



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DAS ATIVIDADES DE ^{228}Ra , ^{228}Th
E ^{40}K EM LEITE EM PÓ PARA ESTIMATIVA DA DOSE EFETIVA
COMPROMETIDA

CAMILA RODRIGUES MELLO

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro

Agosto 2018

DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DAS ATIVIDADES DE ^{228}Ra , ^{228}Th E ^{40}K EM LEITE EM PÓ PARA ESTIMATIVA DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA

CAMILA RODRIGUES MELLO

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NUCLEAR.

Examinado por:

Prof. Ademir Xavier da Silva, D. Sc.

Prof^a. Inayá Corrêa Barbosa Lima, D. Sc.

Prof. Edmilson Monteiro de Souza, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2018

Mello, Camila Rodrigues

Determinação das concentrações das atividades de ^{228}Ra , ^{228}Th e ^{40}K em leite em pó para estimativa da dose efetiva comprometida / Camila Rodrigues Mello. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XI, 50 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Projeto de Graduação – UFRJ/ COPPE/ Escola Politécnica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 44-50.

1. Leite em pó. 2. Atividade específica. 3. Risco de câncer. 4. Dose efetiva comprometida. I. Silva, Ademir Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica. III. Título.

"Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser conhecida."

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, em especial minha mãe pela educação, pelo suporte emocional e por uma robustez inabalável, me dando motivação todos os dias.

Gostaria de agradecer às minhas irmãs pelo companheirismo e pela união, além dos bons momentos.

Gostaria de agradecer ao meu noivo, Emerson Gomes Seixas, pelo carinho, amor e suporte.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, com quem passei excelentes momentos, e que contribuíram para tornar a vida acadêmica mais divertida.

Gostaria de agradecer ao professor Ademir Xavier da Silva pela oportunidade e pelo conhecimento transmitido.

Gostaria de agradecer a toda equipe do Laboratório de Análises Ambientais e Simulação Computacional, em especial ao José Marques Lopes por todo o empenho em repassar seu vasto conhecimento.

Gostaria de agradecer também a todos os professores e funcionários do programa de Engenharia Nuclear que foram fundamentais nessa trajetória.

Resumo do projeto de graduação apresentado à ESCOLA POLITÉCNICA/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DAS ATIVIDADES DE ^{228}Ra , ^{228}Th E ^{40}K EM LEITE EM PÓ PARA ESTIMATIVA DA DOSE EFETIVA COMPROMETIDA.

Camila Rodrigues Mello

Agosto/2018

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Curso: Engenharia Nuclear

A determinação da concentração de radionuclídeos em leite em pó deve ser realizada para a geração de um banco de dados. O presente trabalho apresenta valores de concentrações das atividades dos radionuclídeos ^{40}K , ^{228}Ra e ^{228}Th em amostras de leite em pó consumidas no município do Rio de Janeiro determinadas por meio de espectrometria gama de alta resolução. As concentrações de atividade do ^{40}K variaram de $384,39 \pm 19,84$ a $357,22 \pm 18,47 \text{ Bq.kg}^{-1}$, do ^{228}Th variaram de $0,89 \pm 0,7$ a $1,59 \pm 0,63 \text{ Bq.kg}^{-1}$ e do ^{228}Ra variaram de $0,6 \pm 0,39$ a $2,87 \pm 1,44 \text{ Bq.kg}^{-1}$. A partir dos valores das concentrações das atividades foram obtidas as doses efetivas comprometidas para crianças e adultos. Verificou-se que as doses foram maiores para crianças de um ano de idade, sendo a dose, devido a todos os radionuclídeos para esta idade, igual a $2,85 \mu\text{Sv.a}^{-1}$ e, para adultos, $0,40 \mu\text{Sv.Bq}^{-1}$.

Palavras-chave: concentração de atividade, leite em pó, dose efetiva comprometida

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

DETERMINATION OF ACTIVITY CONCENTRATION OF ^{228}Ra , ^{228}Th AND ^{40}K ,
IN MILK POWDER FOR ESTIMATION OF THE COMMITTED EFFECTIVE
DOSES

Camila Rodrigues Mello

August/2018

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Course: Nuclear Engineering

The determination of activity concentrations of radionuclides in milk powder should be performed for a generation of data bank. The present work presents values of activity concentrations of radionuclides ^{40}K , ^{228}Ra and ^{228}Th in samples of milk powder consumed in the city of Rio de Janeiro determined by means of high resolution gamma spectrometry. The activity concentrations of ^{40}K ranged from $384,39 \pm 19,84$ to $357,22 \pm 18,47 \text{ Bq.kg}^{-1}$, ^{228}Th ranged from $0,89 \pm 0,7$ to $1,59 \pm 0,63 \text{ Bq.kg}^{-1}$ and ^{228}Ra ranged from $0,6 \pm 0,39$ to $2,87 \pm 1,44 \text{ Bq.kg}^{-1}$. From the values of the activity concentrations, the effective doses were obtained for children and adults. The doses were found to be higher for children one year old, and the dose, due to all radionuclides for this age, was equal $2,85 \mu\text{Sv.a}^{-1}$ and, for adults, $0,40 \mu\text{Sv.Bq}^{-1}$.

Keywords: Activity concentration, milk powder, committed effective dose

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivo	2
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Radioatividade natural e artificial.....	3
2.2 Radionuclídeos nos alimentos	3
2.3 Leite em pó integral	5
2.4 Efeitos biológicos da radiação ionizante	7
2.4.1. Estágios:.....	7
2.4.2. Processos diretos e indiretos:.....	7
2.4.3. Reações teciduais e efeitos estocásticos:	7
2.5 Equilíbrio Secular	8
2.6 Atividade específica.....	9
2.7 Dose efetiva comprometida e meia vida efetiva.....	9
2.8 Detectores Semicondutores	10
2.9 Sistema operacional	10
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	12
3.1 Detector semiconductor de Germânio hiper puro - HPGE.....	12
3.2 Calibração em energia do sistema de aquisição	13
3.3 Eficiência de detecção	14
3.4 Validação do sistema de detecção	16
3.5 Preparação das amostras	16
3.6 Cálculo da Atividade específica	18
3.7 Atividade Mínima Detectável (AMD).....	19
3.8 Cálculo da Dose Efetiva Comprometida	19
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	21

4.1 Curvas de ajustes	21
4.2 Concentrações das atividades das amostras.....	24
4.3 Doses efetivas comprometidas	33
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

Lista de Figuras

<i>Figura 1: Ciclo de incorporação dos radionuclídeos (Fonte: Melquíades, 2004).</i>	4
<i>Figura 2: Leite em pó (Fonte: Vedera Brasil)</i>	5
<i>Figura 3: Espectrômetro utilizado: Em (a) dewar com capacidade de 30 litros. Em (b) a blindagem do detector de 10 cm de chumbo recoberta de 1 mm de estanho. Em (c) O multicanal DSA 1000. Em (d) o espectro de uma amostra na tela do computador.</i>	13
<i>Figura 4: Geometry Composer. (a) mostra o gabarito da geometria para modelagem. (b) mostra a matriz onde são inseridas as dimensões do béquer. (c) mostra o resultado visual das configurações da matriz (b).</i>	15
<i>Figura 5: Curva de eficiência típica obtida com o Genie 2000.</i>	16
<i>Figura 6: Amostras de leite em pó</i>	17
<i>Figura 7: Amostra A1 de leite em pó dentro do detector HPGe antes da contagem</i>	18
<i>Figura 8: Ajuste em energia para espectrometria gama.</i>	22
<i>Figura 9: Espectro e curva de eficiência gerados com o uso de fonte padrão produzida pelo LNMRI – IRD/CNEN.</i>	23
<i>Figura 10: Comparação das eficiências determinadas experimentalmente com o uso de fontes puntiformes calculadas pelo LabSOCS.</i>	23
<i>Figura 11: Comparação das eficiências para geometria volumétrica calculadas experimentalmente e calculadas pelo LabSOCS.</i>	24
<i>Figura 12: Concentração de atividade do ^{40}K nas amostras de leite em pó.</i>	26
<i>Figura 13: Concentração de atividade do ^{228}Ra nas amostras de leite em pó.</i>	27
<i>Figura 14: Concentração de atividade do ^{228}Th nas amostras de leite em pó.</i>	28
<i>Figura 15: Comparação entre as atividades específicas do ^{40}K no leite em pó em diversos estudos.</i>	30
<i>Figura 16: Atividades específicas de ^{228}Ra em outros estudos.</i>	32
<i>Figura 17: Dose devido ao ^{40}K em diferentes idades devido ao consumo de leite em pó ($\mu\text{Sv.ano}^{-1}$).</i>	34
<i>Figura 18: Dose devido ao ^{228}Th em diferentes idades devido ao consumo de leite em pó ($\mu\text{Sv.ano}^{-1}$).</i>	37
<i>Figura 19: Dose devido ao ^{228}Ra para diferentes idades devido ao consumo de leite em pó ($\mu\text{Sv.ano}^{-1}$).</i>	38

Lista de Tabelas:

<i>Tabela 1: Composição dos tipos de leite em pó: integral e desnatado (Belitz, Grosch, & Schieberle, 2009).</i>	6
<i>Tabela 2: Radionuclídeos e suas respectivas energias utilizados na calibração em energia do sistema de detecção.</i>	14
<i>Tabela 3: Dados referentes às amostras de leite em pó coletadas</i>	17
<i>Tabela 4: Coeficiente de dose efetiva para cálculo de dose efetiva comprometida (ICRP 119, 2000).</i>	20
<i>Tabela 5: Pontos experimentais utilizados para ajuste quadrático em energia.</i>	21
<i>Tabela 6: Concentração de atividade dos radionuclídeos em amostras de leite em pó.</i>	25
<i>Tabela 7: Atividades mínimas detectáveis de cada radionuclídeo nas amostras (Bq.kg⁻¹).</i>	25
<i>Tabela 8: Comparação entre as atividades de ⁴⁰K no leite em pó no presente estudo e a média em outros estudos.</i>	29
<i>Tabela 9: Comparação entre as concentrações de atividades de ²²⁸Th no leite em pó em outro estudo.</i>	31
<i>Tabela 10: Comparação entre as atividades de ²²⁸Ra no leite em pó em outros estudos.</i>	31
<i>Tabela 11: Estimativas de dose efetiva comprometida devido ao ⁴⁰K em amostras de leite em pó.</i>	33
<i>Tabela 12: Comparação entre as doses efetivas comprometidas encontradas no leite em pó devido ao ⁴⁰K em diferentes estudos (μSv.ano⁻¹).</i>	35
<i>Tabela 13: Valores de dose efetiva comprometida devido ao ²²⁸Th em amostras de leite em pó.</i>	36
<i>Tabela 14: Valores de dose efetiva comprometida devido ao ²²⁸Ra em amostras de leite.</i>	37
<i>Tabela 15: Comparação entre as doses efetivas comprometidas encontradas no leite em pó devido ao ²²⁸Ra em diferentes estudos.</i>	39
<i>Tabela 16: Valores de referência para dose efetiva comprometida (UNSCEAR, 2000).</i>	40
<i>Tabela 17: Doses efetivas comprometidas totais</i>	40

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

O ser humano é exposto à radiação ionizante natural ao longo de toda a vida. Os radionuclídeos estão presentes no solo, na água, nos alimentos e em outros materiais, e podem entrar no corpo humano principalmente através de ingestão e inalação (LICATA et al., 2004).

