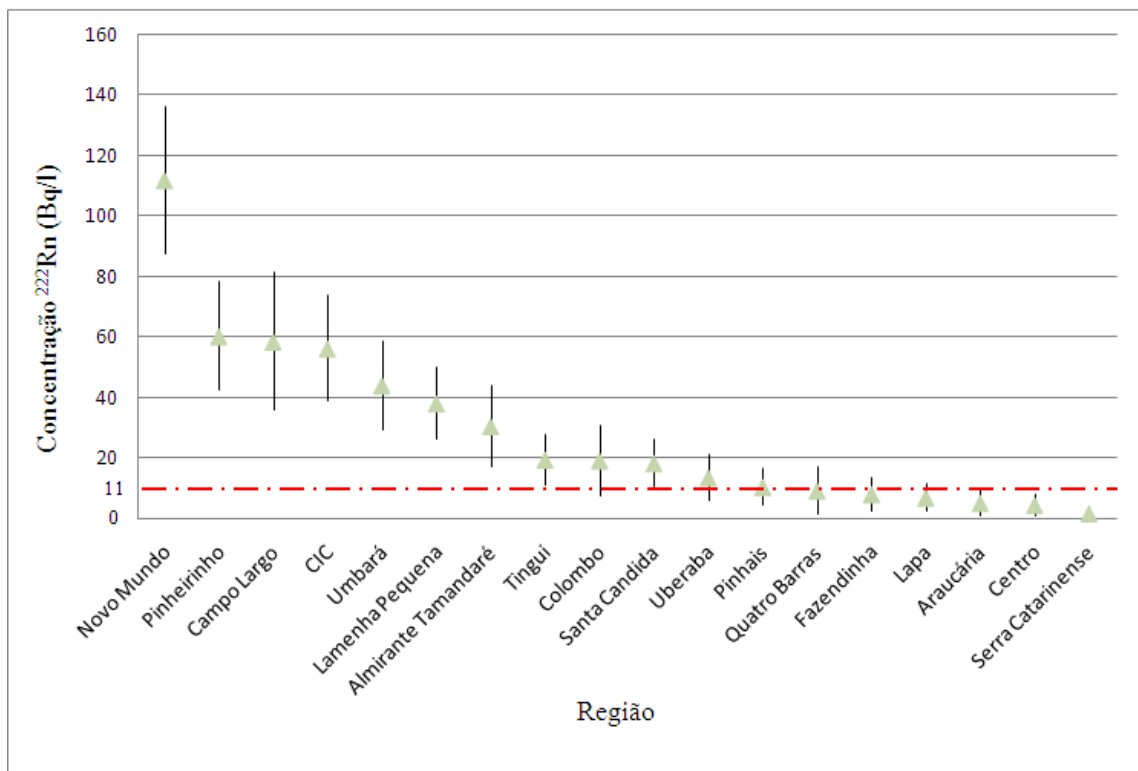


Figura 52. Concentração de ^{222}Rn na água por regiões

No gráfico da figura 53 é apresentada a concentração de ^{226}Ra na água por regiões. Similarmente ao que aconteceu para o ^{222}Rn , observa-se que grande parte das concentrações está muito acima do valor estabelecido pela portaria n° 518 (BRASIL, 2004), representada

pela linha tracejada vermelha. Os níveis mais elevados da pesquisa foram encontrados na região do Novo Mundo.

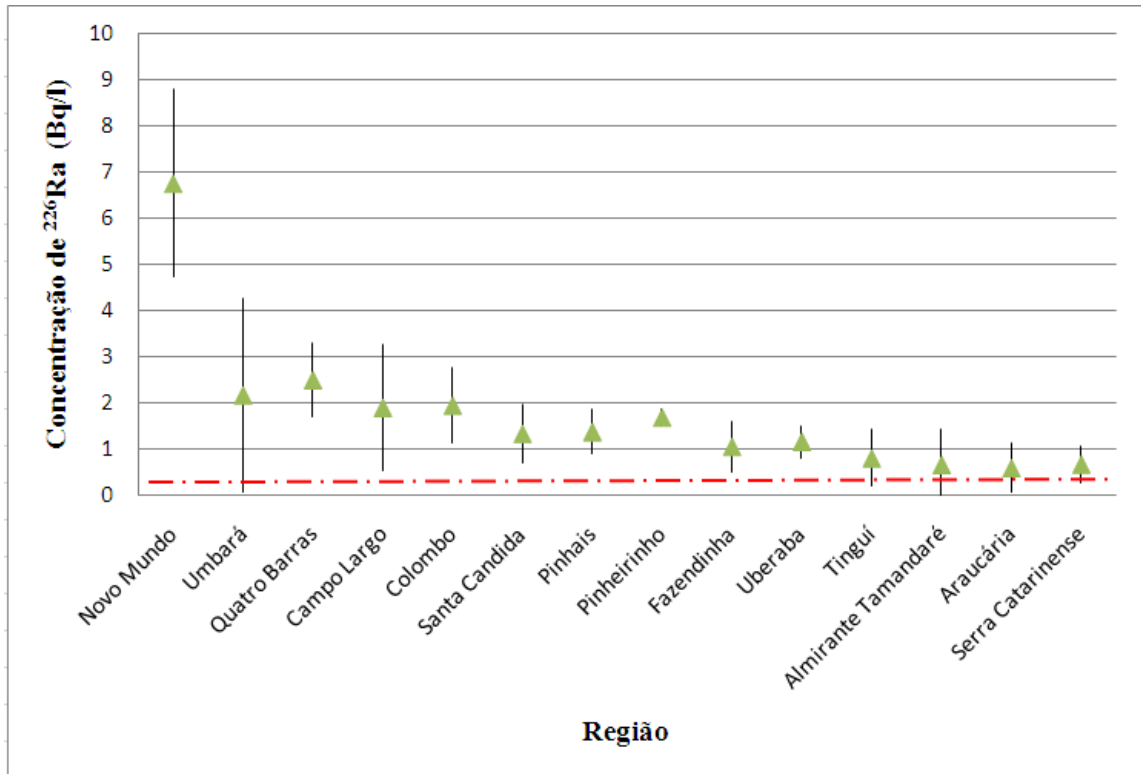


Figura 53. Concentrações de ^{226}Ra na água por regiões

Na figura 54, foi distribuída a concentração do ^{222}Rn pela frequência. Verifica-se que as maiores incidências de amostras continham concentrações de 20,1 Bq/L a 50 Bq/L. Apenas oito medições são inferiores ao limites da norma USEPA (USEPA, 1999), representado pela linha tracejada verde.

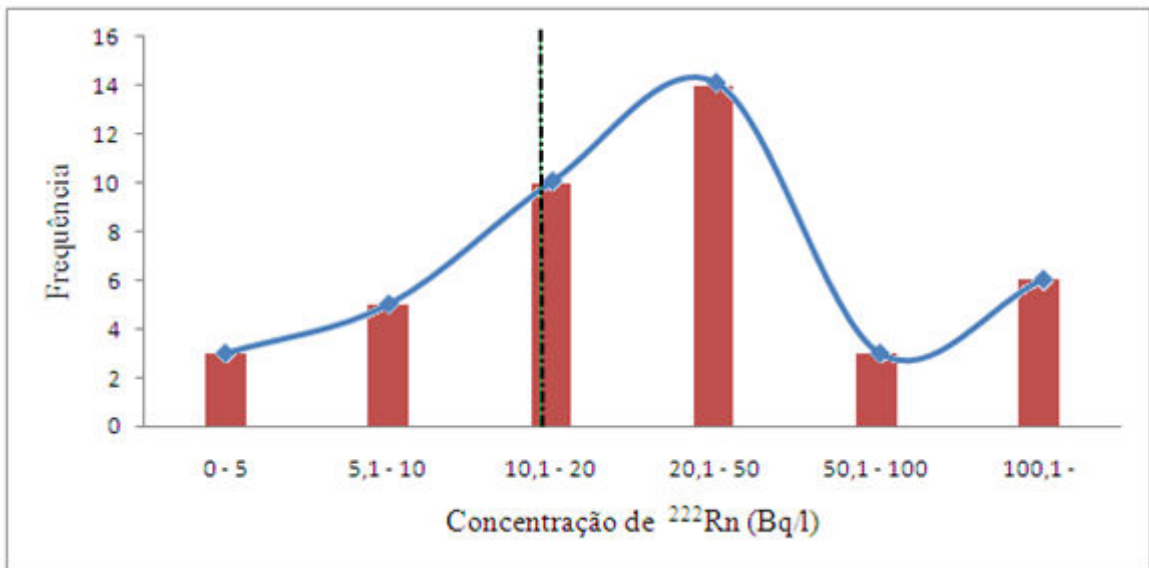


Figura 54. Frequência x Concentrações de ²²²Rn na água

Na figura 55, foi distribuída a concentração do ²²⁶Ra pela frequência. Verifica-se que a maior incidência de amostras continham concentrações de 1,1 Bq/L a 2 Bq/L. Poucos valores foram encontrados dentro dos valores estabelecidos pela portaria (BRASIL, 2004), representado pela linha tracejada verde.

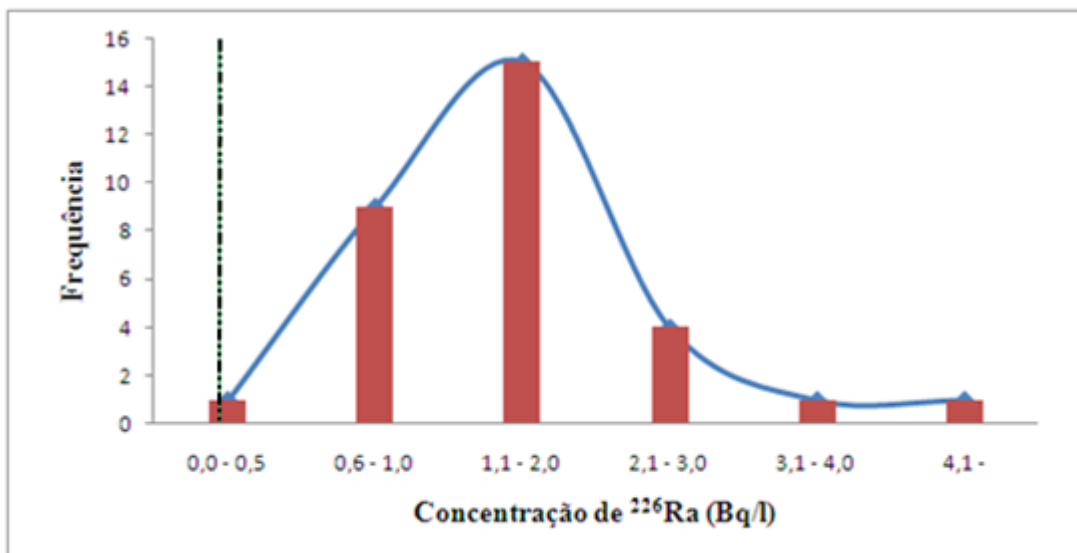


Figura 55. Frequência x Concentrações de ²²⁶Ra na água

Na Figura 56 é apresentado um gráfico das concentrações de ^{222}Rn no solo por regiões, estas apresentaram valores elevados principalmente nas regiões do Umbará e Bom Retiro.

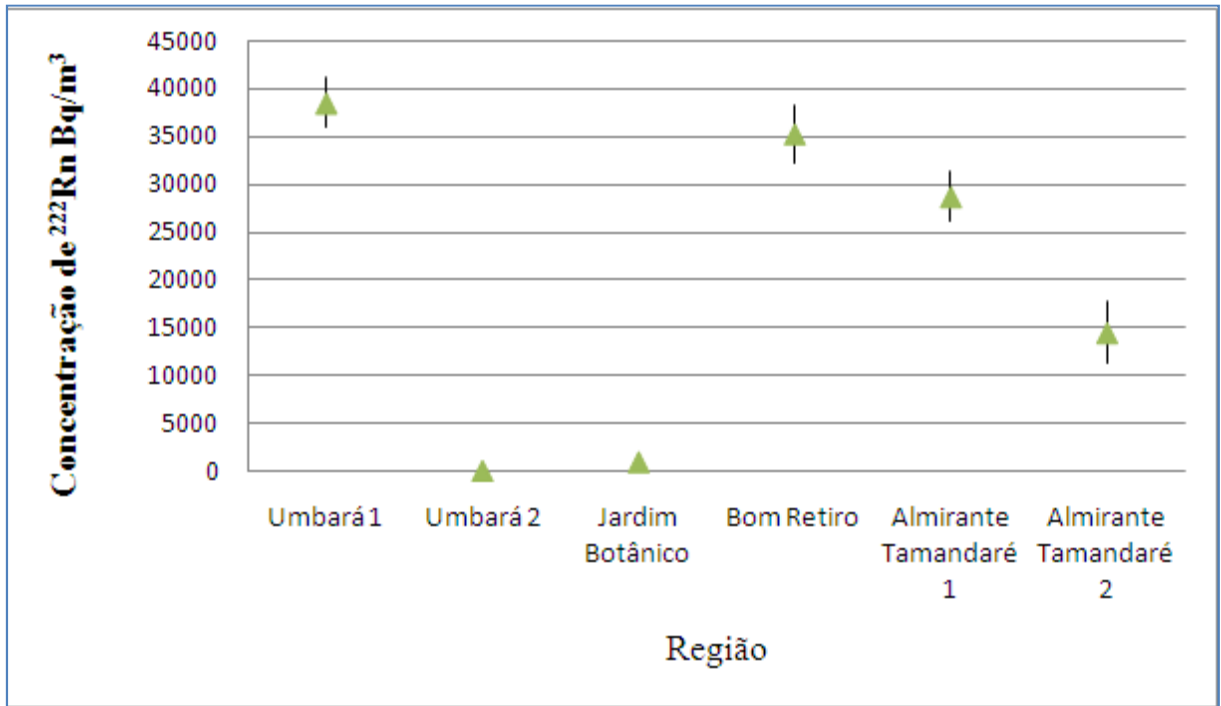


Figura 56. Concentrações de ^{222}Rn no solo por regiões

5 CONCLUSÃO

Durante a pesquisa foram coletadas amostras de água de poços comuns e artesianos de várias regiões de Curitiba e Região Metropolitana. No contato com os proprietários dos poços houve muita resistência para conseguir a liberação da coleta das amostras, visto que o termo radiação provoca temor nas pessoas, sendo assim houve uma grande preocupação na maneira na qual se falava sobre o assunto. A grande maioria das pessoas não permitiu as coletas de água, sendo este um fator que dificultou a aquisição das amostras.