Desde que a ingestão de radionuclídeos naturais não exceda as recomendações, a dose interna devido ao seu consumo não é nociva (UNSCEAR, 2000). Há situações, contudo, em que as concentrações de radionuclídeos em água e alimentos sobrepujam os limites sugeridos e as recomendações. Um parâmetro de referência em casos de anormalidades pode ser obtido através da verificação dos níveis de concentração dos radionuclídeos (SCHEIBEL, 2006). Além disso, a medição de radionuclídeos que ocorrem naturalmente no meio ambiente pode ser usada como base para avaliar o impacto de atividades não nucleares (ASEFI, 2005). Nesse sentido, a geração de um banco de dados de concentração natural e antropogênica de radioisótopos em alimentos representa uma questão importante (LOPES, 2018).

Os alimentos que são mais frequentemente consumidos pelos seres humanos como cereais, café, carne, pães e leite (SOUZA et. al, 2013) necessitam de maior atenção. Pelo alto valor nutricional, por conterem vitaminas e minerais e serem fontes de proteínas de alto valor biológico, o leite e seus derivados devem ser destacados. É recomendado o consumo frequente desses alimentos com o propósito principal de que se atinja a adequação diária de ingestão de cálcio, um nutriente que, dentre outras funções, é fundamental para a formação e a manutenção da estrutura óssea do organismo (MUNIZ et al., 2013). A versão em pó do leite é difundida por ter maior facilidade de transporte, menor volume, e maiores tempo e facilidade de armazenamento. O leite em pó é um ingrediente importante para fazer biscoitos, sorvete, chocolate em pó e outros alimentos amplamente consumidos pelos seres humanos (BULDINI et al., 2002).

Além de sua importância na alimentação, o leite em pó também tem destaque economicamente. Apenas entre janeiro e setembro de 2017, o Brasil exportou 50 milhões de dólares em leite condensado e 14 milhões em leite em pó (USDA, 2017).

O leite em pó é um alimento de grande valor nutricional e importância econômica. Contudo, em sua composição há radionuclídeos de origem natural, e pode haver radionuclídeos de origem artificial, portanto é importante estudar as concentrações das atividades dos radionuclídeos nos alimentos para traçar um panorama do consumo de leite em pó a fim de entender sua contribuição para a ingestão de radionuclídeos à que o ser humano está submetido.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo estudar por espectrometria gama amostras de leite em pó consumidas na cidade do Rio de Janeiro e mensurar as atividades específicas dos radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th e ^{137}Cs e, com esses valores, estimar as doses efetivas comprometidas que tais atividades proporcionam. As etapas a serem cumpridas são listadas abaixo:

- 1) Realizar a calibração do detector HPGe e obter sua validação através de um estudo de sua eficiência.
- 2) Obter os espectros de emissão gama e calcular a concentração específica para os radionuclídeos de interesse utilizando espectrometria de alta resolução em um detector de germânio hiper-puro (HPGe).
- 3) Obter as estimativas de dose efetiva comprometida utilizando as concentrações de atividades encontradas, e por conseguinte, as doses efetivas comprometidas totais devidas a todos os radionuclídeos.
- 4) Realizar uma pesquisa na literatura a fim de encontrar estudos similares em amostras de leite em pó para comparar as concentrações de atividades e as doses efetivas comprometidas encontradas no presente trabalho com as encontradas na literatura.
- 5) Comparar os valores encontrados de concentrações das atividades no presente trabalho com os valores de referência dados pela UNSCEAR (2000).

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Radioatividade natural e artificial

O decaimento radioativo é um fenômeno que pode suceder de modo natural ou artificial. Ocorre quando um núcleo atômico adquire uma configuração mais estável perdendo energia através da emissão de radiação (GIENAL, 2017).

Os radionuclídeos naturais podem ser divididos em dois grupos diferentes: cosmogênicos e primordiais. Os radionuclídeos cosmogênicos vêm do espaço e do sol, bem como de reações nucleares entre a radiação cósmica e a atmosfera terrestre. Os radionuclídeos atingem o nível do solo através de precipitação ou mistura atmosférica. Exemplos desse processo são o ^7Be e ^{14}C . Os primordiais têm sua origem na crosta terrestre e podem pertencer às séries de decaimento ou ocorrer isoladamente (ISAKSSON, 1997). Os radionuclídeos primordiais que possuem longa meia-vida contribuem para a radiação natural de fundo em quantidades significantes. Sua maior parte pertence às séries do ^{238}U e ^{232}Th , e ao ^{40}K , que ocorre isoladamente (SANTAWAMAITRE, 2012).

As fontes artificiais de radiação são oriundas da aplicação da radiação em atividades humanas, como rejeitos radioativos de usinas nucleares, precipitação radioativa devido a testes nucleares e acidentes radiológicos, sendo a principal fonte artificial em relação à dose recebida pela população mundial o uso da radiação na medicina nuclear (SANTAWAMAITRE, 2012).

Os radionuclídeos artificiais têm diferentes origens. Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2016), os radionuclídeos de origem artificial que são incorporados aos alimentos vêm de rejeitos de instalações nucleares, precipitação radioativa de testes nucleares e liberações devido a acidentes nucleares, como em Chernobyl.

Os radionuclídeos, artificiais ou naturais, podem ser introduzidos no corpo através de ingestão ou inalação e originar exposições internas (SANTAWAMAITRE, 2012).

2.2 Radionuclídeos nos alimentos

Em um sentido amplo, os seres humanos estão expostos à radiação externa e interna de radionuclídeos naturais e artificiais. Estes radionuclídeos são diretamente inalados ou transferidos ao longo da cadeia alimentar para o corpo humano, o que elevaria a sua dose. As plantas absorvem os radionuclídeos do solo através de suas raízes, também há

deposição nas folhas e nas culturas, sua transferência também ocorre por vias aquáticas. Assim, o monitoramento do nível de radionuclídeos nos alimentos é um parâmetro importante a partir do qual a avaliação da dose para a população pode ser estimada. (IAEA, 2016).

Na cadeia alimentar, as plantas são os receptores primários da contaminação radioativa. Os receptores secundários são os animais, que consomem plantas ou outros animais. O homem, por sua vez, é contaminado, tanto por plantas quanto por produtos provenientes de animais que entram na sua dieta, sendo que a principal fonte de radionuclídeos na dieta alimentar está no leite e na carne (MELQUÍADES, 2002), conforme está exemplificado na Figura 1.

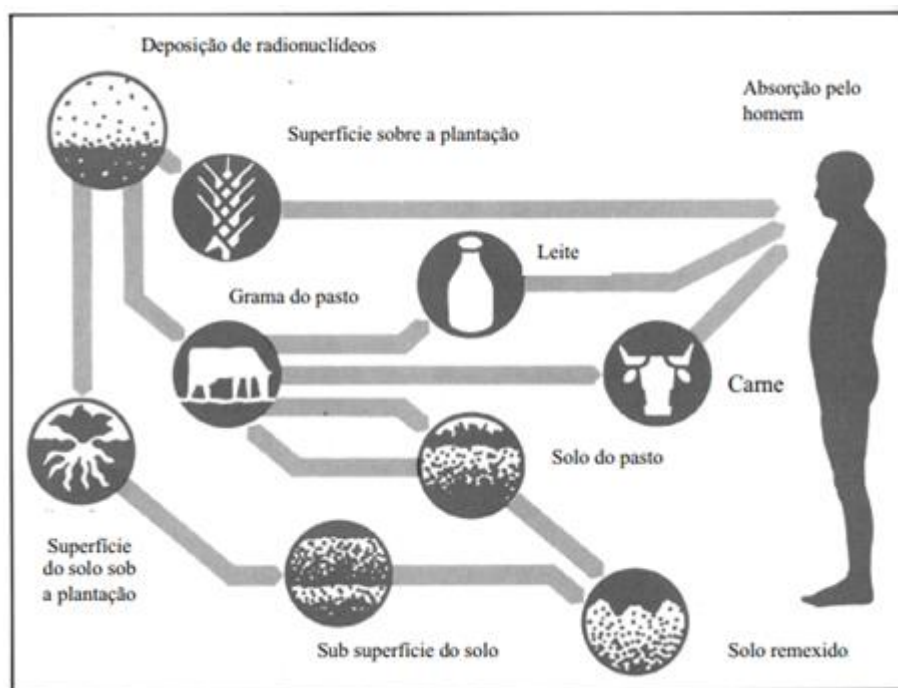


Figura 1: Ciclo de incorporação dos radionuclídeos (Fonte: Melquíades, 2004).

De acordo com a IAEA (2016):

"As concentrações de radionuclídeos de origem natural em diferentes alimentos podem variar devido a diferentes condições ambientais, práticas agrícolas e outros fatores que afetam sua transferência do meio ambiente para culturas e produtos de origem animal. Além disso, as doses devidas ao consumo de alimentos variam de acordo com os tipos de alimentos que são consumidos em qualquer Estado em particular."

Se os radionuclídeos contidos no leite são ingeridos, eles podem ser concentrados em certas partes do corpo, por exemplo, ^{238}U e ^{226}Ra se acumulam no rim e pulmão humanos, ^{228}Th no fígado, no tecido esquelético e nos pulmões e ^{40}K nos músculos (TAWALBEH et al., 2012). Devido à semelhança química entre o ^{137}Cs e o ^{40}K , o primeiro tende a acompanhar o segundo, depositando-se parcialmente nos músculos (CARDOSO, 2012). O acúmulo desses radionuclídeos em quaisquer órgãos do corpo afetará a saúde, o que pode resultar na indução de várias formas de doenças, enfraquecendo o sistema imunológico, e também, contribuindo para o aumento da taxa de mortalidade (ADENIJI et al., 2013). Apesar de baixa, o tório apresenta absorção no trato gastrointestinal (0,05% em adultos) (SCHEIBEL, 2006). Além disso, ^{226}Ra , e ^{228}Ra podem gerar câncer de ossos em humanos e animais (NRC, 1988).

2.3 Leite em pó integral

As plantas absorvem os radionuclídeos do solo através de suas raízes, também há deposição nas folhas e nas culturas, sua transferência também ocorre por vias aquáticas. A contaminação do leite pode ocorrer quando os bovinos inalam ou ingerem radionuclídeos presentes no pasto, na água ou nos outros alimentos que contenham tais radionuclídeos (IAEA, 1989).

O leite é um importante componente da cadeia alimentar e uma fonte de nutrientes na dieta humana diária, consumido em uma quantidade significativa (UWATSE, 2015). A principal fonte de radionuclídeos na dieta alimentar está no leite e na carne. O leite em pó é uma das principais fontes de nutrientes de crianças, além de ser um ingrediente básico de biscoitos, sorvetes, chocolates, entre outros (MELQUÍADES, 2004).



Figura 2: Leite em pó (Fonte: Vedera Brasil)

O leite em pó (Figura 2), é um derivado do leite natural, uma forma moderna de consumo do mesmo, obtido através da desidratação do leite. A conversão de leite em leite em pó aumenta sua vida útil e permite que ele seja armazenado por maior período (cerca de 1 ano) sem perda substancial de qualidade, mesmo a temperaturas ambientes (SHARMA et. al, 2012).

A composição desses pós de leite é mostrada na Tabela 1. Pode-se observar que a lactose é o constituinte que está presente em maiores quantidades tanto no leite em pó integral como no leite em pó desnatado (BICK, 2015). O leite em pó integral, estudado no presente trabalho, possui mais gordura e menos proteína e lactose.

Tabela 1: Composição dos tipos de leite em pó: integral e desnatado (Belitz, Grosch, & Schieberle, 2009).

Constituintes	Leite em pó integral (%)	Leite em pó desnatado (%)
Água	2,7	3
Proteína	26,5	38,2
Gordura	27,4	0,9
Lactose	37,7	49,6
Minerais	5,7	8,2

De acordo com Bick (2015), o leite é uma emulsão de glóbulos de gordura dispersos em fase aquosa, tendo seus constituintes variando de acordo com a espécie de mamífero e com a estação. o leite de vaca tem sua constituição dividida em 87% água, 4.2% gordura, 4.7% lactose, 0.8% sais e minerais, 0.6% proteínas do soro do leite e 2.7% de caseínas. O ressecamento do leite tem a função de aumentar sua vida e reduzir custos de transporte por ter volume e peso menores. O grau de gordura remanescente no leite irá definir sua categoria.

O mercado mundial de leite em pó apresenta grande importância para o Brasil, pois, por exemplo, em 2012, o país ocupava a quarta colocação na produção mundial (12,4%), a segunda colocação no consumo mundial (19,9%) e a terceira colocação nas importações (7,5%). Por outro lado, as exportações não são representativas (USDA, 2012). Esse produto respondeu por 60,1% das importações de produtos lácteos realizadas pelo Brasil em 2012 (CARNEIRO & SIQUEIRA, 2013).

Mesmo o leite em pó integral sendo o principal produto lácteo comercializado no mercado mundial e apresentando particular relevância para a balança comercial brasileira, existem poucos estudos relativos à competitividade das cadeias produtivas do leite em pó

integral (em âmbito nacional e internacional), em particular, pesquisas que contemplem os preços pagos e recebidos pelos principais agentes econômicos envolvidos nas transações (FREITAS et al, 2015).

2.4 Efeitos biológicos da radiação ionizante

Segundo Okuno (2010), os efeitos biológicos da radiação ionizante são classificados em:

2.4.1. Estágios:

A radiação ionizante tem diferentes estágios: o físico tem uma duração de 10^{-15} s, tempo ao longo do qual existem as ionizações e excitações dos átomos constituintes das moléculas do corpo; físico-químico dura 10^{-6} s, estágio no qual, devido à ionização dos átomos, ocorrem as quebras das ligações químicas das moléculas; estágio químico dura alguns segundos, e ocorre devido às novas ligações feitas pelas moléculas fragmentadas; estágio biológico tem durações de tempo variadas, podendo ser dias ou anos, onde ocorrem as alterações morfológicas.

2.4.2. Processos diretos e indiretos:

2.4.2.1. Diretos: quando age sobre moléculas importantes como ácido desoxirribonucleico (DNA). Os danos causam anormalidades nos cromossomos, quebrando-os, podendo resultar em fragmentos perdidos durante a divisão celular ou ligações incorretas a outros cromossomos.

2.4.2.2. Indiretos: é quando a radiação age sobre a molécula da água, e faz o processo de radiólise – quebra através da radiação -, produzindo radicais livres. Os radicais livres são moléculas ou átomos neutros com um elétron desemparelhado em sua última camada eletrônica, e são produzidos por radiação ionizante ou outros agentes como cigarro e álcool. Estes, por sua vez, reagem com outros átomos e capturam um elétron para se estabilizarem, tornando outro átomo instável e assim por diante.

2.4.3. Reações teciduais e efeitos estocásticos:

2.4.3.1. Reações teciduais: possui um limiar de dose para o seu surgimento, abaixo do qual o número de células danificadas é pequeno. Quando um tecido recebe uma dose de

radiação além do limite, há morte celular na região, causando perda da função desse tecido. A severidade do efeito depende da dose, de modo que para doses maiores, mais grave é o efeito.

2.4.3.2. Efeitos estocásticos: são efeitos probabilísticos oriundos de alterações nas células normais. Quanto menor a dose, menos provável o surgimento de um efeito estocástico. Divide-se em efeito cancerígeno e hereditário. O primeiro é o câncer, ocorre nas células somáticas e afeta apenas o indivíduo exposto. O segundo ocorre nas células germinativas e é repassado aos descendentes da pessoa exposta.

Nas últimas cinco décadas, estudos intensivos foram realizados para entender os efeitos biológicos da exposição à radiação ionizante em humanos nos níveis molecular, celular e de organismo. Apesar desses esforços, pouco se sabe sobre os mecanismos responsáveis, talvez pela natureza complexa da radiação ionizante e suas complexas interações com a matéria biológica. No entanto, a exposição à radiação ionizante foi estabelecida como um risco para a saúde humana, contribuindo para a existência de mutações e aumentando a incidência de câncer em populações expostas. Esse conhecimento claramente causou preocupação generalizada sobre os efeitos biológicos da exposição à radiação (CRUZ, 1997).

2.5 Equilíbrio Secular

As séries radioativas naturais do ^{238}U , ^{235}U , ^{228}Th possuem núclídeos de propriedades físico-químicas distintas, com variações em seus períodos de meia vida. Quando o decaimento ocorre em um sistema fechado, por períodos superiores a sete meias vidas do radioisótopo de maior meia vida da respectiva série, as atividades de todos os produtos do decaimento passam a ser iguais àquela do isótopo que dá origem à série (KETCHAM, 1996 apud NADALETI et al., 2016). Esse fenômeno é caracterizado como equilíbrio secular. Pode ser considerado equilíbrio secular sempre que diversos núclídeos de meia vida curta surgem de sucessivos decaimentos, a partir de um núclídeo pai, cuja meia vida seja longa, e para que se estabeleça é preciso garantir que nenhum elemento escape naturalmente (LOPES, 2018).

Segundo Bacchi (1996), o tempo para se atingir o equilíbrio secular é dado pela Equação 1:

$$t = 8 t_{1/2} \text{ do núcleo filho} \quad (1)$$

Onde $t_{1/2}$ é o tempo de meia-vida.

2.6 Atividade específica

Uma das técnicas existentes para quantificar emissões gama é a atividade específica, que determina a concentração de radionuclídeos em uma substância radioativa (LOPES, 2018). A atividade específica de uma amostra é sua atividade por unidade de massa (Bq.kg^{-1}).

2.7 Dose efetiva comprometida e meia vida efetiva

A quantidade de radionuclídeos presentes no organismo de uma pessoa sofrem queda exponencial em função do tempo porque além do decaimento do próprio radionuclídeo, o corpo sofre processos de excreção. Devido a isto, usa-se o parâmetro meia-vida efetiva, que quantifica o tempo para que um dado material radioativo se reduza até metade no corpo humano. A meia-vida efetiva é dada pela Equação 2 (BIRAL, 2002):

$$\frac{1}{T_{(1/2)eff}} = \frac{1}{T_{(1/2)fis}} + \frac{1}{T_{(1/2)biol}} \quad (2)$$

Onde $T_{(1/2)fis}$ é o tempo necessário para que metade dos átomos de uma fonte radiativa se desintegre, e $T_{(1/2)biol}$ corresponde ao tempo necessário para que metade da quantidade inicial da atividade radioativa presente num órgão seja eliminada (OKUNO, 2010). A meia vida efetiva é importante nos casos de contaminação interna.

Quando os radionuclídeos são incorporados ao organismo, pode-se considerar que seu tempo de residência no organismo será governado por sua meia-vida efetiva. Portanto, desde o momento da incorporação em diante, sempre haverá uma dose devido às desintegrações radioativas que ainda estão por acontecer. Nesse sentido, é definida a dose efetiva comprometida, que é a dose proporcionada pelos decaimentos dos radioisótopos incorporados até o final da vida de uma pessoa (50 anos para adultos e 70 anos para crianças) através da ingestão de alimentos (SCHEIBEL, 2006).