Como o foco principal da pesquisa foi a aquisição da água, foram realizadas apenas algumas medições no solo. Alguns fatores dificultaram a aquisição de mais amostras como: a liberação do equipamento para uso em campo, necessidade de ter veículo, o clima estar bom, os horários disponíveis dos integrantes do grupo de pesquisa coincidirem e a liberação do proprietário para a medição do solo. Nas medições do solo foi desenvolvida uma sonda com base em uma sonda comercial. Esta comercial necessita a utilização de uma marreta para penetrar a sonda no solo, exigindo muita força da pessoa colocá-la. Além de ter uma espécie de rebite na ponta o qual deveria ser retirado a cada medição. Como a sonda tem um diâmetro pequeno, deveria ser utilizada uma pinça especial para retirar o rebite ou simplesmente deixá-lo dentro do furo. Por todos estes inconvenientes foi desenvolvida uma sonda para solucionar estes problemas.

Os resultados das amostras de águas de poços comuns e poços artesianos analisadas em Curitiba e Região Metropolitana apresentaram, na sua maioria, níveis de concentrações de ^{222}Rn acima dos limites estabelecidos pela norma USEPA (USEPA, 1999).

As concentrações do ^{226}Ra apresentaram valores superiores ao estabelecido pela Portaria nº518 (BRASIL, 2004).

Na região Sul de Curitiba, onde foram encontrados valores com as maiores concentrações, há a presença de gnaiss no solo, conforme citando anteriormente este é rico em urânio.

A construção da sonda para análise do solo mostrou-se satisfatória, pois propiciou determinar as concentrações de ^{222}Rn no solo. Além de esta ser mais barata e fácil de usar.

A pesquisa contribui para aumento de dados das concentrações do ^{222}Rn e ^{226}Ra no Brasil, mais especificamente no Paraná.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Na pesquisa realizada foram apresentados vários locais em que as concentrações estão acima dos níveis estabelecidos pelas normas. Então se sugere alguns temas para trabalhos futuros:

- Desenvolver um equipamento de custo acessível para remoção do ^{222}Rn da água a níveis seguros.
- Realizar mais coletas do solo para fazer um mapeamento das concentrações de ^{222}Rn em Curitiba e Região Metropolitana.
- Realizar as medições de solo com uma sonda comercial.
- Desenvolver um equipamento para a remoção do ^{226}Ra da água.
- Realizar este trabalho com a câmara de ionização da marca RAD7[®].

REFERÊNCIAS

ABAS. Disponível em www.abas.org.br Acessado em 09 de março de 2011.

ÁGUAS PARANÁ Disponível em <http://www.aguasparana.pr.gov.br> Acessado em 20/02/2011.

AKERBLOM, G and LINDGREN, J. 1997. **Mapping of groundwater radon potential.** *European Geologist*, 5:13-22.

ALMEIDA et al. **Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil** / *Journal of Environmental Radioactivity* 73 (2004) 323–334.

ALBERG, A. J., Ford, J. G., Samet, J. M. (2007). **Epidemiology of Lung Cancer: ACCP Evidence-Based Clinical Practice Guidelines** (2nd Edition). *Chest* 132: 29S-55S

ATSDR. Disponível em <http://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=71> Acessado em 19/02/2011.

BEIR VI. **Health Effects of Exposure to Radon**, Samet, J et al. National Academy of Sciences, 1999.

BIBLIOTECA DIGITAL Disponível em http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/42/htm/sec_6.html Acessado em 01/03/11.

BRADY, N. **The Nature and Properties of Soils**, 8th Edition. MacMillan Publishing Co., Inc. 1974.

BRASIL. Decreto-Lei no. 7841 de 8 de agosto de 1945, **Código de Águas Minerais**. Diário Oficial da União, Rio de Janeiro, 20 de agosto de 1945, Seção 1 , parte 1.

BRASIL. Portaria n.º 518, de 25 de março de 2004. Capítulo IV do Padrão de Potabilidade.

BONOTTO. **Doses from ^{222}Rn , ^{226}Ra , and ^{228}Ra in groundwater from Guarani aquifer, South America.** Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, São Paulo, Brazil 2004.

BONOTTO. **Radon and progeny (^{214}Pb and ^{214}Bi) in urban water-supply systems of São Paulo State, Brazil.** Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, São Paulo, Brazil 2008

BUSHONG, Stewart. **Radiologic science for technologists** 7ª edição. Mosby 2001.

CAMARGO. **Águas minerais brasileiras: fontes de águas quentes e frias**. Editora Parma, São Paulo, Brazil, 200 pp. 1974

CÁRSTICO. Disponível em <http://www.omniplast.com.br> Acessado em 8/03/11.

CÉSIO. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>, acessado em 10/03/2011.

CHOPPIN, G. R.; Liljenzin, J. -O.; Rydberg, J.; **Radiochemistry and Nuclear Chemistry**, Butterworth-Heinemann: Oxford, 1995.

CIE Disponível em-<http://enhs.umn.edu/hazards/hazardssite/radon/radonmonitor.html> acessado em 10/03/11.

CORRÊA, J. N. **Avaliação da concentração de gás radônio em ambientes de convívio humano na região metropolitana de Curitiba**. Curitiba: Editora da UTFPR, 2006. Dissertação de Mestrado. PPPGEM, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

COTHERN, C. R.; SMITH, J. E. Jr. **Environmental Radon. Environmental Science Research**. Vol. 35. Plenum Press, New York, 1987.

CROSS, F.T.; HARLEY, N.H.; HOFMANN, W. **Health effects and risk from ^{222}Rn in drinking water**. Health Physics. 48: 649-670, 1985.

DETECTORES. Disponível em <http://ciencia.hsw.uol.com.br/radonio3.htm> Acessado em 03/03/2011.

DUPUY, Jean-Pierre. **A catástrofe de Chernobyl vinte anos depois / The Chernobyl catastrophe twenty years later** Fonte: Estud. av;21(59):243-252, jan.-abr. 2007

EPA. **Region 6 Radon/Indoor Air Quality Workshop**. March 23, 2010

EUROPEAN COMMISSION. 2001. **Commission Recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies (notified under document number C (2001) 4580)**. Official Journal, L344, pp 85-88.

FIOR, LORIANE. **Análise da concentração de radônio proveniente dos materiais de construção**. UTFPR, Curitiba: Editora da UTFPR, 2008. Dissertação de Mestrado. PPPGEM, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

FITZGERALD. **Experimental Assessment of the Short- and Long-Term Effects of ^{222}Rn from Domestic Shower Water on the Dose Burden Incurred in Normally Occupied Homes**. Environmental Science & Technology 1997.

FITZGERALD B, Hopke PK, Datye V, Raunemaa T, Kuuspallo K. 1997. **Experimental assessment of the short and long term effects of Rn-222 from domestic shower water on the dose burden incurred in normally occupied homes**. Environmental Science and Technology 31:1822- 1829.

- FONSECA, M. R. M. da; **Completamente Química** – Físico-Química, Ed. FTD: São Paulo, 2001.
- GARBESI, K., Robinson, A., Sextro, R. and Nazaroff, W. **Radon Entry into Houses: The Importance of Scale-Dependent Permeability**. Health Physics 77, 183-191, 1999.
- GENITRON INSTRUMENTS. **AlphaGUARD® portable radon monitors user's manual**. 1998
- GEOLOGIA Disponível em http://www.cbpm.com.br/paginas/oque_geologia.php Acessado em 22/03/11.
- GODOY. **Natural Radioactivity in Brazilian Groundwater**. Journal of Environmental Radioactivity 85 (2006) 71-83.
- GRANULOMETRIA Disponível em <http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Granulometria> Acessado em 21/02/2011.
- GUNDERSEN, L.C.S., Schumann, R.R., Otton, J.K., Dubiel, R.F., Owen, D.E., and Dickinson, K.A. **Geology of Radon in the United States**. Geological Society of America, Special Paper 271, 1992.
- HALL EJ. 1994. **Radiobiology for the Radiologist**. 4th edition. Philadelphia. PA: J.B. Lippincott.
- HARLEY NH, ROBBINS ES. 1992. **Rn-222 alpha dose to organs other than the lung**. Radiation Protection Dosimetry 45:619-622.
- HYPERPHYSICS. Disponível em <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/radser.html>. Acessado em 11/04/2011
- HOFFMAN, R. **Radon Contamination of Residential Structures: Impact of the “Weather Effect” on the Short-Term Radon Test**. AARST International Radon Symposium; 1995.
- HUGHES, D. J. **The Neutron Story**, Anchor: Garden City, NY, 1959.
- IAEA - **International Atomic Energy Agency**. Disponível em: <www.cnen.gov.br>. Acesso em: Agosto de 2010.
- ICRP 60 - International Commission on Radiological Protection. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, Oxford: Pergamon Press, 1991.
- IIMOTO T. **Application of activated charcoal radon collectors in high humidity environments**. Journal of environmental radioactivity. Research Center for Nuclear Science and Technology. The University of Tokyo. 2005
- IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Disponível em: <www.ipen.br>. Acesso em: Setembro de 2010.

JACOBI W, EISFELD K. 1980. **Dose to tissues and effective dose equivalent by inhalation of radon-222. Radon and their short lived daughters.** Report S-626. Munich: Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung.

JACOMINO - **Estimates of Cancer Mortality Due to the Ingestion of Mineral Spring Waters from a Highly Natural Radioactive Region of Brazil.** Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 33, No. 3, pp. 319-329, 1996

KRESWKI, D.; LUBIN, J. H.; ZIELINSKI, J. M.; ALAVANJA, M.; CATALAN, V. S.; FIELD, R.W. - **Residential Radon and Risk of Lung Cancer: a Combined Analysis.** 7 North American Case-Control Studies. 2005.

LANL - **Los Alamos National Laboratory.** Disponível em: < <http://periodic.lanl.gov/elements/86.html> >. Acesso em: Agosto de 2010.

LANL. Disponível em <http://periodic.lanl.gov/88.shtml> acessado em 10/03/11.

LEWIS – **A living Radon Reference Manual,** Pennsylvania Department of Environmental Protection. Bureau of Radiation Protection, Radon Division, 2009

LORENZO. Disponível em <http://marianaideiasforadacaixa.wordpress.com/2010/10/09/geomorfologia-%E2%80%93-relevos-do-parana/> Acessado em 20/03/2011.

LUCAS - **Radon content in groundwater drawn from the metamorphic basement, Eastern São Paulo State, Brazil.** Radiation Measurements 42 (2007) 1703 – 1714.

MACHADO. Disponível em <http://www.clickfozdoiguacu.com.br/foz-iguacu-noticias/cataratas-do-iguacu-esta-entre-as-28-finalistas-do-new-seven-wonders> Acessado em 20/03/2011

MARQUES. **Níveis de radioatividade natural decorrente do radônio no complexo rochoso da Serra de São Vicente, SP.** Radiol. Bras. 2006;39(3):215–218

MEIO AMBIENTE – www.meioambiente.pro.br Acessado em 09 de março de 2011.

MINEROPAR <http://www.mineropar.pr.gov.br/> Acessado em 10 de março de 2011.

MOURÃO. **Medicina hidrológica: moderna terapêutica das águas minerais e estâncias de cura.** Editora Prisma, Poços de Caldas, Brazil, 723 pp.

MUELLER ASSOCIATES. **Indoor Air Quality Environmental Information Handbook: Radon.** Prepared for U.S. Department of Energy, DOE/PE/72013-2. Janeiro 1986.

NAZAROFF WW, Doyle SM, Nero AV, Sextro RG. **Potable water as a source of airborne Rn-222 in U.S. dwellings: a review and assessment.** Health Physics 52(3):281-295. 1987.

NCI PUBLICATION – National Cancer Institute: **What you need to know about lung cancer.** Disponível em: < <http://www.cancer.gov/dictionary/?CdrID=46554> >. Acesso em: agosto de 2010.

NETO, Edmundo T. **Caracterização Geotécnica do Subsolo de Curitiba para o Planejamento de Ocupação do Espaço Subterrâneo**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007

NRPB – National Radiological Protection Board. Disponível em: < <http://www.hpa.org.uk/radiation> >. Acesso em: Agosto 2010.

OLIVEIRA, J.; MOREIRA, S.R.D.; MAZZILLI, B. **Natural radioactivity in mineral spring waters of a highly radioactive region of Brazil and consequent population doses**. *radiatProtDosim.*, 55: 57-59, 1994.

PORTAL SÃO FRANCISCO Disponível em <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/fissao-e-fusao-nuclear/caracteristicas-gerais-do-nucleo.php> Acessado em 2/03/2011.

PRESSYANOV, D.; BUYASSE, J.; POFFINJN, A.; DEYNSE, A. V.; MEESEN, G. **Integrated measurements of ^{222}Rn by absorption in Makrofol**. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, v. 516, p. 203 – 208, 2004.

PROJETO MANHATTAN. Disponível em http://www.fcf.usp.br/Ensino/Graduacao/Disciplinas/LinkAula/My-Files/projeto_manhattan.htm , acessado em 02/02/2011.

RADIOBIOLOGY FOR THE RADIOLOGIST. Eric J. Hall, 5^o Edition. Lippincott Williams & Wilkins. 1972

RADIUM GIRLS. Disponível em <https://php.radford.edu/~wkovarik/drupal/?q=node/24> acessado em 10/03/11

SINGH. S.; KUMAR. M MAHAYAN, R.K. **The study of indoor radon in dwellings of Bathinda district, Punjab, India and its correlation with uranium and radon exhalation rate in soil**. *Radiation Measurements*, v. 39, p. 535 – 542, 2005.

SKEPPSTROM, K. and OLOFSSON, B. **Uranium and radon in groundwater**. Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. 2007.

SNYDER, C. H.; **The Extraordinary Chemistry of Ordinary Things**, 3rd ed., John Wiley & Sons: New York, 1997, p. 656.

SOTO, J.; QUINDOZ, L.S.; DLZ-CANEJA, N. **^{226}Ra and ^{222}Rn in natural waters in two typical locations in Spain**. *RadiatProtDosim.*, 24(1/4): 109-111, 1988.

TANNER, A. B. **Radon Migration in the Ground**. A Review, in Adams, J.A.S., and Lowder, W.M., eds. *The Natural Radiation Environment*: Chicago, University of Chicago Press, pp 161-190, 1964.

UFRGS Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/radio/capitulo1.htm>. Acessado 05/03/11.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, 2000. 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**, 2006. 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**, 1993. UNSCEAR, Report to the United Nations General Assembly.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Office of groundwater and drinking water**. Disponível em: < <http://www.epa.gov/radon/rnwater.html> >. Acesso em: agosto de 2010.

UTORONTO. Disponível em <http://www.ehs.utoronto.ca/services/radiation/radtraining/module1.htm>. Acessado em 28/02/2011.