2.8 Detectores Semicondutores

A radiação ionizante pode ser detectada através de sua interação com um meio sensível a ela. Existem diversos tipos de detectores com vantagens e desvantagens dependendo do trabalho. No presente trabalho será usado um detector semicondutor, cujo princípio de funcionamento se baseia na excitação dos elétrons do cristal detector devido à radiação emitida pela fonte. Após a isso, os elétrons saem da banda de valência e vão para a banda de condução, formando um par elétron-buraco (o número de pares tem relação de proporcionalidade com a energia depositada pela radiação no cristal do detector). Ao estabelecer-se um campo elétrico, os pares elétron-buraco migram para o ânodo e o cátodo, e assim se forma o sinal elétrico, dando origem ao processo de detecção (MARQUES, 2011).

O semicondutor tem como principal vantagem a energia média necessária para criar um par elétron-buraco, que é menor que a energia para criar um par elétron-íon, que é o processo feito em detectores a gás (LOPES, 2018).

Alguns detectores semicondutores, quando à temperatura ambiente, possuem seus elétrons da banda de valência com quantidade de energia suficiente para migrar para a banda de condução, interferindo no resultado sem ter recebido energia de qualquer interação da radiação com o detector. Para reduzir a excitação térmica dos elétrons da banda de valência e, conseqüentemente, o ruído eletrônico, tornando a interação da radiação gama emitida pela fonte com os elétrons do cristal detector a única forma deles passarem para a banda de condução, é feito o arrefecimento do material detector HPGe à temperatura criogênica (GARCEZ, 2016).

2.9 Sistema operacional

O sistema de aquisição de espectrometria de raios gama tem os seguintes componentes:

1. Detector;
2. Fonte de alta tensão que possibilita aplicar tensão de 0-5000V;
3. Pré-amplificador;

4. Amplificador;
5. Analisador multicanal (Multichannel Analyser, MCA);
6. Blindagem de chumbo – para evitar interferência da radiação de fundo na qualidade do espectro adquirido, principalmente em amostras ambientais de baixa atividade;
7. Microcomputador para instalação do MCA e do software de gerenciamento para armazenamento dos dados.
8. Criostato – encapsula o cristal sob vácuo para inibir a condutividade térmica entre o cristal e o ar que o envolve, mantendo a temperatura criogênica do cristal;
9. Dewar – abriga o nitrogênio líquido. É conectado ao criostato através de uma liga especial de cobre.

O pré-amplificador transforma a carga coletada no processo de detecção num pulso de tensão, cuja amplitude é proporcional à carga coletada. O pulso de tensão vindo do pré-amplificador vai para o amplificador, que amplia e dá forma ao pulso (gaussiana, semi-gaussiana, etc.) e produz um pulso de tensão de saída, que é registrado no MCA. Por sua vez, o MCA mede a altura do pulso, em Volts, proporcional à energia dos fótons. No MCA, é feita a conversão do pulso de tensão em um número de canal, em que cada canal corresponde a uma faixa estreita de tensão. Na memória do MCA é armazenada uma distribuição de contagens dos pulsos com respeito à sua altura. Esta distribuição de pulsos analisados é o espectro (LOPES, 2018).

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

3.1 Detector semicondutor de Germânio hiper puro - HPGe

O detector utilizado para obter os espectros de emissão gama das amostras de leite em pó foi um semicondutor de Germânio Hiper Puro (HPGe) vertical da Canberra, modelo GC3020, com eficiência relativa de 30%. O cristal de germânio possui 62 mm de diâmetro e 40mm de altura. Sua resolução em energia especificada pelo fabricante é de 1,808keV para o pico de 1332 keV do Co-60.

A blindagem, modelo 747 da Canberra, tem 10 cm de chumbo com a parte interna recoberta de 1 mm de estanho, que, por sua vez, é recoberto por 1,6 mm de cobre. A blindagem é recoberta externamente por 9,5 mm de aço com baixa porcentagem de carbono e tem uma cavidade com diâmetro interno de 27,9 cm por 40,6 cm de profundidade.

Um pré-amplificador do tipo RC modelo 2002C está acoplado ao detector no criostato, operando com baixo ruído por estar em equilíbrio térmico com o nitrogênio líquido. O criostato tem modelo 7500SL e o dewar possui capacidade de 30 litros.

O sistema multicanal utilizado foi um DAS 1000 (*Digital Spectrum Analyzer*), de 8192 canais. Para criar a área de depleção máxima a voltagem usada foi de 4500 Volts.

O programa de análise Gama do Genie 2000 inclui um conjunto de algoritmos de análise avançados para processamento adicional de espectros gama adquiridos. Os algoritmos fornecem uma análise completa dos espectros como área, largura a meia altura e eficiência. O sistema de aquisição de dados utilizado nesse trabalho é mostrado na Figura 3.

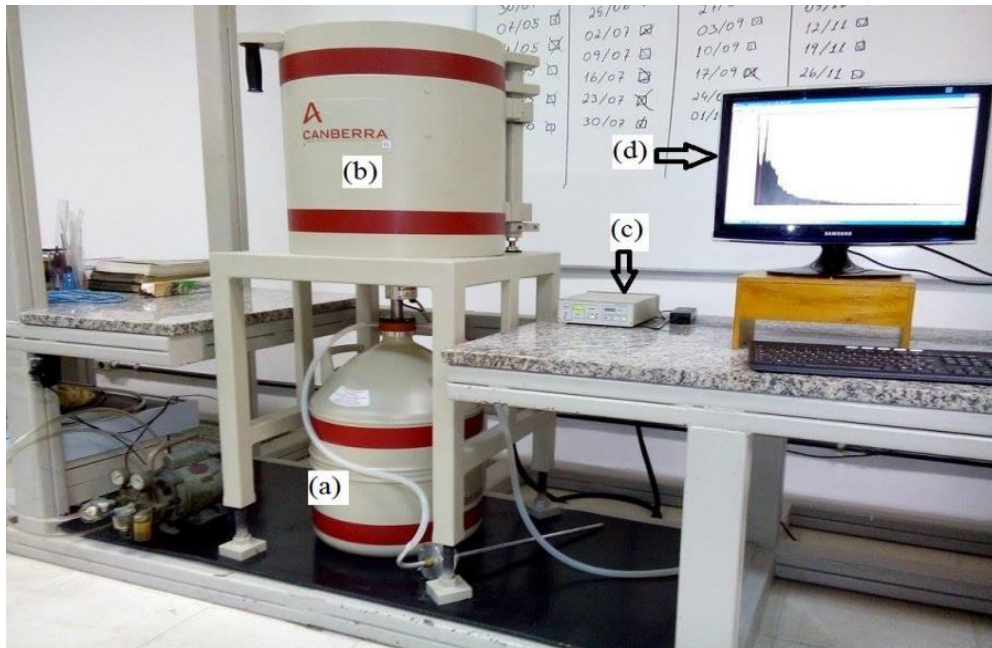


Figura 3: Espectrômetro utilizado: Em (a) dewar com capacidade de 30 litros. Em (b) a blindagem do detector de 10 cm de chumbo recoberta de 1 mm de estanho. Em (c) O multicanal DSA 1000. Em (d) o espectro de uma amostra na tela do computador.

3.2 Calibração em energia do sistema de aquisição

A calibração foi realizada com o programa Gamma Analysis do Genie 2000, que faz um ajuste linear quando duas ou mais linhas são definidas e um ajuste quadrático se três ou mais linhas são definidas. Foram utilizadas fontes radioativas certificadas, totalizando 16 pontos experimentais que correspondem aos picos energéticos dos radionuclídeos. A Tabela 2 mostra os radionuclídeos utilizados e seus respectivos picos energéticos.

Tabela 2: Radionuclídeos e suas respectivas energias utilizados na calibração em energia do sistema de detecção.

Radionuclídeos	Energias (keV)
²⁴¹ Am	59,5
¹⁵⁵ Eu	86,5 – 105,3
¹³⁷ Cs	661,7
⁵⁴ Mn	834,8
¹³³ Ba	80,9 – 276,4 – 302,8 – 356,0 – 383,8
⁶⁵ Zn	1115,6
⁴⁰ K	1460,8
²² Na	511 – 1274,5
⁶⁰ Co	1173,2 – 1332,5

3.3 Eficiência de detecção

A eficiência de detecção para cada energia foi feita utilizando o pacote de programas LabSOCS (*Laboratory Sourceless Calibration Software*) da Canberra. Após a execução de uma modelagem geométrica computacional, o programa divide toda a região do porta amostra e da amostra em 1024 voxels, escolhendo aleatoriamente um ponto em cada voxel e calculando a eficiência de detecção. Em seguida, o programa dobra o número de voxels e repete o processo, comparando os valores segundo critérios de convergência e repetindo o processo caso não converjam os valores. As energias simuladas são pré-definidas (45, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1000, 1400, 2000 keV). A simulação também inibe o uso de fatores de correção por já executar automaticamente o efeito de auto atenuação da radiação gama. A Figura 4 mostra o Geometry Composer (CROUTHAMEL et al., 1970 apud GARCÊZ, 2016).

A Figura 4 mostra a visualização gráfica do *Geometry Composer*, integrante do pacote de *softwares* LabSOCS.

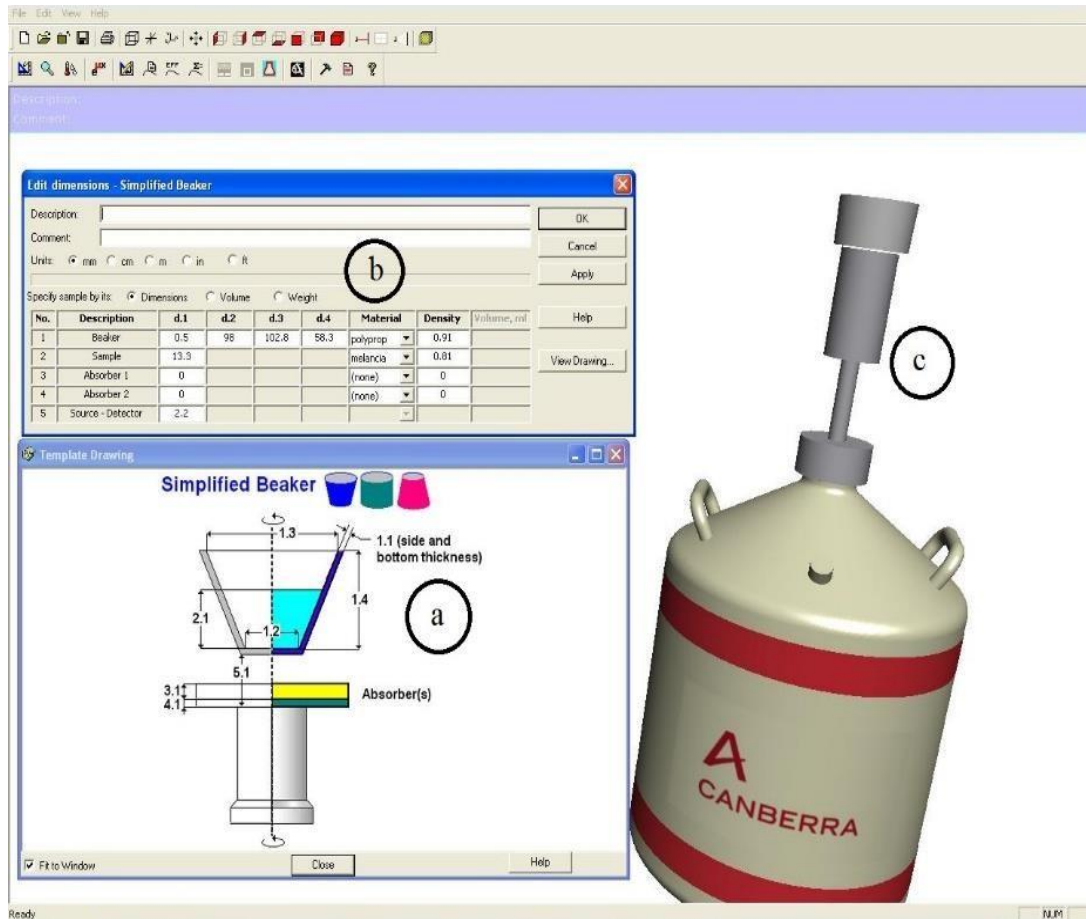


Figura 4: Geometry Composer. (a) mostra o gabarito da geometria para modelagem. (b) mostra a matriz onde são inseridas as dimensões do béquer. (c) mostra o resultado visual das configurações da matriz (b).

Foram medidas as dimensões do porta-amostras com um paquímetro da marca Lee Tools com resolução de 0,02 mm. Cada amostra apresenta uma curva de eficiência diferente, uma vez que possuem densidades diferentes. Uma curva de eficiência típica é mostrada na Figura 5.

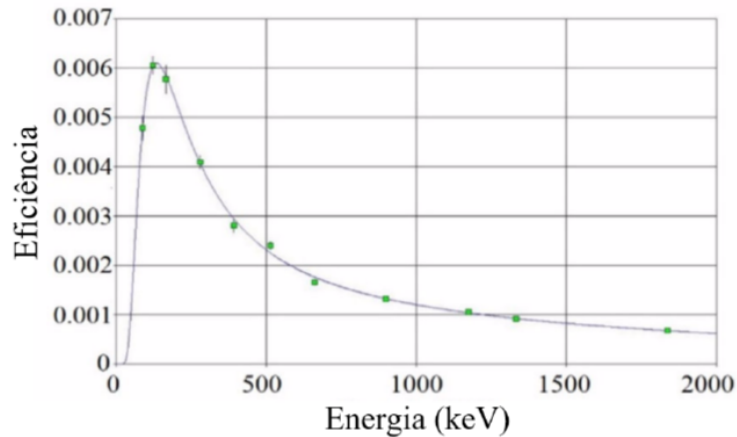


Figura 5: Curva de eficiência típica obtida com o Genie 2000.

3.4 Validação do sistema de detecção

O princípio básico para validação do sistema de detecção se dá a partir da comparação dos valores de eficiência de cada energia de emissão gama determinados experimentalmente e calculados pelo LabSOCS. O procedimento de validação foi executado utilizando fontes certificadas de geometrias diferentes. Fontes pontuais e ampola com padrão líquido, ambas certificadas pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI-IRD/CNEN) da divisão de Metrologia (DIMET).

O cálculo do valor de eficiência experimental demanda saber a contagem gama do detector para uma certa energia ε_1 . Depois, com o valor de atividade, foi estimado o número de emissões do radionuclídeo ε_2 . A razão entre ε_1 e ε_2 dará o valor de eficiência de detecção experimental.

A eficiência simulada foi calculada utilizando a seguinte Equação 3:

$$D = \frac{E_{LabSOCS} - E_{exp}}{E_{exp}} \quad (3)$$

3.5 Preparação das amostras

Foram escolhidas e coletadas 5 amostras dentre as marcas de leite consumidas no município do Rio de Janeiro. Em seguida, as amostras foram guardadas em potes de 200

ml, como mostra a Figura 6. Então, foram lacradas e tiveram suas massas aferidas, obtendo-se os valores da Tabela 3. Após isso, foram guardadas por 40 dias para que atingissem equilíbrio secular. Os espectros de radiação foram adquiridos com o detector HPGe da Canberra. O tempo de contagem utilizado na aquisição do espectro de amostras foi de 36000 segundos. A concentração de atividade e respectivas incertezas foram determinadas de acordo com as incertezas estatísticas das áreas de pico fornecidas pelo software Genie 2000.



Figura 6: Amostras de leite em pó

Tabela 3: Dados referentes às amostras de leite em pó coletadas

AMOSTRA	ORIGEM	MASSA [g]
A1	RS	91,74 ± 0,01
A2	RS	87,99 ± 0,01
A3	MG	102,04 ± 0,01
A4	RJ	111,48 ± 0,01
A5	MG	95,85 ± 0,01

A Figura 7 mostra as amostras sendo depositadas no detector para execução da espectrometria.

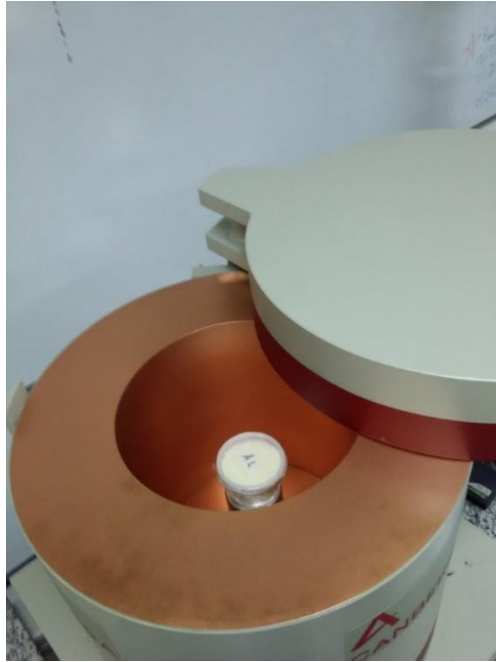


Figura 7: Amostra A1 de leite em pó dentro do detector HPGe antes da contagem

3.6 Cálculo da Atividade específica

Utilizando a espectrometria, é possível determinar a concentração de atividade de uma amostra através da seguinte Equação 4:

$$A = \frac{N_L}{\varepsilon \cdot m \cdot t \cdot P_\gamma} \quad (4)$$

Cujos parâmetros são: A é a concentração de atividade de um dado radionuclídeo em $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$; N_L é a área líquida sob a curva de contagens; ε é a eficiência de detecção; P_γ é probabilidade de emissão gama; t é o tempo de aquisição do espectro, em segundos, e m é a massa da amostra, em kg.

A concentração de atividade do ^{40}K foi obtida a partir da energia de emissão gama de 1460,8 keV. Para o ^{226}Ra foi utilizada a energia de emissão de 1120 keV (^{214}Bi), para o ^{228}Ra foi utilizada a energia de emissão de 911,1 keV (^{228}Ac), do ^{228}Th , a linha de 238,6 keV (^{212}Pb) e do ^{137}Cs , a linha de emissão do 661,7 keV.

O erro associado à Equação 1 pode ser estimado utilizando a propagação de erros dada pela Equação 5:

$$\delta A = \sqrt{\frac{\delta N_L^2}{(m \cdot \varepsilon \cdot t \cdot P_\gamma)^2} + N_L^2 \left(\frac{\delta \varepsilon^2}{(m \cdot \varepsilon^2 \cdot t \cdot P_\gamma)^2} + \frac{\delta m^2}{(m^2 \cdot \varepsilon \cdot t \cdot P_\gamma)^2} + \frac{\delta t^2}{(m \cdot \varepsilon \cdot t^2 \cdot P_\gamma)^2} \right)} \quad (5)$$

Onde δA é a incerteza na concentração de atividade, N_L^2 é a incerteza na área do fotopico, $\delta \varepsilon$ é a incerteza na eficiência de detecção, δm é a incerteza na massa da amostra, δt é a incerteza na medida do tempo de aquisição do espectro gama, e a incerteza em P_γ foi ignorada por ter sido considerada absoluta a probabilidade de decaimento.

3.7 Atividade Mínima Detectável (AMD)

O limite mínimo de detecção é um parâmetro importante no tocante à análise de atividades específicas muito baixas. Ele expressa a habilidade de detecção e um sistema de medida (CARDOSO, 2012). Para determinar o limite mínimo de detecção, foi feito o uso da Equação 6 (IAEA, 1989):

$$L_D = 4,66 \sigma_B \quad (6)$$

Onde σ_B é o desvio padrão da área líquida de contagem do fundo determinada para a linha gama de interesse na amostra. Essa equação determina qual o valor mínimo da contagem que pode ser assumido como representante de uma atividade com um grau de confiança de 95%. Através do limite mínimo de detecção pode-se determinar a atividade mínima detectável (Vide Equação 7).

$$AMD = \frac{L_D}{\varepsilon \cdot m \cdot t \cdot P_\gamma} = \frac{4,66 \sigma_B}{\varepsilon \cdot m \cdot t \cdot P_\gamma} \quad (7)$$

3.8 Cálculo da Dose Efetiva Comprometida

O cálculo da Dose Efetiva Comprometida é dado utilizando a Equação 8 (UNSCEAR, 2000):

$$D = C \cdot A \cdot R \quad (8)$$

Onde D é a dose efetiva comprometida (Sv.ano^{-1}); A é a concentração de atividade do radionuclídeo na amostra (Bq.kg^{-1}); C é o coeficiente de dose efetiva para ingestão dos radionuclídeos (Sv.Bq^{-1}). R é a ingestão anual de leite em pó (kg.ano^{-1}).