VILA VELHA. Disponível em <http://vsites.unb.br/ig/sigep/sitio029/sitio029.htm> Acessado em 20/03/2011

WARD JF. 1988. **DNA damage produced by ionizing radiation in mammalian cells: Identities, mechanism of formation, and reparability**. Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology 35:95-125.

WHO - **Guideline for Drinking Water Quality**. Radiologic Aspects, 2004

WHO - **Handbook on Indoor Radon: a public health perspective** / edited by Hajo Zeeb, and Ferid Shannoun. 2009

WILKENING M. **Radon in the environment**. Elsevier, 1990

APÊNDICE A – Produção bibliográfica

CORREA, Janine Nicolosi ; PASCHUK, S. A. ; SCHELIN, Hugo Reuters ; Laércio Barbosa ; Tatyana Sadula ; Cristiana A. Matsuzaki . 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.

PASCHUK, S. A. ; CORREA, Janine Nicolosi ; SCHELIN, Hugo Reuters ; Laércio Barbosa ; Tatyana Sadula ; Cristiana Akári Matsuzaki . 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.

PASCHUK, S. A. ; CORREA, Janine Nicolosi ; SCHELIN, Hugo Reuters ; Laércio Barbosa ; Tatyana Sadula ; Cristiana Akári Matsuzaki . Radon in Soil Gas Survey in Curitiba (Brazil). Measurements of Radon in Soil Gas. XXXII Reunião de Trabalho de Física Nuclear no Brasil. Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil, 2009.

PASCHUK, S. A; CORREA, Janine Nicolosi; SCHELIN, Hugo Reuters; Laércio Barbosa; Tatyana Sadula; Cristiana Akári Matsuzaki, Valeriy Deniak, Allan F. N. Perna. Contaminação pelo ^{222}Rn e seus filhos em materiais de construção, solo e água. XXXII Reunião de Trabalho de Física Nuclear no Brasil. Campos do Jordão, São Paulo, Brasil, 2009.

APÊNDICE B - Medições realizadas com apenas um decaimento radioativo do ^{222}Rn .

Medições com apenas um decaimento radioativo do ^{222}Rn									
Nº Amostra	Concen- -tração Média (Bq/m ³)	Erro (Bq/m ³)	Concen- -tração Média (Bq/L)	Erro (Bq/L)	Concen- -tração Média (Corrigida)	Erro (Corrigido)	Data da Medição	Início da Mediçã o	Arquivo
1	437,97	278,85	6,36	4,06	23,05	14,68	12/8/2008	15:49	80812
2	2382,32	723,33	34,67	10,53	103,82	31,52	21/08/2008	14:47	080821b
3	7327	1683	106,63	24,49	106,63	24,49	21/08/2008	16:22	80902
6	1234	485	17,96	7,06	18,75	7,37	23/10/2008	15:43	81023
7	957	436	13,93	6,35	41,78	19,03	30/10/2008	14:41	81030
8	1760	607	25,61	8,83	26,58	9,17	12/5/2008	14:56	081205a
9	3220	960	46,48	13,97	49,42	14,73	12/5/2008	16:05	081205b
10	5050	1160	73,5	16,88	76,03	17,46	21/01/2009	14:49	90121
11	3260	920	47,44	13,4	47,9	13,51	28/01/2009	15:20	90128
12	1770	665	25,76	9,67	31,06	11,67	30/01/2009	15:48	90130
26	306,47	250,14	4,46	3,64	4,46	3,64	27/08/2009	09:31	90827
27	128,02	151,32	1,86	2,2	6,4	7,57	2/9/2009	14:15	090902a

APÊNDICE C – Medições realizadas com 1 decaimento radioativo do ^{222}Rn e um decaimento do ^{226}Ra

Medições com 1 decaimento radioativo do ^{222}Rn e decaimento do ^{226}Ra									
Nº Amostra	Concentração Média (Bq/m³)	Erro (Bq/m³)	Concentração Média (Bq/L)	Erro (Bq/L)	Concentração Média (Corrigida)	Erro (Corrigido)	Data da Medição	Início da Medição	Arquivo
13	344,99	234,86	5	3,41	5,2	3,57	6/3/2009	15:32	090306b
	105,32	123,72	1,53	1,8	*	*	11/5/2010	08:15	100511a
14	1572	565	22,88	8,22	24,07	8,65	6/3/2009	16:39	090306c
	115,9	131,35	1,69	1,91	*	*	6/5/2010	08:58	100506
15	4330	1060	63,01	15,42	112,12	27,45	9/3/2009	14:16	090309a
	159,25	157,56	2,32	2,29	*	*	13/05/2010	09:34	100513
16	5830	1500	85,87	21,83	152,25	39,11	9/3/2009	15:30	090309b
	101,53	120,77	1,48	1,76	*	*	11/5/2010	09:34	100511b
17	6400	1733	92,98	25,22	168	45,57	9/3/2009	16:50	090309d
	114,13	128,93	1,66	1,88	*	*	14/05/2010	08:16	100514
18	2496	837	36,33	12,18	44,03	14,76	12/3/2009	15:57	90312
	137,41	157,51	2	2,29	*	*	20/05/2010	10:28	100520
19	127,02	136,27	1,84	1,98	16,7	17,91	18/03/2009	14:39	090318a
	159,77	187,1	2,33	2,72	*	*	19/05/2010	10:56	100519b
20	315,57	226,4	4,59	3,29	48,91	35,12	19/03/2009	12:09	090319a
	144,63	161,35	2,1	2,35	*	*	18/05/2010	10:45	100518
21	279,63	233,3	4,07	3,39	44,15	36,78	19/03/2009	13:33	090619c
	196,42	200,6	2,86	2,92	*	*	19/05/2010	09:22	100519a
25	304,07	246,89	4,42	3,59	6,8	5,52	20/08/2009	16:20	90820
	88,78	110,07	1,29	1,6	*	*	24/11/2009	12:46	91124
28	92,8	125,31	1,35	1,82	1,65	2,23	2/9/2009	15:30	090902b
	22,85	70,94	0,33	1,03	*	*	15/03/2010	18:23	100315d
43	623	366	9,06	5,35	27,74	16,29	5/10/2009	15:13	091005b
	68,55	82,83	1	1,21	*	*	9/4/2010	2010	100409b
44	620	383	9,02	5,57	27,69	17,1	5/10/2009	16:24	091005c
	69,48	96,13	1,01	1,4	*	*	16/04/2010	10:55	100416a
45	753	427	10,96	6,21	34	19,3	5/10/2009	17:33	091005d
	80,88	106,55	1,18	1,55	*	*	16/04/2010	12:41	100416b

APÊNDICE D – Medições realizadas com 2 decaimentos radioativo do ^{222}Rn e um decaimento do ^{226}Ra

Medições com 2 decaimentos radioativo do ^{222}Rn e decaimento do ^{226}Ra									
Nº Amostra	Concentração Média (Bq/m ³)	Erro (Bq/m ³)	Concentração Média (Bq/L)	Erro (Bq/L)	Concentração Média (Corrigida)	Erro (Corrigido)	Data da Medição	Início da Medição	Arquivo
22	2300	691	33,575	10	60,193	18,02	23/03/2009	14:55	90323
	296,3	271,9 5	4,312	3,96	*	*	1/4/2009	16:14	90401
	122,03	129,3 1	1,78	1,88	*	*	23/11/2009	10:44	91123
23	3220	1200	46,86	17,46	55,07	20,52	2/6/2009	16:11	90602
	2836	937	41,27	13,63	*	*	5/6/2009	15:01	90605
	32,93	44,23	0,48	0,64	*	*	25/11/2009	10:45	91125

APÊNDICE E – Medições realizadas com 4 decaimentos radioativo do ^{222}Rn e um decaimento do ^{226}Ra . (continua)

Medições com 4 decaimento radioativo do ^{222}Rn e decaimento do ^{226}Ra									
Nº Amostra	Concentração Média (Bq/m³)	Erro (Bq/m³)	Concentração Média (Bq/L)	Erro (Bq/L)	Concentração Média (Corrigida)	Erro (Corrigido)	Data da Medição	Início da Medição	Arquivo
24	342,12	388,23	4,98	5,65	5,95	6,75	14/08/2009	15:02	90814
	398,94	299,03	5,8	4,35	*	*	17/08/2009	15:30	90817
	348,28	271,73	5,06	3,95	*	*	19/08/2009	16:23	90819
	588	365	8,55	5,31	*	*	24/08/2009	10:07	90824
	43,73	53,86	0,64	0,78	*	*	27/11/2009	10:10	91127
29	407,91	262,78	5,93	3,82	7,6	4,89	2/9/2009	17:45	090902c
	346	313	5,03	4,55	18,94	17,33	9/9/2009	17:52	90909
	76,42	140,72	1,11	2,05	6,85	12,61	14/9/2009	10:20	090914a
	84,64	100,31	1,23	1,46	18,64	22,1	17/9/2009	10:15	90917
	59,95	76,36	0,87	1,11	*	*	17/03/2010	18:18	100317
30	933	425	13,57	6,18	14,23	6,48	4/9/2009	15:45	090904a
	579	365	8,42	5,31	25,52	16,09	10/9/2009	12:20	090910b
	211,68	203,21	3,08	2,96	19,69	18,91	14/09/2009	15:05	090914b
	184,46	170,99	2,685	2,48	34,17	31,68	18/09/2009	10:30	090918a
	37,87	52,85	0,55	0,77	*	*	22/02/2010	17:50	100222b
31	1487	589	21,64	8,51	22,8	8,97	4/9/2009	16:55	090904b
	772	417	11,23	6,06	34,38	18,56	10/9/2009	13:48	090910c
	192,01	198,68	2,79	2,89	17,97	18,6	14/9/2009	16:15	090914c
	22,45	204,72	3,23	2,98	41,55	38,24	18/09/2009	11:45	090918b
	50,8	64,08	0,74	0,93	*	*	22/02/2010	16:30	100222a
32	1367	618	19,89	8,99	21,31	9,63	4/9/2009	19:57	090904a
	686	397	9,98	5,78	31,47	18,21	10/9/2009	18:10	090910d
	63,59	105,15	0,93	1,53	6	9,91	14/09/2009	17:35	090914d
	229	216,92	3,34	3,16	43,12	40,73	18/09/2009	12:50	090918c
	65,03	99,3	0,95	1,44	*	*	24/03/2010	12:58	100324a
33	302,03	248,63	4,39	3,62	5,16	4,25	18/09/2009	13:52	090918d
	631	399	9,18	5,81	21,77	13,77	22/09/2009	10:50	090922b
	415	314	6,04	4,53	20,69	15,5	22/09/2009	11:35	090924b
	202,14	225,23	2,94	3,28	25,29	28,18	29/09/2009	13:30	090929a
	31,73	41,85	0,46	0,61	*	*	21/02/2010	16:08	100224
34	1042	456	15,16	6,64	18,25	7,99	18/09/2009	15:04	090918e
	753	417	10,96	6,07	26,13	14,47	22/09/2009	09:36	090922a
	396,39	302,01	5,77	4,4	19,88	15,18	24/09/2009	10:25	090924a
	314,92	245,97	4,58	3,58	40,69	31,78	29/09/2009	15:45	090929b
	68,8	78,99	1	1,15	*	*	3/5/2010	17:30	100305
35	627	374	9,12	5,44	10,48	6,25	21/09/2009	13:20	90921

APÊNDICE F – Medições realizadas com 4 decaimentos radioativo do ^{222}Rn e um decaimento do ^{226}Ra . (conclusão)

	391,88	280,87	5,7	4,09	9,23	6,62	23/09/2009	10:50	90923
	405,06	284,17	5,84	4,14	13,64	9,57	25/09/2009	10:07	090925a
	291,19	242,91	4,29	3,54	16,91	14,1	28/09/2009	10:17	090928a
	76,25	101,08	1,11	1,47	*	*	24/03/2010	17:59	100324b
36	466	344	6,78	5,01	8,36	6,17	25/09/2009	18:05	090925b
	417,88	291,25	6,08	4,24	12,52	8,72	28/09/2009	13:58	090928b
	140,55	148,99	2,04	2,17	5,96	6,32	30/09/2009	12:13	090930b
	373	255	5,42	3,71	22,36	16,29	2/10/2009	09:54	091002a
	61,15	83,3	0,89	1,21	*	*	25/03/2010	10:08	100325
37	171	160,05	2,49	2,33	3,08	2,88	30/09/2009	14:32	090930c
	293,39	274,35	4,27	3,99	7,74	7,23	2/10/2009	17:18	091002e
	446	333	4,5	4,84	22,73	16,97	6/10/2009	08:52	091006a
	305,47	276,1	4,45	4,02	26,82	24,24	9/10/2009	08:54	091009a
	76,04	88,09	1,11	1,28	*	*	26/03/2010	11:05	100326a
40	348	292	5,06	4,25	9,2	7,72	2/10/2009	16:03	091002d
	448	317,35	6,52	4,62	24,74	17,53	6/10/2009	17:55	091006e
	324,09	275,45	4,72	4,01	31,07	26,41	9/10/2009	18:59	091009e
	150,39	184,57	2,19	2,69	27,71	34,01	13/10/2009	09:32	091013a
	131,12	166,53	1,91	2,42	*	*	4/1/2010	09:19	100401a
42	402	279	5,85	4,06	8,35	5,79	5/10/2009	13:50	091005a
	493	330	7,17	4,8	15,92	10,66	7/10/2009	09:00	091007a
	407,37	298,05	5,93	4,34	18,26	13,36	9/10/2009	20:02	091009f
	256,31	229,85	3,73	3,35	22,08	19,8	13/10/2009	10:34	091013b
	56,33	73,68	0,82	1,073	*	*	4/8/2010	10:05	100408
46	123,32	147,1	1,79	2,14	3,66	4,37	26/10/2009	15:22	091026a
	149,55	191,61	2,18	2,79	7,38	9,45	29/10/2009	10:35	91029
	41,14	79,7	0,6	1,16	5,3	10,28	3/11/2009	17:50	91103
	43,53	61,4	0,63	0,89	8,98	12,66	6/11/2009	08:07	091106a
	159,73	157,54	2,32	2,29	*	*	30/04/2010	08:35	100430a
47	776	370	11,29	5,38	23,48	11,19	26/10/2009	17:52	091026b
	573	330	8,34	4,8	28,52	16,52	29/10/2009	11:48	091029b
	197,29	179,48	2,87	2,61	25,65	23,34	3/11/2009	19:00	91103
	135,73	133,04	1,98	1,94	28,24	28,68	6/11/2009	09:18	091106b
	126,42	146,2	1,84	2,13	*	*	30/4/2010	09:50	100430b

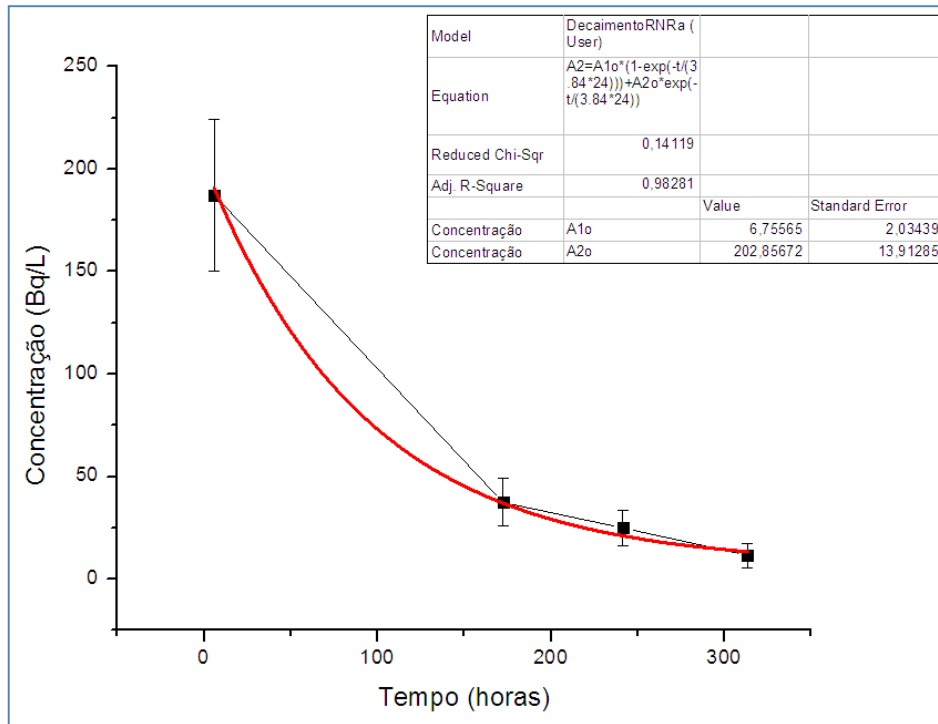
APÊNDICE G – Medições realizadas com 3 decaimentos radioativo do ^{222}Rn e um decaimento do ^{226}Ra .

Medições com 3 decaimentos radioativo do ^{222}Rn e decaimento do ^{226}Ra									
Nº Amostra	Concen- tração Média (Bq/m ³)	Erro (Bq/m ³)	Concen- tração Média (Bq/L)	Erro (Bq/L)	Concen- tração Média (Corrigida)	Erro (Corrigido)	Data da Medição	Início da Medição	Arquivo
38	527	333	7,67	4,84	13,22	8,35	2/10/2009	11:07	091002b
	395,17	313,71	575	4,57	20,35	16,15	6/10/2009	10:19	091006b
	372	293	5,41	4,26	32,93	25,93	9/10/2009	10:05	091009b
	96,74	113,97	1,41	1,66	*	*	26/03/2010	18:01	100326b
39	702	391	10,21	5,69	17,88	9,96	2/10/2009	12:58	091002c
	408,5	312,55	5,9	4,5	21,2	16,2	6/10/2009	11:28	091006c
	400,93	304,31	5,83	4,43	35,73	27,12	9/10/2009	11:13	091009c
	231,21	218,78	3,36	3,18	*	*	30/03/2010	10:27	100330
41	410	300,8	5,96	4,37	10,95	8,03	2/10/2009	19:24	091002f
	440,38	319,92	6,4	4,66	23	16,71	6/10/2009	12:35	091006d
	261,2	261,88	3,8	3,81	24,47	24,53	9/10/2009	17:57	091009d
	116,98	148,14	1,97	2,49	*	*	5/4/2010	09:54	100405b

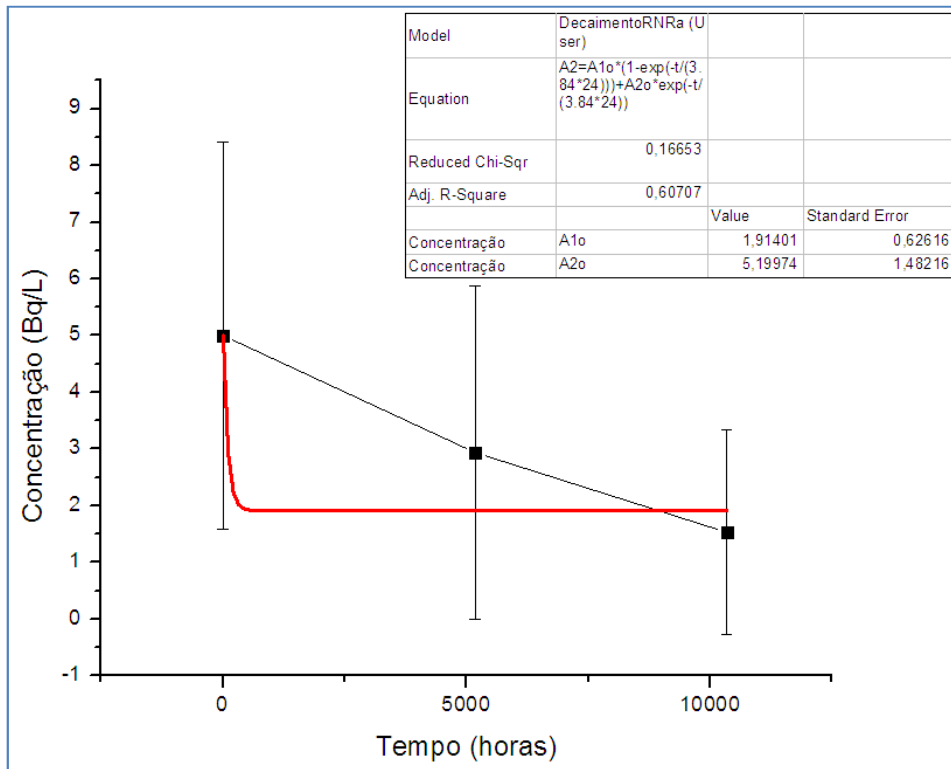
APÊNDICE H – Medições realizadas com 4 decaimentos radioativo do ^{222}Rn

Medições com 4 decaimentos radioativos do ^{222}Rn									
Nº Amostra	Concentração Média (Bq/m ³)	Erro (Bq/m ³)	Concentração Média (Bq/L)	Erro (Bq/L)	Concentração Média (Corrigida)	Erro (Corrigido)	Data da Medição	Início da Medição	Arquivo
4	1834	664	26,7	9,66	27,73	10,04	5/9/2008	17:38	080905b
	436,5	347,08	6,35	5,05	*	*	15/09/2008	13:25	080915a
	228,09	265,77	3,32	3,87	*	*	18/9/2008	13:00	080918a
5	12869	2258	187,29	37,2	195,97	38,94	5/9/2008	18:52	080905c
	2599	799	37,32	11,63	*	*	12/9/2008	17:29	080912b
	1707,69	608,34	24,85	8,85	*	*	15/9/2008	14:30	080915b
	794	409,68	11,56	5,96	*	*	18/09/2008	14:15	080918b
48	403	277,14	5,87	4,03	6,95	4,78	29/03/2010	13:25	100329
	315,69	242,21	4,59	3,52	9,17	7,04	1/4/2010	10:37	100401b
	179,67	172,2	2,61	2,51	10,6	10,16	5/4/2010	08:26	100405 ^a
	92,52	104,19	1,35	1,52	11,42	12,85	9/4/2010	10:06	100409 ^a