A ingestão anual foi obtida através de dados do IBGE (2011), e o coeficiente de dose efetiva pode ser consultado a partir da ICRP 119 (2000), cujos valores importantes para o presente trabalho estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Coeficiente de dose efetiva para cálculo de dose efetiva comprometida (ICRP 119, 2000).

Coeficiente de dose efetiva (Sv.Bq^{-1})					
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{228}Th	^{40}K	^{137}Cs
1 ano	9,60E-07	5,70E-06	3,70E-07	4,20E-08	1,20E-08
5 anos	6,20E-07	3,40E-06	2,20E-07	2,10E-08	9,60E-09
10 anos	8,00E-07	3,90E-06	1,40E-07	1,30E-08	1,00E-08
15 anos	1,50E-06	5,30E-06	9,40E-08	7,60E-09	1,30E-08
adulto <70 anos	2,80E-07	6,90E-07	7,20E-08	6,20E-09	1,30E-08

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Curvas de ajustes

A partir da informação obtida pelo analisador multicanal (DSA 1000) a calibração em energia foi realizada com o auxílio do programa Gamma Analysis do Genie 2000. O ajuste quadrático foi feito de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5: Pontos experimentais utilizados para ajuste quadrático em energia.

Energia (keV)	Canal
59,5	245
80,9	333
86,5	356
105,3	433
276,4	1133
302,8	1242
356	1460
383,9	1574
511	2094
661,7	2712
1173,2	4812
1274,5	5225
1332,5	5465
1460,8	5989

A relação entre canal e energia para todo o espectro é dado pela Equação 9, onde y corresponde à energia em keV e x corresponde ao canal:

$$y = 0,24x - 0,13 \quad (9)$$

O gráfico correspondente aos pontos experimentais utilizados e seus respectivos canais está representado na Figura 8. O coeficiente de determinação do ajuste é de $R^2=0,99$.

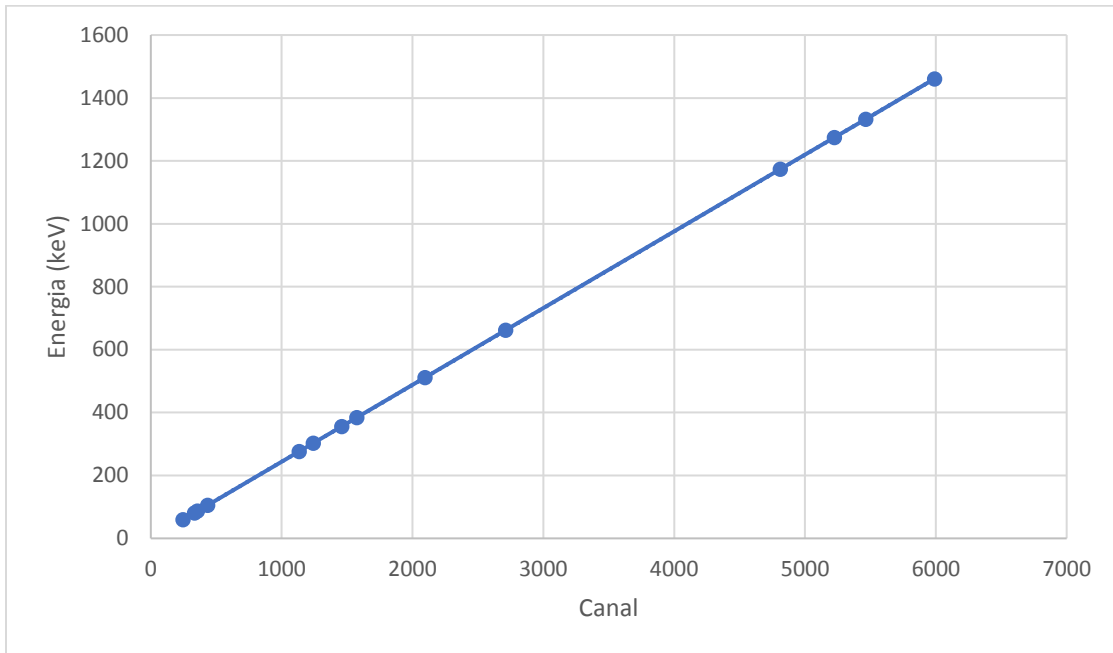


Figura 8: Ajuste em energia para espectrometria gama.

Na Figura 9 é mostrado o espectro em energia da radiação gama produzida pelos radionuclídeos contidos na solução líquida e a curva de eficiência calculada no *Geometry Composer* através do LabSOCS para a validação da curva de eficiência.

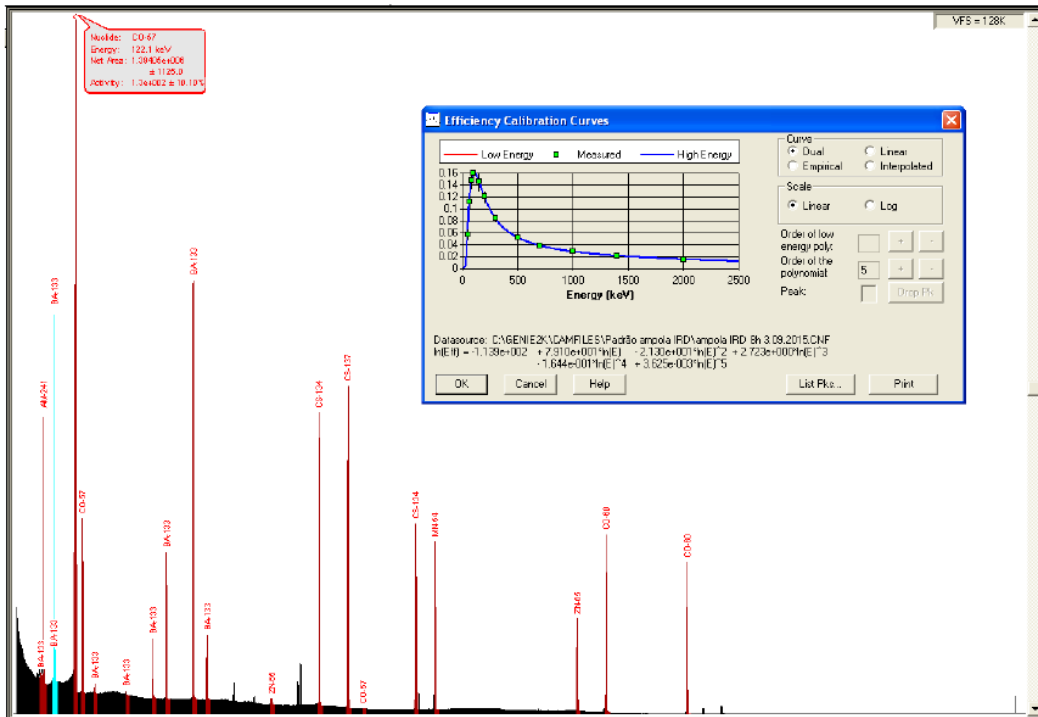


Figura 9: Espectro e curva de eficiência gerados com o uso de fonte padrão produzida pelo LNMRI – IRD/CNEN.

É mostrado na Figura 10 o ajuste entre as eficiências calculadas pelo LabSOCS e obtidas experimentalmente para fontes puntiformes.

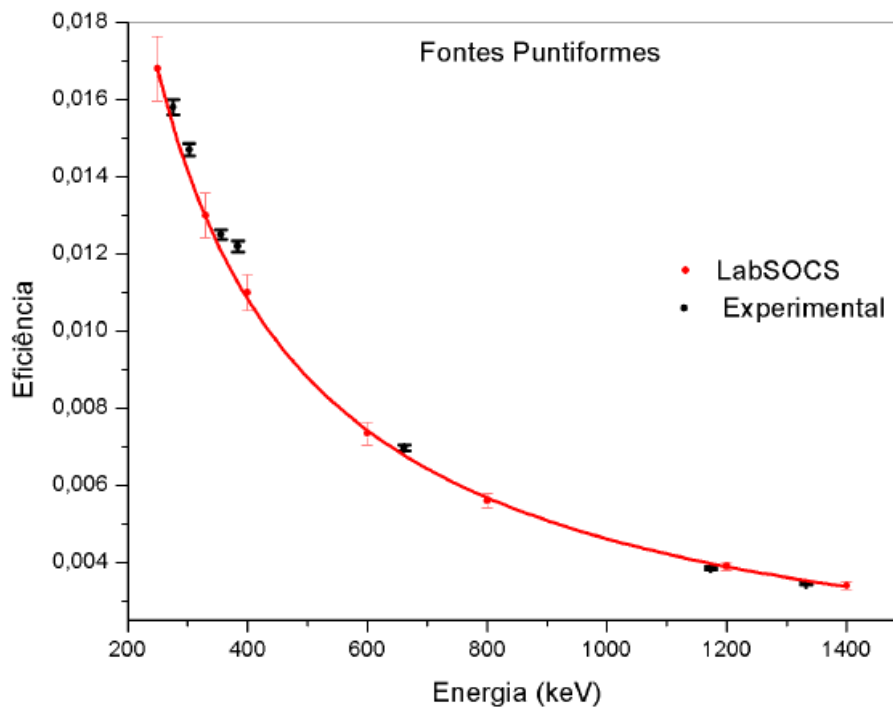


Figura 10: Comparação das eficiências determinadas experimentalmente com o uso de fontes puntiformes calculadas pelo LabSOCS.

A Figura 11 mostra os dados das eficiências calculadas experimentalmente e as calculadas pelo LabSOCS para geometria volumétrica. A comparação demonstra alto grau de similaridade entre os resultados.