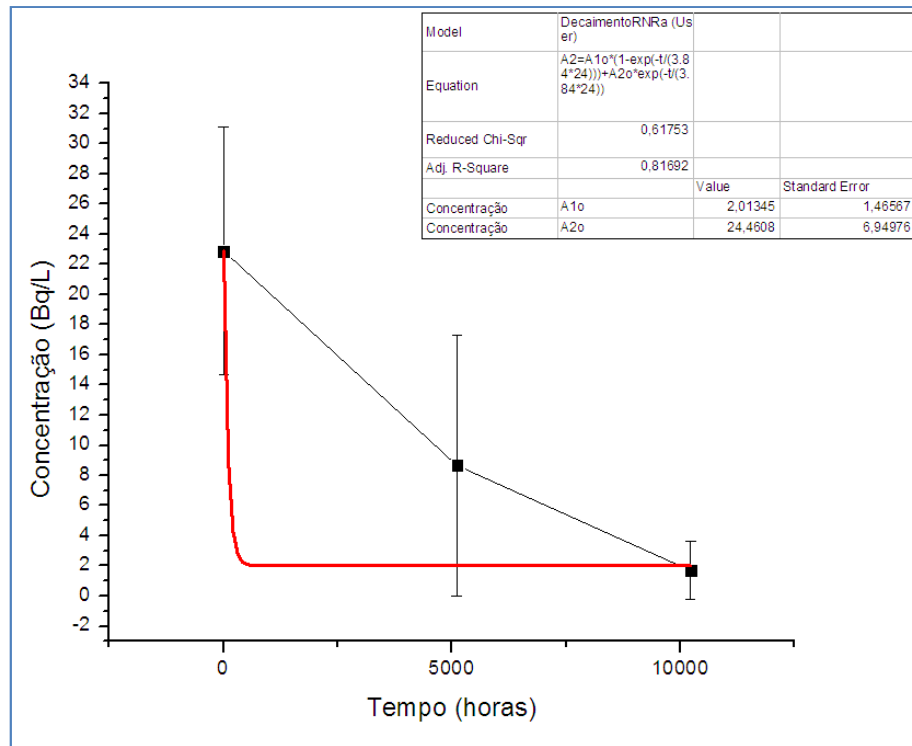
APÊNDICE I – Medição 5



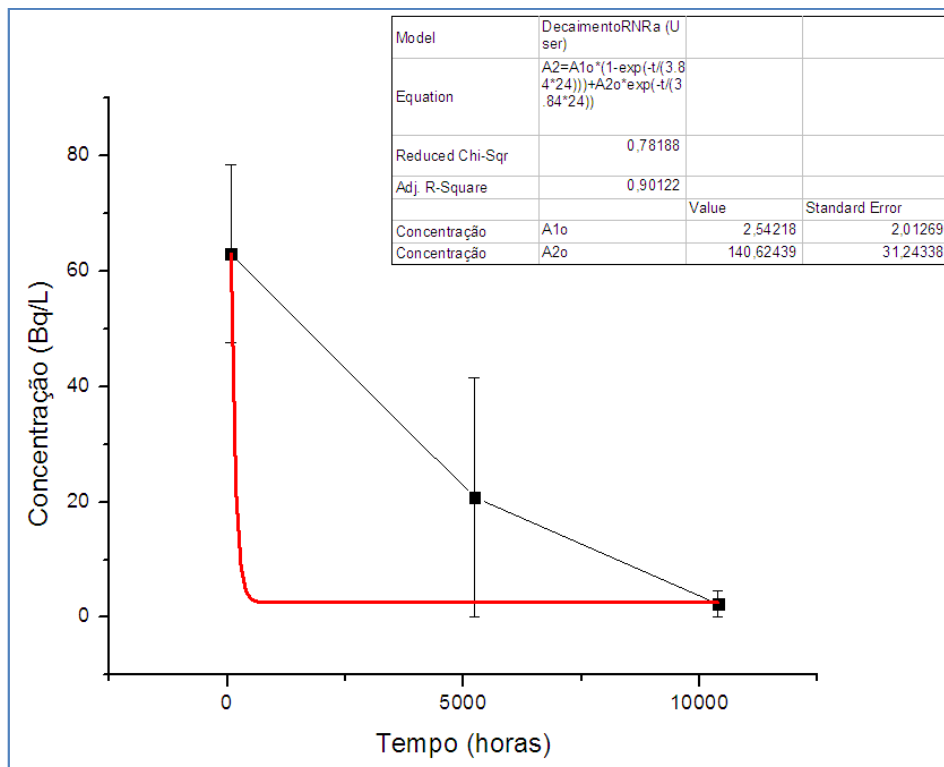
APÊNDICE J – Medição 13



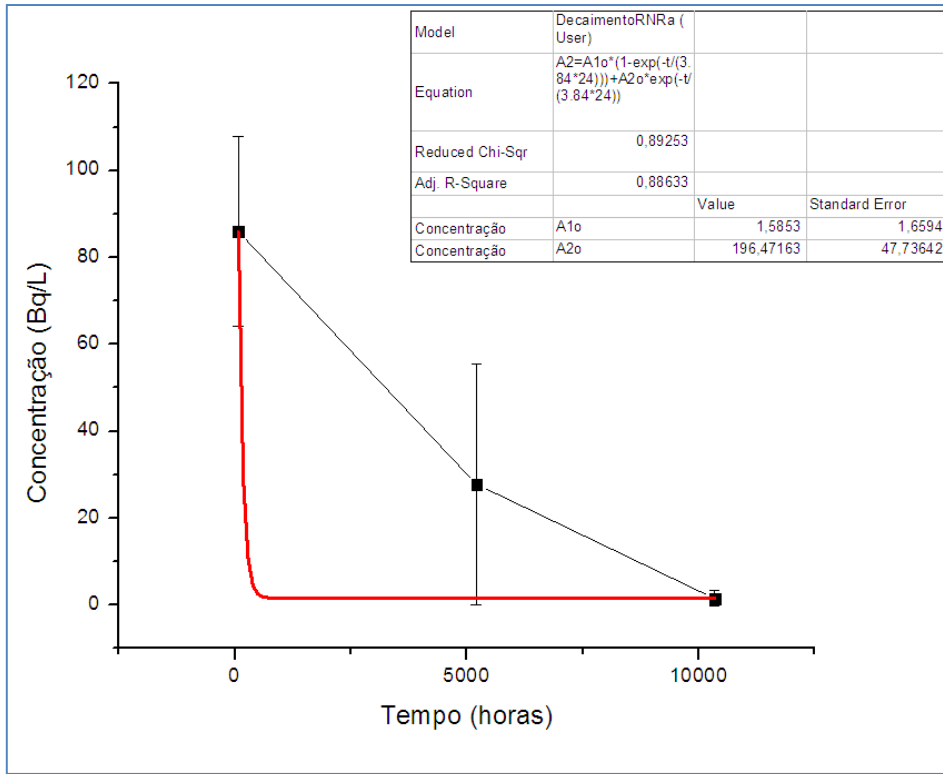
APÊNDICE K – Medição 14



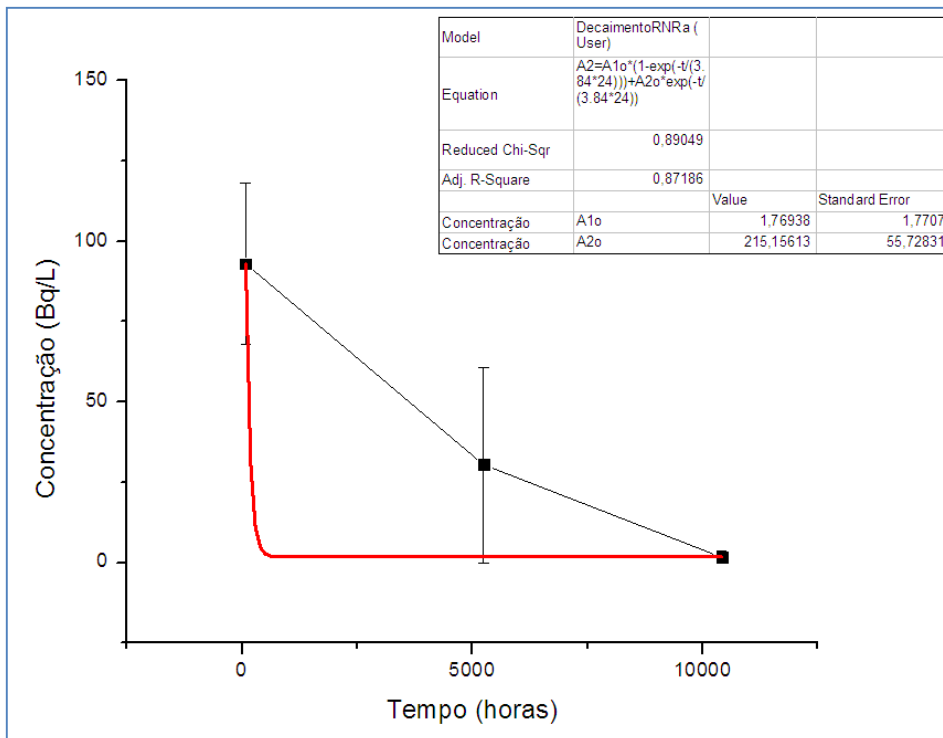
APÊNDICE L – Medição 15



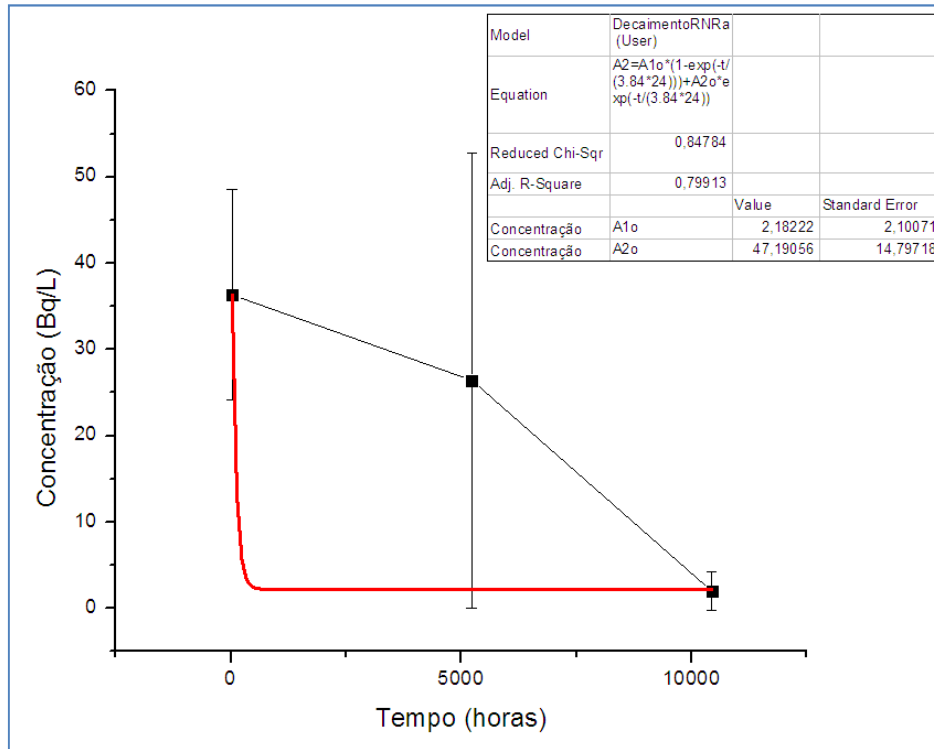
APÊNDICE M – Medição 16



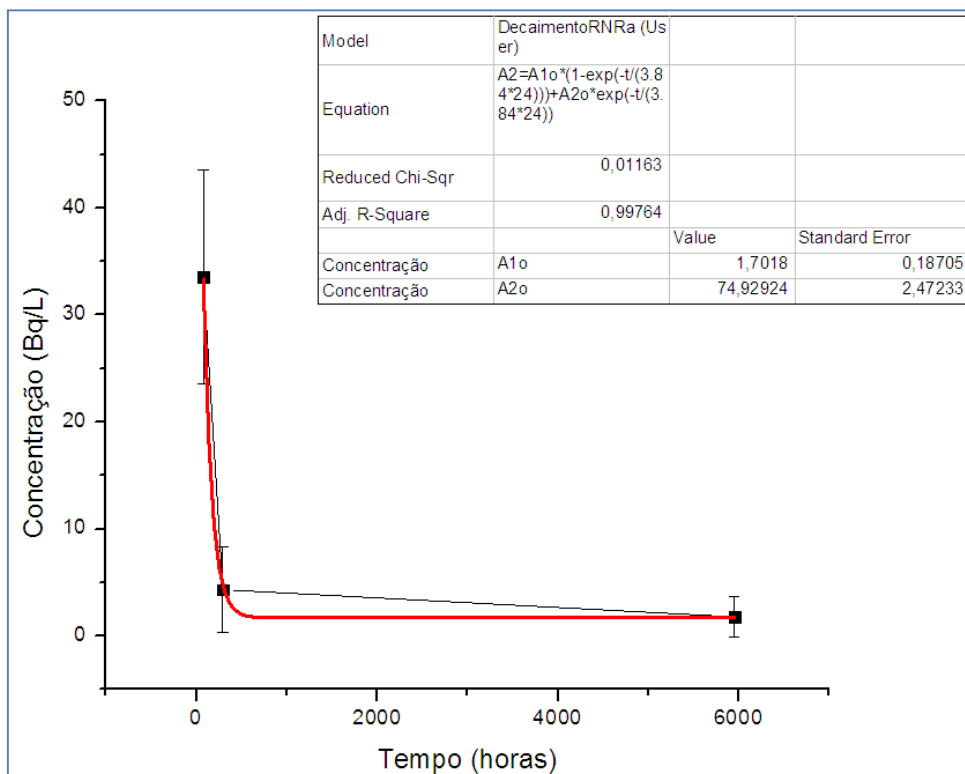
APÊNDICE N – Medição 17



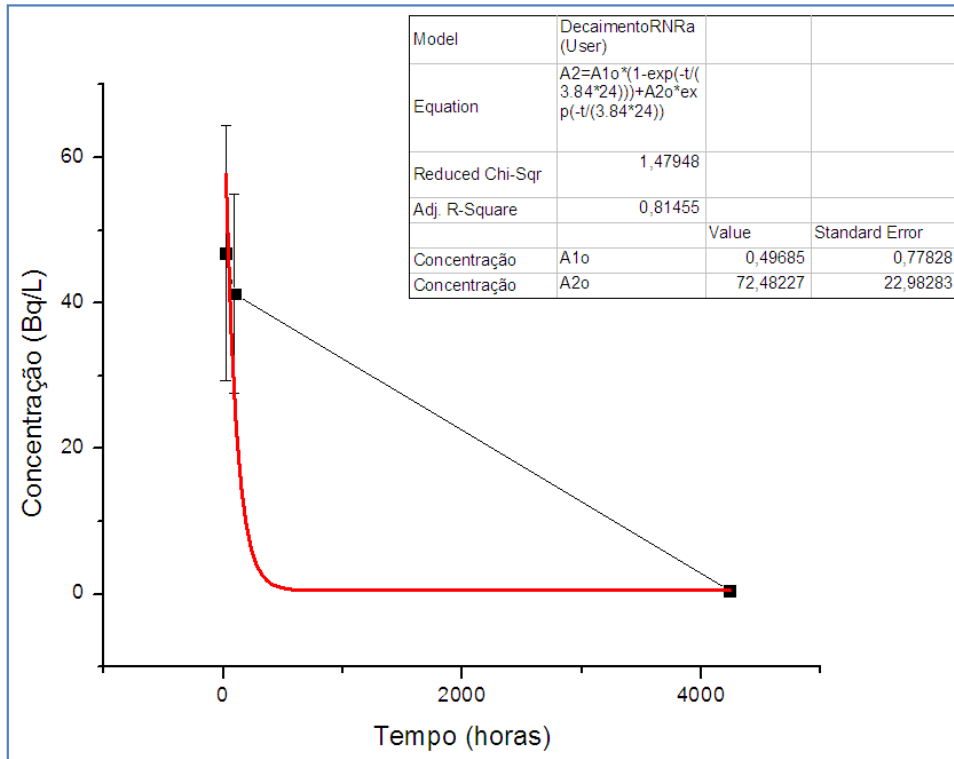
APÊNDICE O – Medição 18



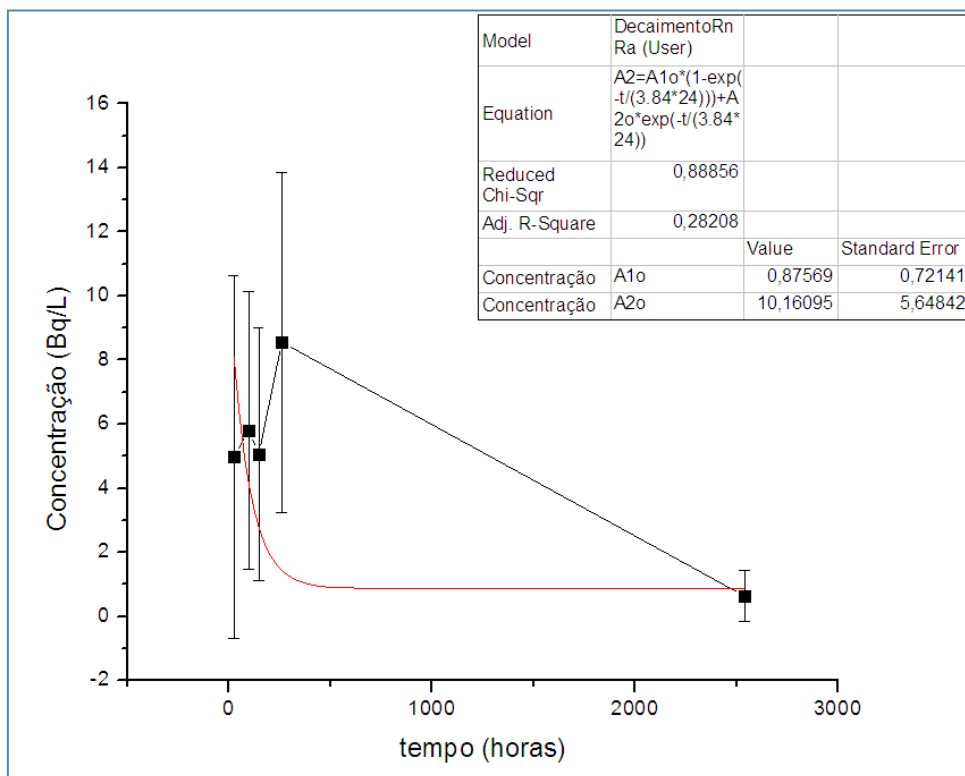
APÊNDICE P – Medição 22



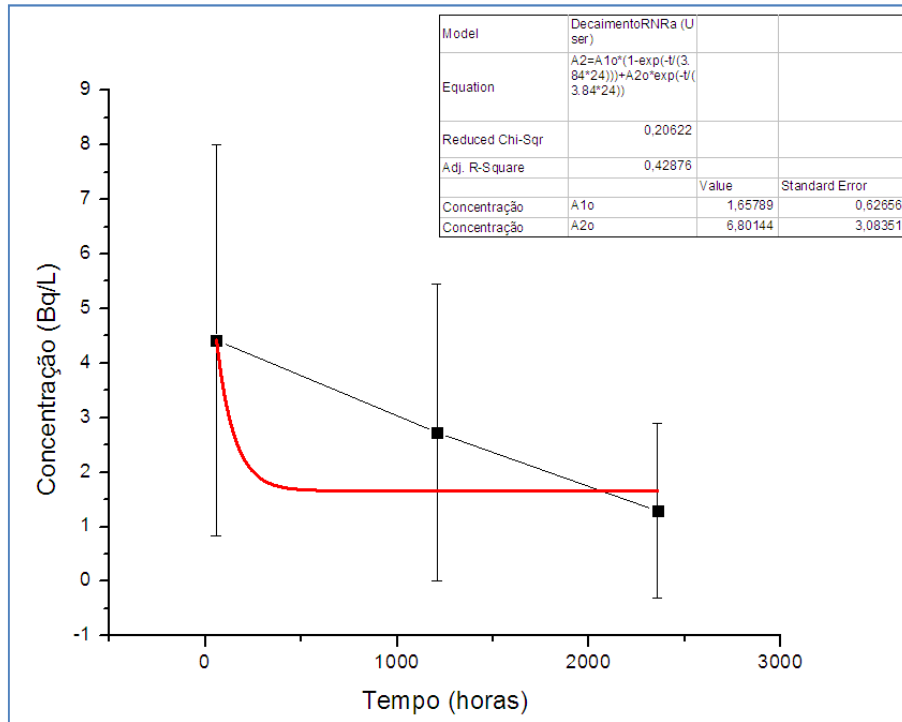
APÊNDICE Q – Medição 23



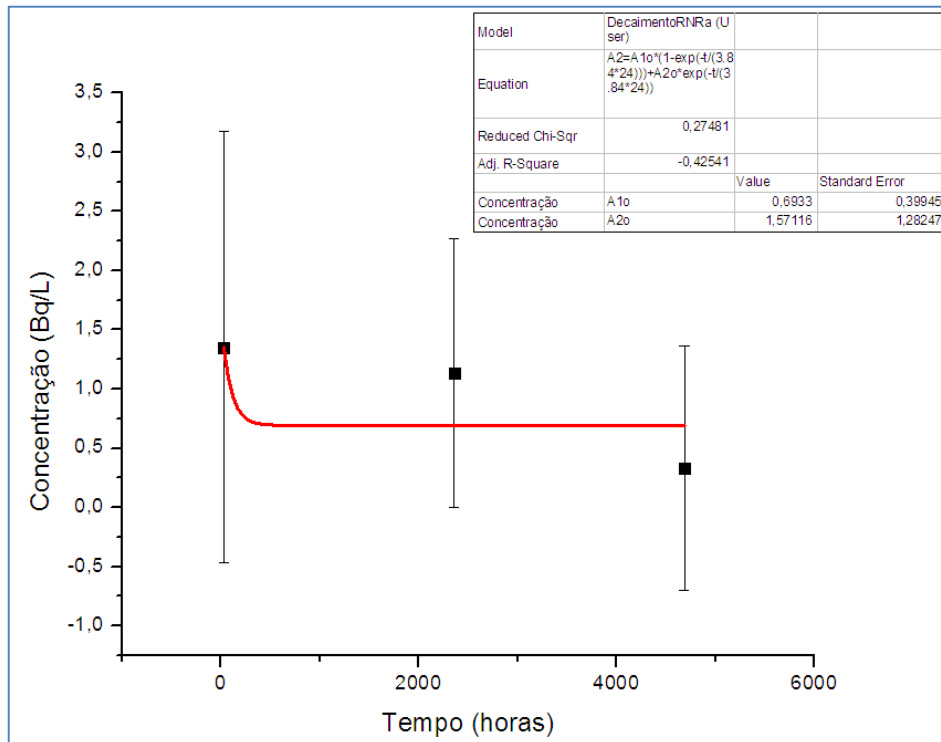
APÊNDICE R – Medição 24



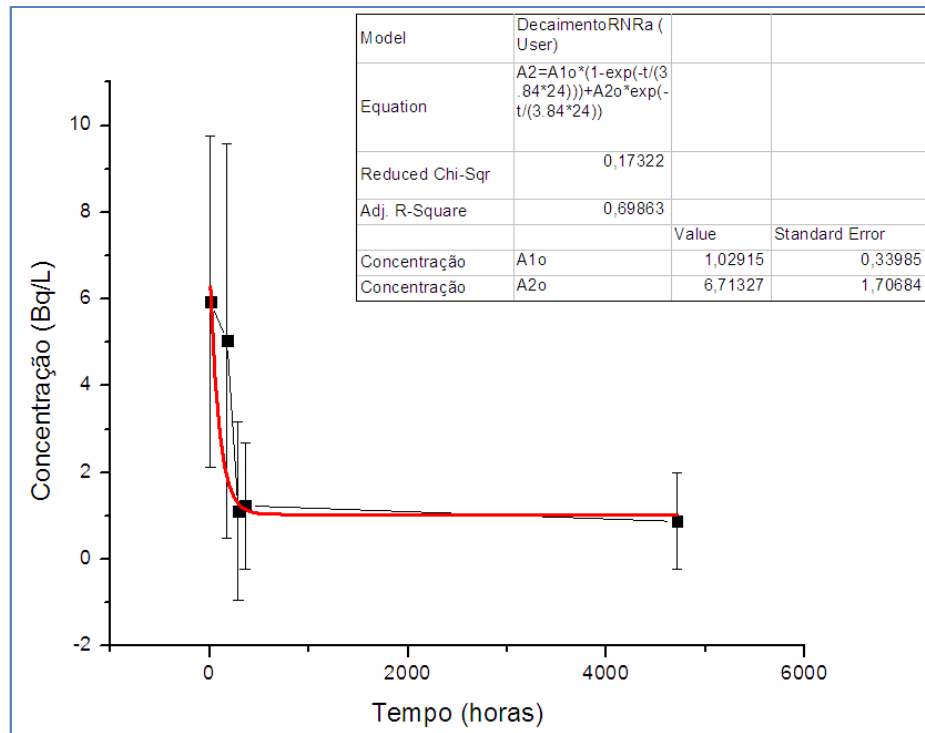
APÊNDICE S – Medição 25



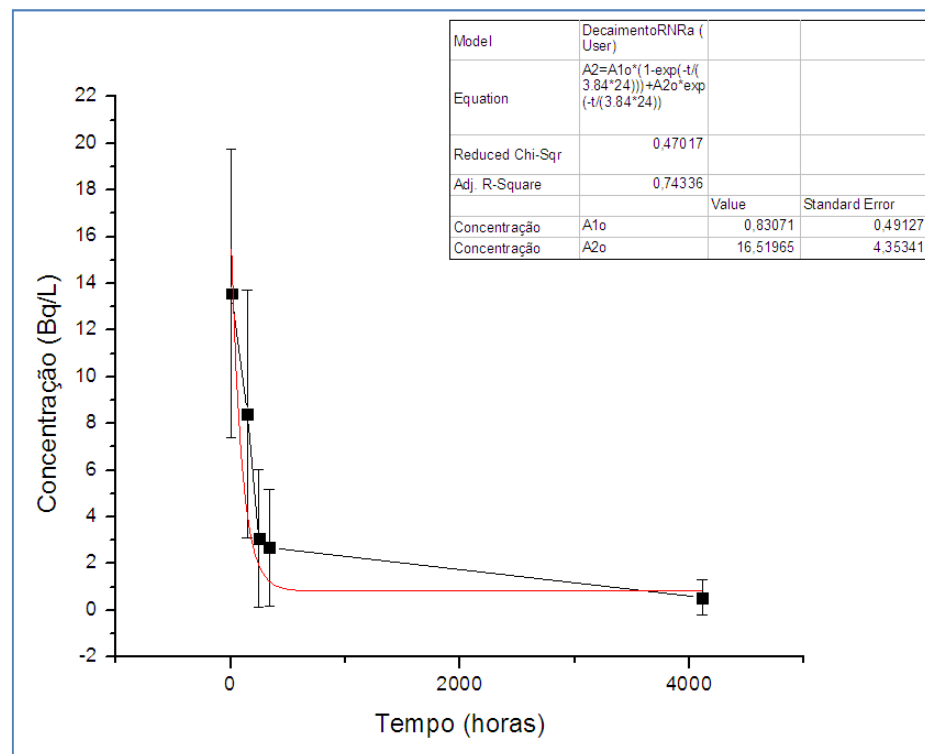
APÊNDICE T – Medição 28



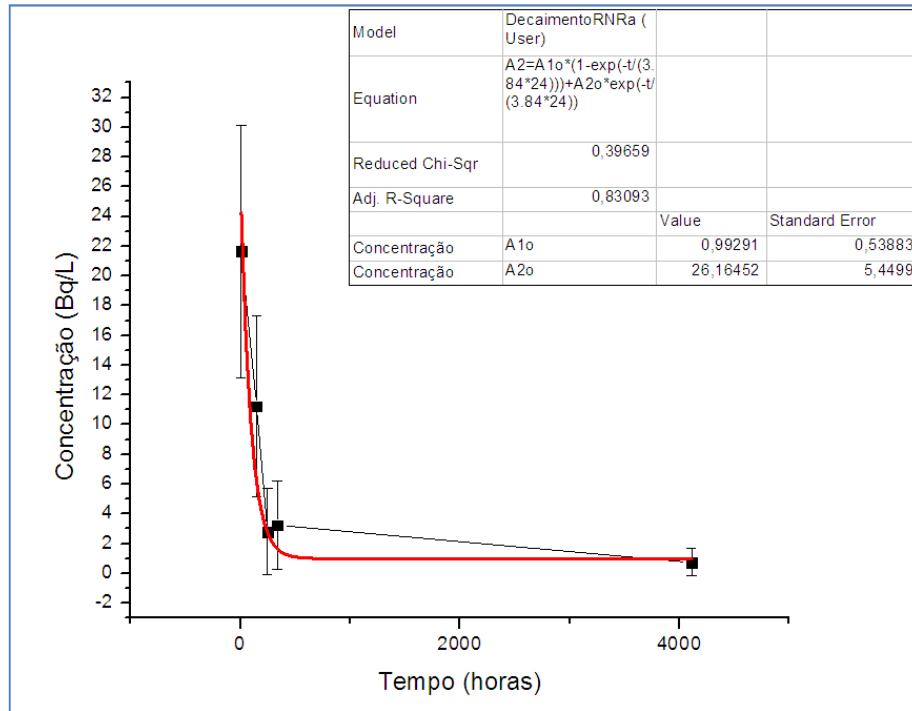
APÊNDICE U – Medição 29



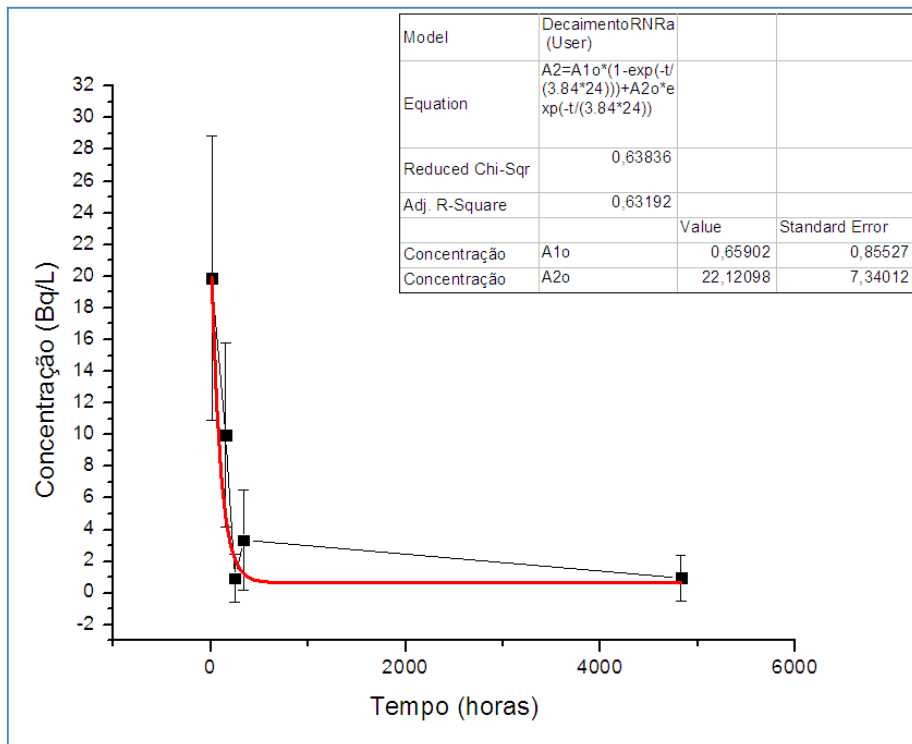
APÊNDICE V – Medição30



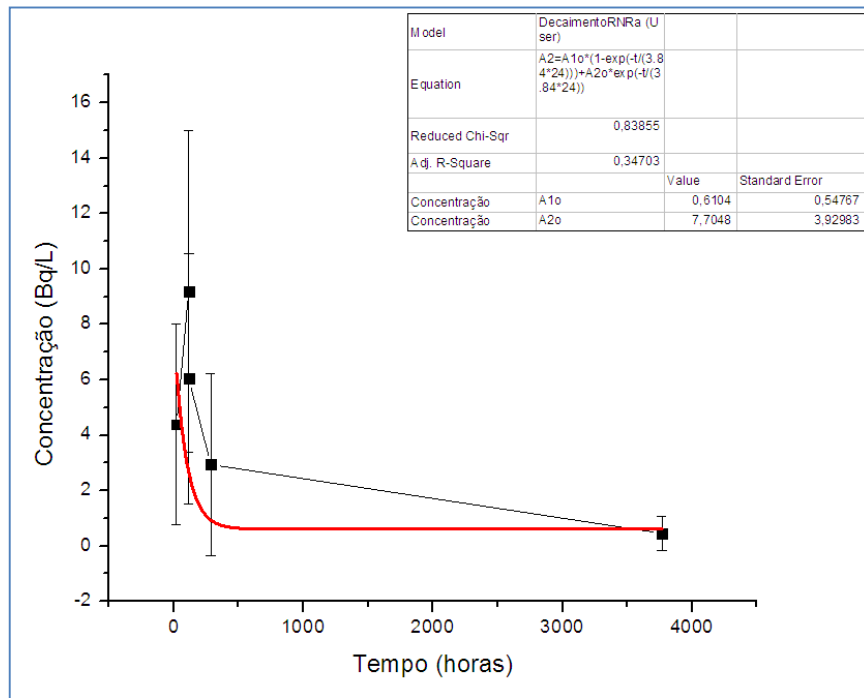
APÊNDICE W – Medição 31



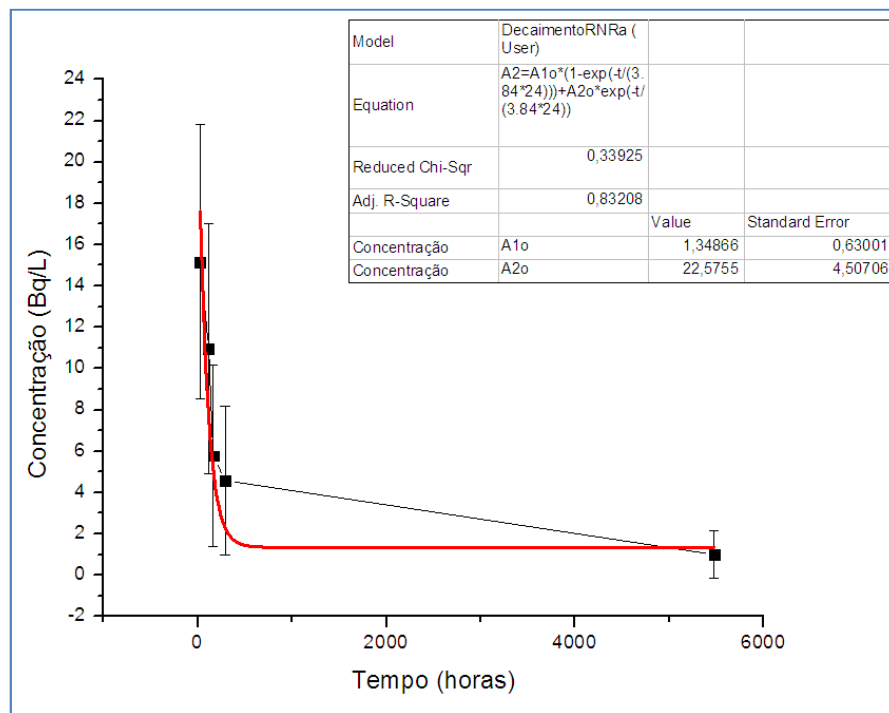
APÊNDICE X – Medição 32



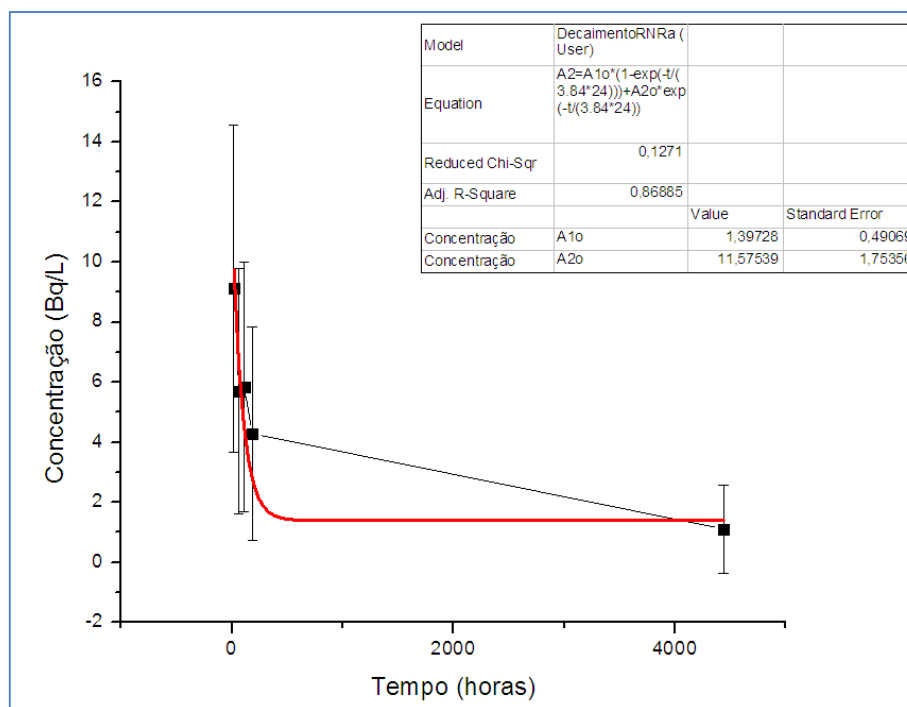
APÊNDICE Y – Medição 33



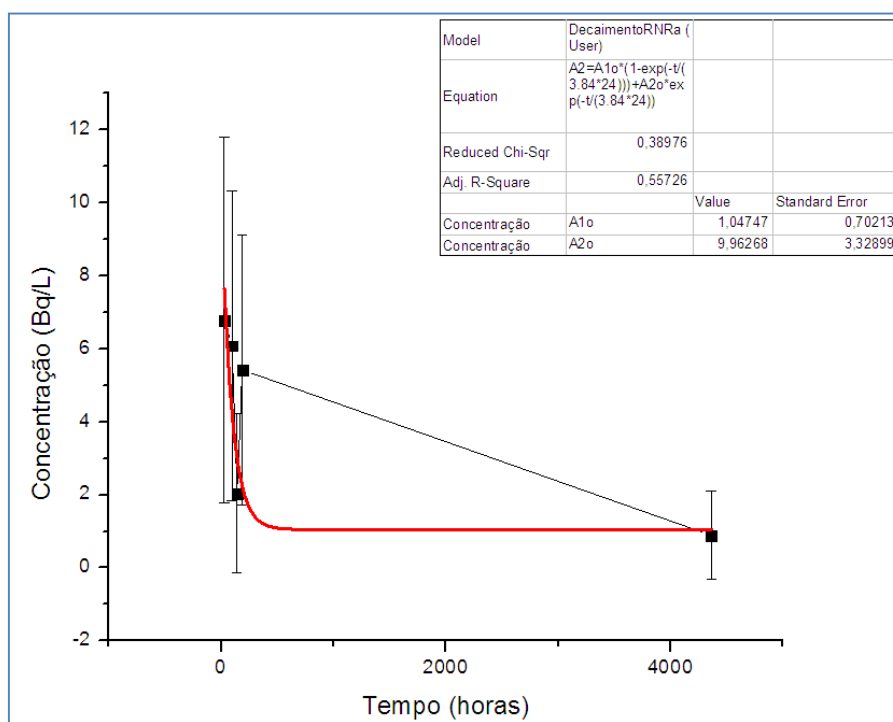
APÊNDICE Z – Medição 34



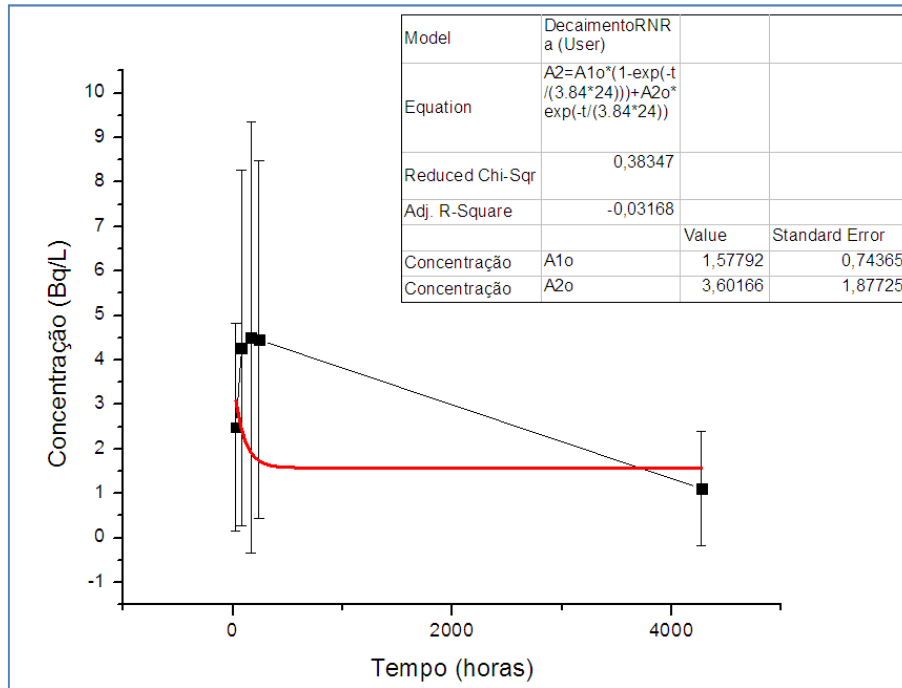
APÊNDICE AA – Medição 35



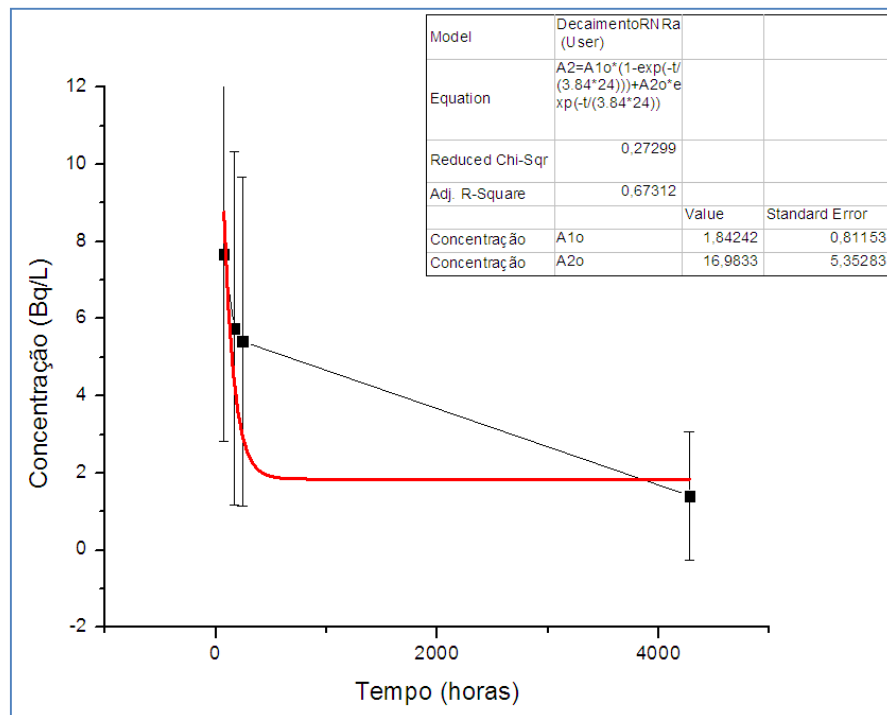
APÊNDICE AB – Medição 36



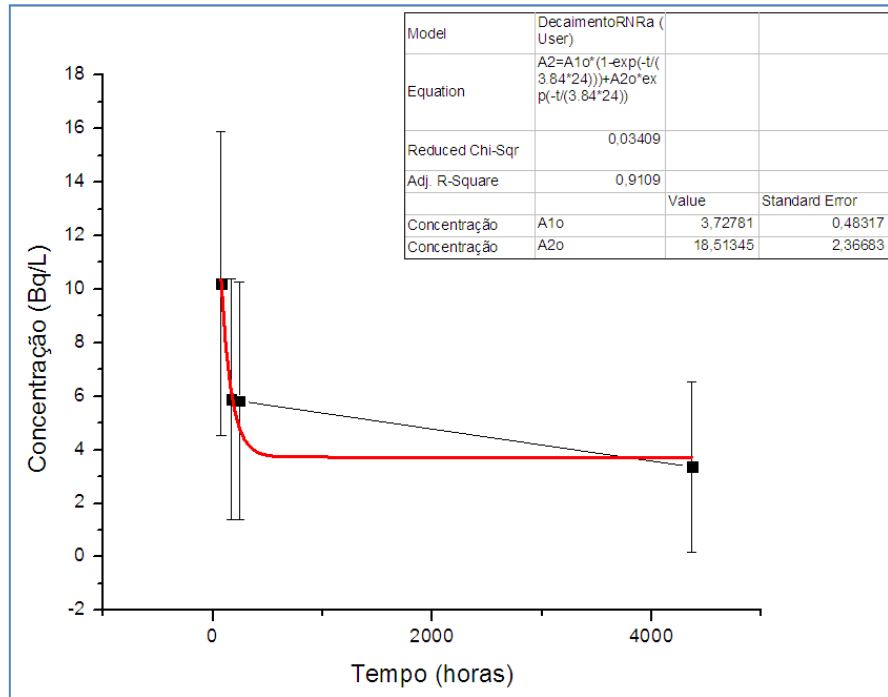
APÊNDICE AC – Medição 37



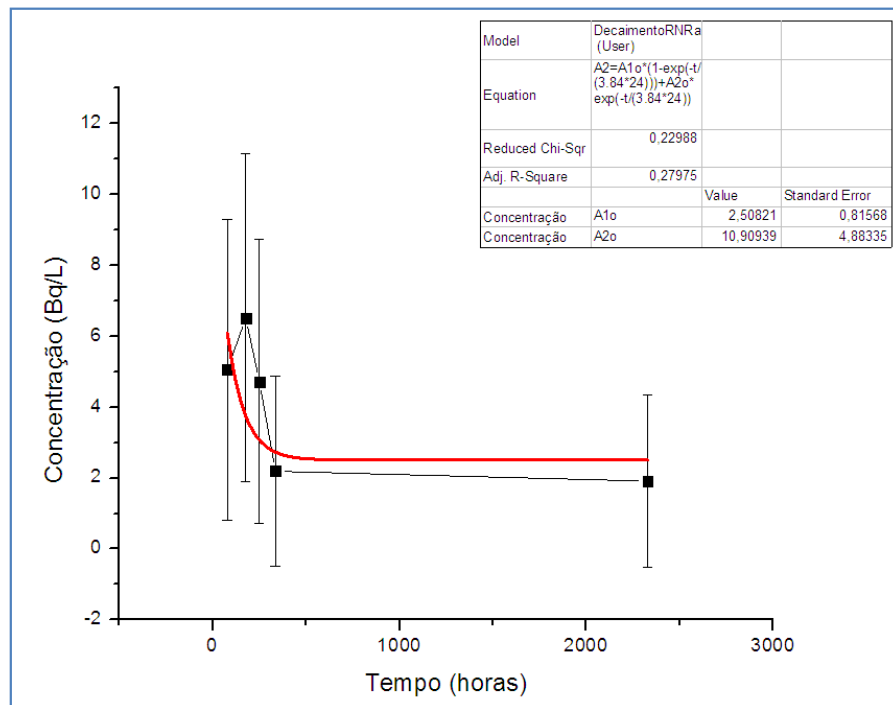
APÊNDICE AD – Medição 38



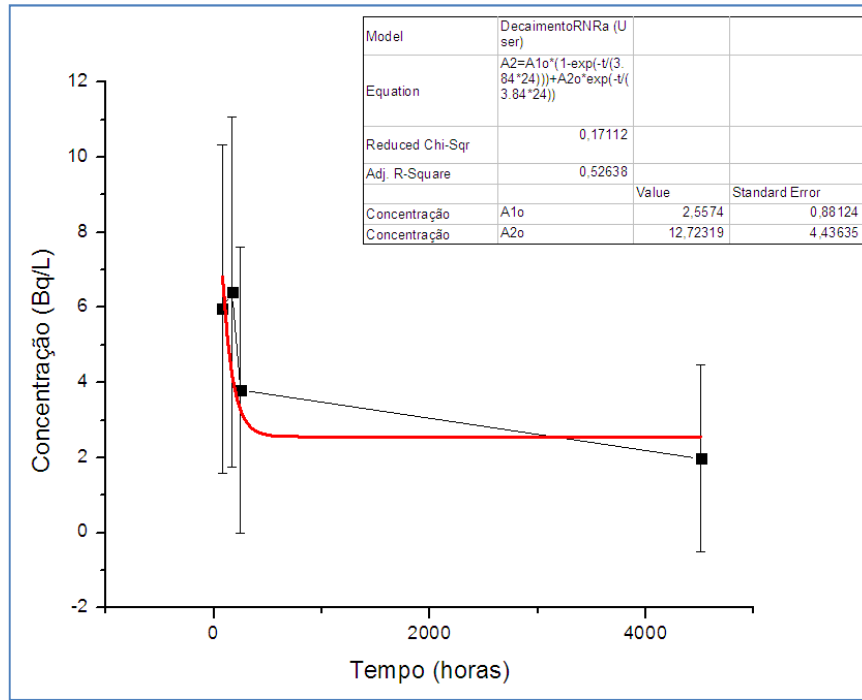
APÊNDICE AE – Medição 39



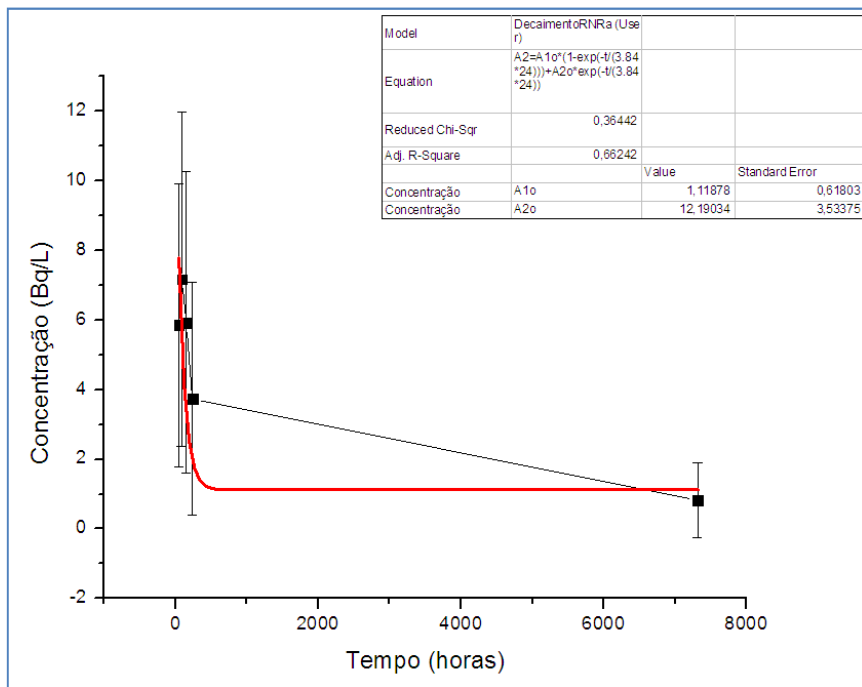
APÊNDICE AF – Medição 40



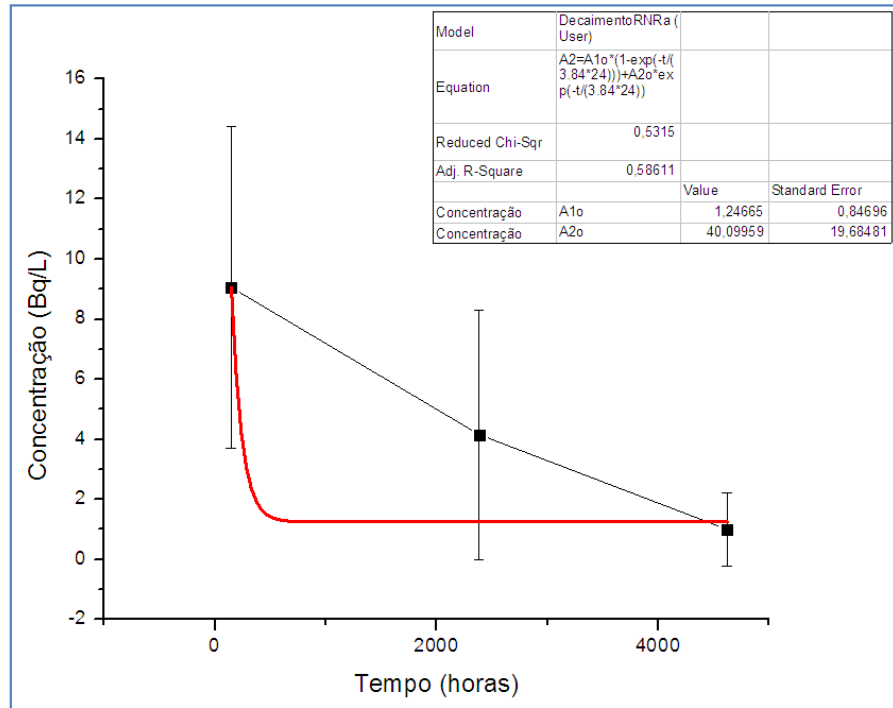