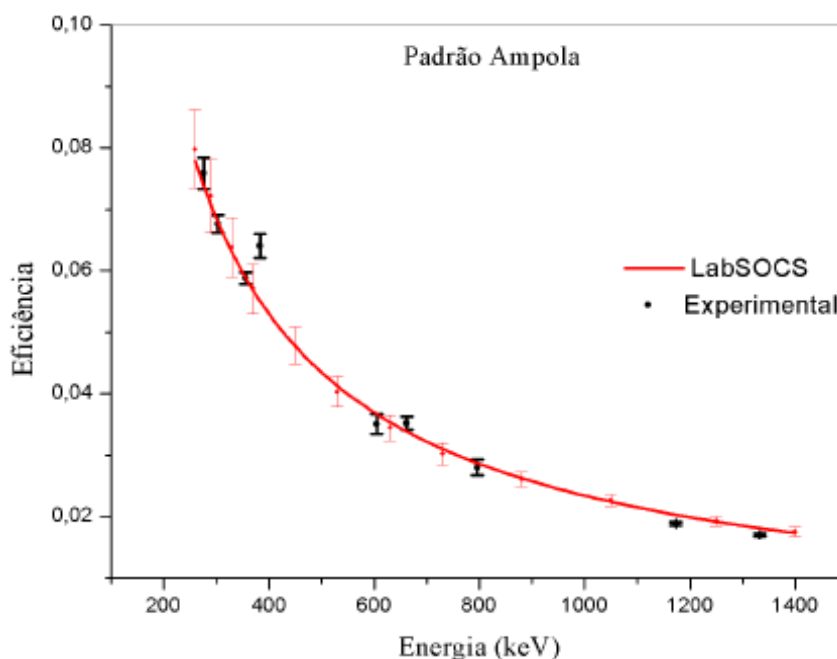


Figura 11: Comparação das eficiências para geometria volumétrica calculadas experimentalmente e calculadas pelo LabSOCS.

4.2 Concentrações das atividades das amostras

As concentrações específicas das amostras foram mensuradas para os cinco radionuclídeos propostos. Os resultados estão apresentados na Tabela 6. Os radionuclídeos ^{137}Cs e ^{226}Ra apresentam concentrações de atividade abaixo da atividade mínima detectável, de modo que não serão considerados em análises posteriores.

Tabela 6: Concentração de atividade dos radionuclídeos em amostras de leite em pó.

Concentrações de atividades [Bq.kg ⁻¹]					
	A1	A2	A3	A4	A5
⁴⁰ K	376,02±20,16	375,24±20,46	384,39±19,84	357,22±18,47	374,27±19,89
²²⁶ Ra	-	-	-	-	-
²²⁸ Ra	-	-	-	0,6±0,39	2,87±1,44
¹³⁷ Cs	-	-	-	-	-
²²⁸ Th	0,89±0,7	-	-	1,59±0,63	1,27±0,7

(-) abaixo da atividade mínima detectável

As atividades mínimas detectáveis calculadas para cada amostra e cada radionuclídeo estão exibidas na Tabela 7.

Tabela 7: Atividades mínimas detectáveis de cada radionuclídeo nas amostras (Bq.kg⁻¹).

Amostras Radionuclídeos	A1	A2	A3	A4	A5
⁴⁰ K	8,14	8,37	7,28	6,70	7,73
²²⁶ Ra	2,68	2,79	2,43	2,24	2,58
²²⁸ Ra	1,34	1,40	1,21	0,34	1,29
¹³⁷ Cs	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
²²⁸ Th	0,69	0,72	0,63	0,58	0,67

As atividades do ⁴⁰K, ²²⁸Ra e ²²⁸Th estão mostradas nas Figuras 12, 13 e 14, respectivamente.

A partir da Tabela 6, é possível perceber que todas as amostras estavam acima do AMD. A amostra com maior concentração de atividade de ^{40}K foi a amostra A1, de $384,39 \pm 19,84 \text{ Bq.kg}^{-1}$, e a menor foi a amostra A4, de $357,22 \pm 18,47 \text{ Bq.kg}^{-1}$. A Figura 12 oferece auxílio na análise dos dados.

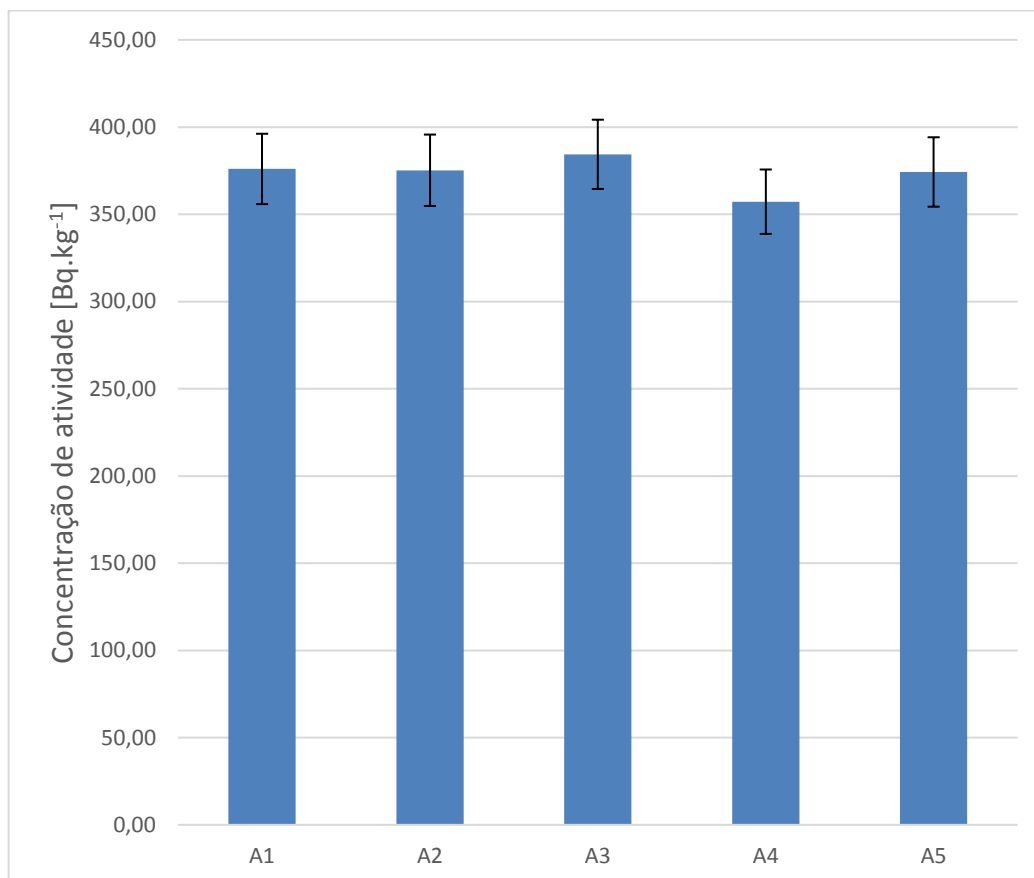


Figura 12: Concentração de atividade do ^{40}K nas amostras de leite em pó.

A Figura 13 auxilia na análise das concentrações de atividade do ^{228}Ra nas amostras A4 e A5 de leite em pó analisadas.

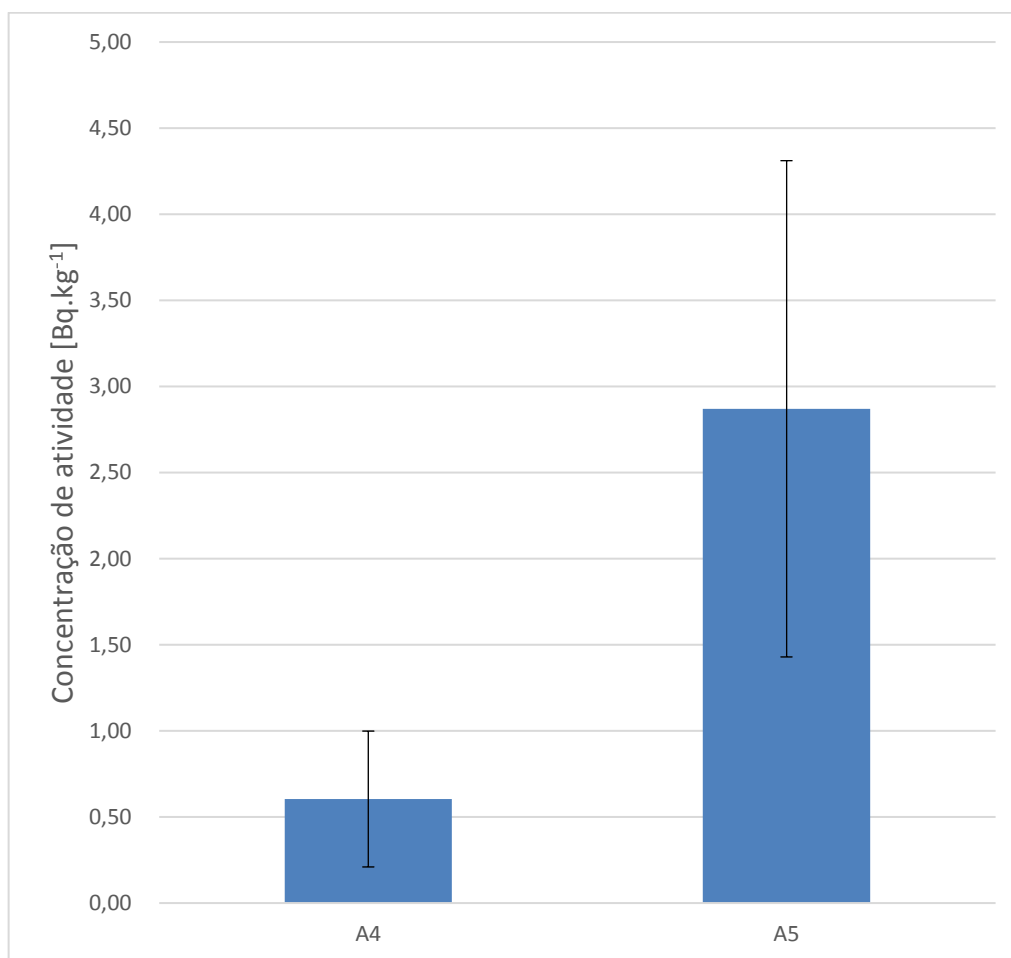


Figura 13: Concentração de atividade do ²²⁸Ra nas amostras de leite em pó.