APÊNDICE AG – Medição 41



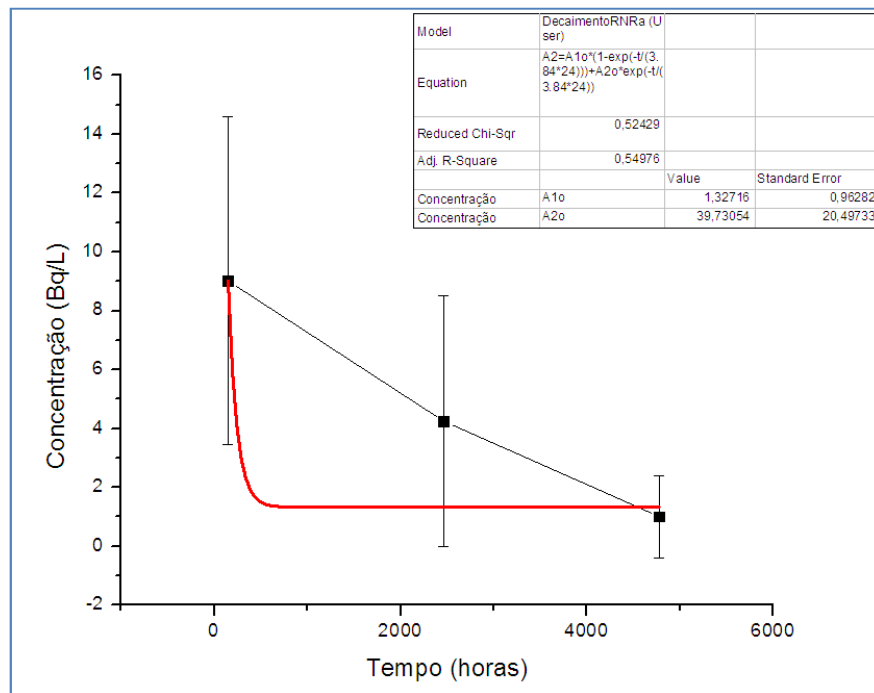
APÊNDICE AH – Medição 42



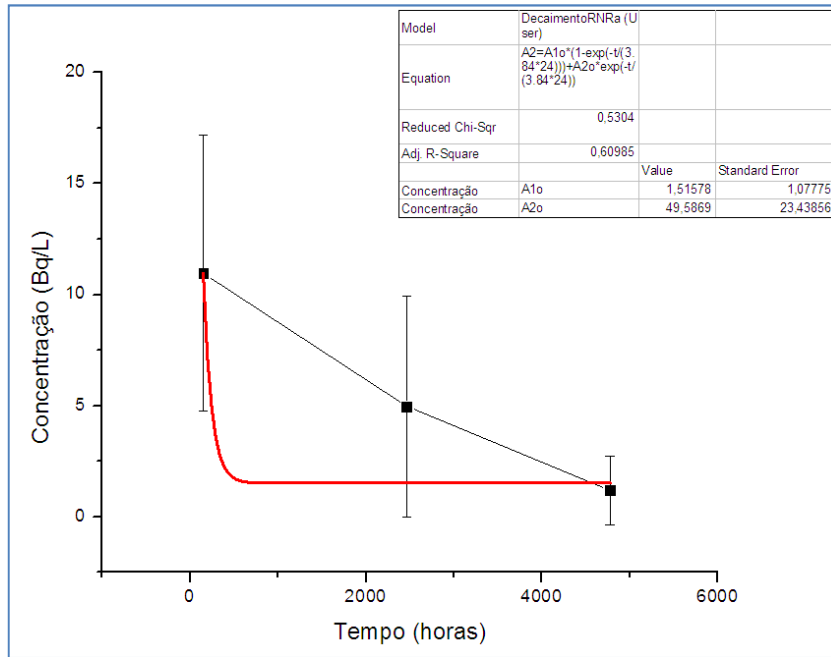
APÊNDICE AI – Medição 43



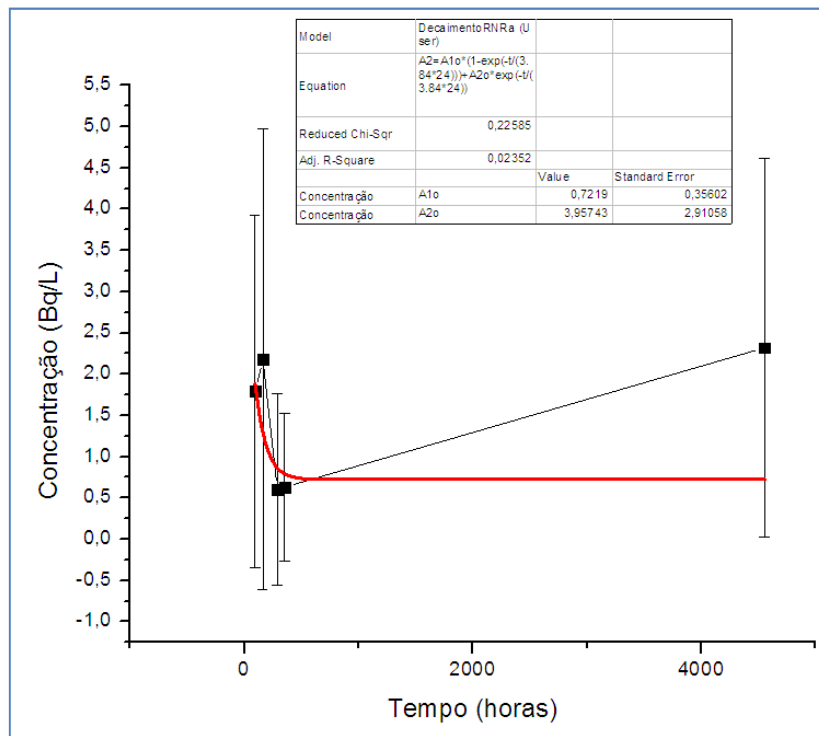
APÊNDICE AJ – Medição 44



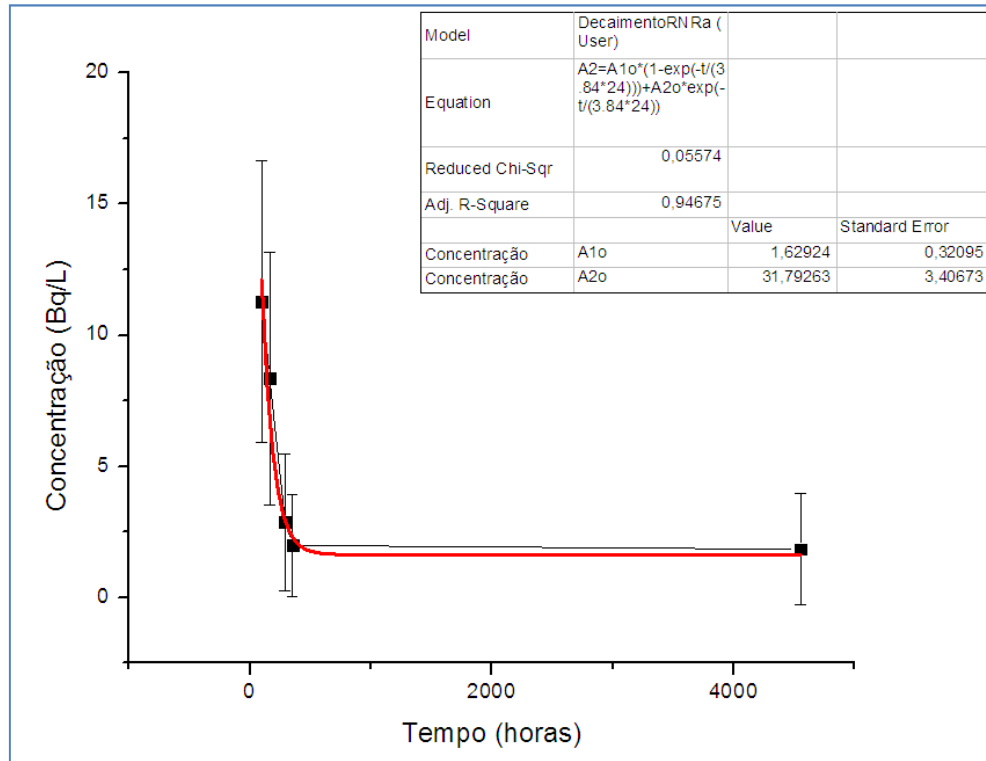
APÊNDICE AK – Medição 45



APÊNDICE AL – Medição 46



APÊNDICE AM – Medição 47



APÊNDICE AN – Folha de registro de dados

MEDIÇÕES DE RADÔNIO EQUIPAMENTO - ALPHAGUARD

MEDIÇÃO Nº	CORRIDA Nº	DATA AQUISIÇÃO	HORA AQUISIÇÃO	DATA MEDIÇÃO
ORIGEM DA AMOSTRA				
ENDEREÇO				
CONTATO	TELEFONE			
	MEDIÇÃO APARELHO	MEDIÇÃO SOFTWARE		MEDIÇÃO SOFTWARE + ERRO
INÍCIO				
TÉRMINIO				
TEMPERATURA (°C)				
PRESSÃO (mbar)				
UMIDADE (%)				
CONC. DE RADÔNIO (Bq/m3)				
CONC. Rn ÁGUA (Bq/l)				
CONC. Rn ÁGUA CORRIGIDA				
		MÍN.	MÉDIA	MÁX.
		MÍN.	MÉDIA	MÁX.

OBSERVAÇÕES: _____

MEDIÇÃO Nº	CORRIDA Nº	DATA AQUISIÇÃO	HORA AQUISIÇÃO	DATA MEDIÇÃO
ORIGEM DA AMOSTRA				
ENDEREÇO				
CONTATO	TELEFONE			
	MEDIÇÃO APARELHO	MEDIÇÃO SOFTWARE		MEDIÇÃO SOFTWARE + ERRO
INÍCIO				
TÉRMINIO				
TEMPERATURA (°C)				
PRESSÃO (mbar)				
UMIDADE (%)				
CONC. DE RADÔNIO (Bq/m3)				
CONC. Rn ÁGUA (Bq/l)				
CONC. Rn ÁGUA CORRIGIDA				
		MÍN.	MÉDIA	MÁX.
		MÍN.	MÉDIA	MÁX.

OBSERVAÇÕES: _____

MEDIÇÃO Nº	CORRIDA Nº	DATA AQUISIÇÃO	HORA AQUISIÇÃO	DATA MEDIÇÃO
ORIGEM DA AMOSTRA				
ENDEREÇO				
CONTATO	TELEFONE			
	MEDIÇÃO APARELHO	MEDIÇÃO SOFTWARE		MEDIÇÃO SOFTWARE + ERRO
INÍCIO				
TÉRMINIO				
TEMPERATURA (°C)				
PRESSÃO (mbar)				
UMIDADE (%)				
CONC. DE RADÔNIO (Bq/m3)				
CONC. Rn ÁGUA (Bq/l)				
CONC. Rn ÁGUA CORRIGIDA				
		MÍN.	MÉDIA	MÁX.
		MÍN.	MÉDIA	MÁX.

OBSERVAÇÕES: _____

ANEXO A - Aquíferos do Paraná