Como apenas as amostras A4 e A5 apresentaram valores de concentrações de atividade maiores que o AMD, somente as mesmas são exibidas na Tabela 6, e estão representadas graficamente na Figura 13, sendo o valor maior o da amostra A5, de $2,87 \pm 1,44 \text{ Bq.kg}^{-1}$ e o menor o da amostra A4, de $0,6 \pm 0,39 \text{ Bq.kg}^{-1}$. A Amostra A5 tem concentração de atividade para o ²²⁸Ra superior à da amostra A4. Uma possível justificativa para tal fenômeno é a diferente procedência das amostras.

A Figura 14 mostra as atividades específicas para o ²²⁸Th nas amostras de leite em pó A1, A4 e A5, que foram as que apresentaram valores dentro dos limites detectáveis.

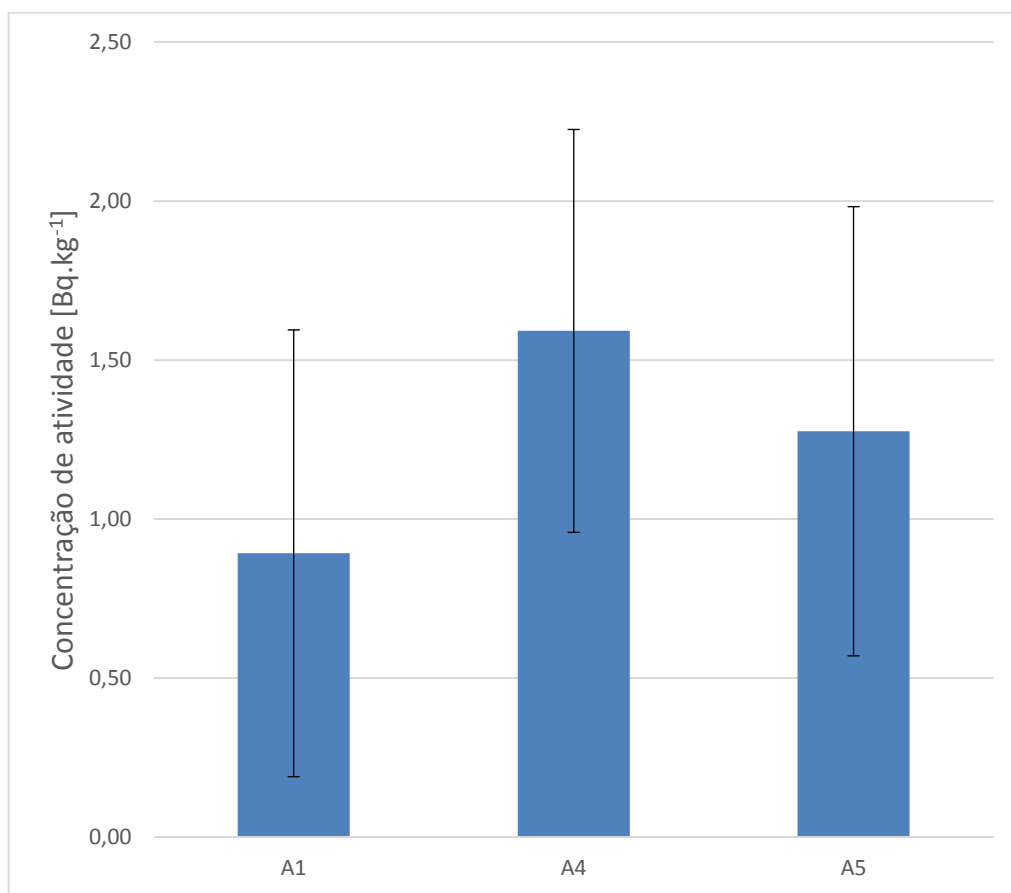


Figura 14: Concentração de atividade do ²²⁸Th nas amostras de leite em pó.

O ²²⁸Th apresentou a maior concentração de atividade para a amostra A4, com $1,59 \pm 0,63 \text{ Bq.kg}^{-1}$, e menor para a amostra A1, com $0,89 \pm 0,7 \text{ Bq.kg}^{-1}$.

A Tabela 8 apresenta os valores de concentrações de atividades do ⁴⁰K obtidos no presente trabalho e os encontrados na literatura através de pesquisa bibliográfica.

Tabela 8: Comparação entre as atividades de ^{40}K no leite em pó no presente estudo e a média em outros estudos.

País	Atividade específica (Bq.kg ⁻¹)	Referência
Brasil (Rio de Janeiro)	357,22±18,47 - 384,39±19,84	Presente trabalho
Iraque	290,67 ± 14,97	SAHAR, 2016
Arábia Saudita	74,51 ± 6,41	ALAMOUDI, 2013
Irã	17,1 ± 3,3	AFSHARI, 2009
Jordânia	348 ± 26	ABABNEH, 2009
Kuwait	162,19±3,14 - 695,06±6,9	ALREFAE, 2012
Nigéria	831,66 ± 54,83	OSIBOTE, 1999

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 8, é possível perceber que a menor atividade do ^{40}K é $17,1 \pm 3,3$ Bq.kg⁻¹, correspondente ao estudo feito no Irã (AFSHARI, 2009) e a maior, ao estudo feito na Nigéria por Osibote (1999), o qual obteve o valor médio de $831,66 \pm 54,83$ Bq.kg⁻¹, que é cerca de 48 vezes o menor valor encontrado e cerca de 2,3 vezes a média dos valores encontrados no presente trabalho.

A Figura 15 oferece um recurso extra para comparação, em escala de cores, entre os valores dos estudos citados, que apresentam as médias dos estudos avaliados.

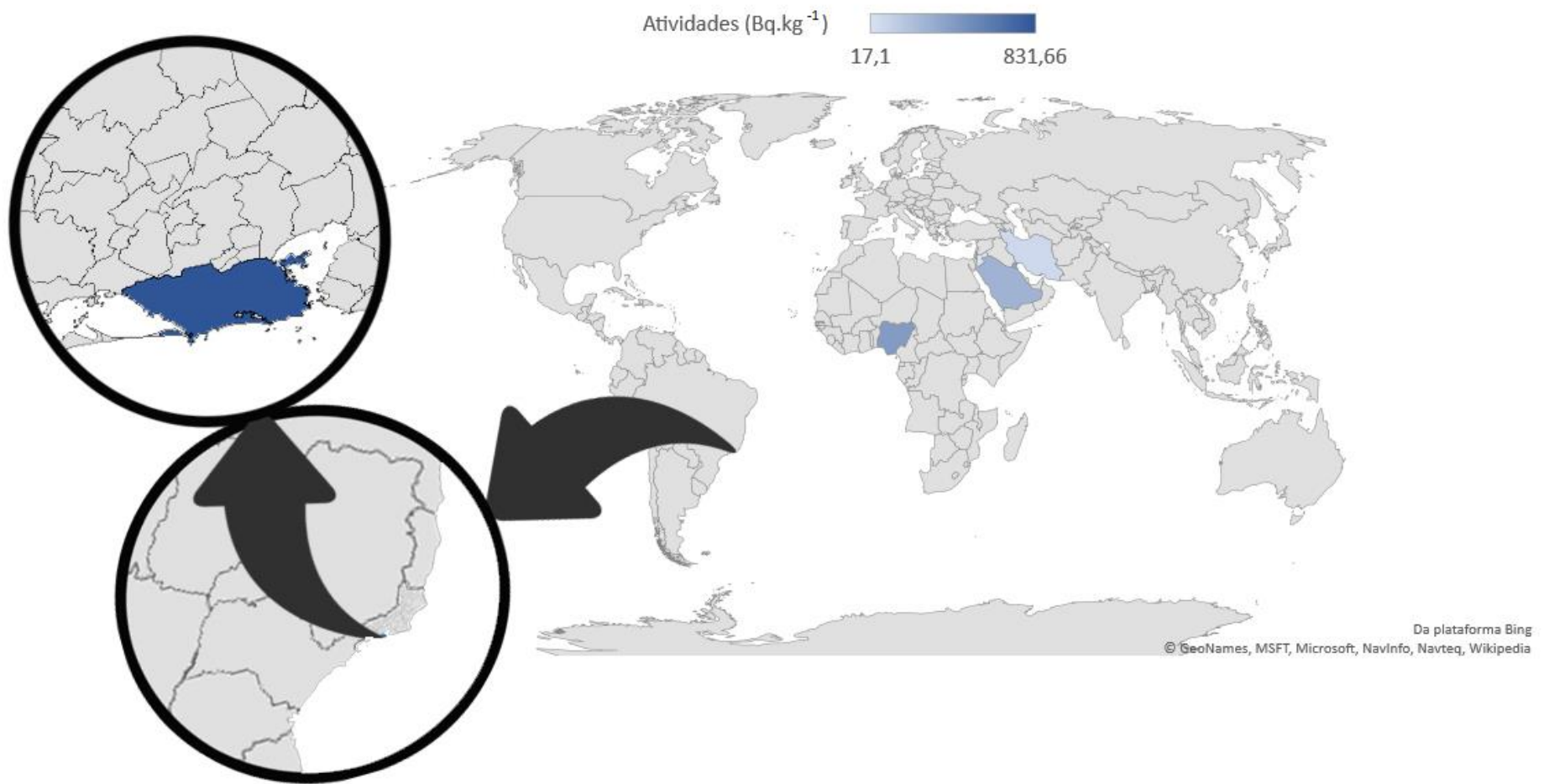


Figura 15: Comparação entre as atividades específicas do ^{40}K no leite em pó em diversos estudos (Bq.kg^{-1}).

Também foi comparada a concentração de atividade do ^{228}Th nas amostras de leite em pó com o estudo feito por Ammer (2017). Os valores estão contidos na Tabela 9. As concentrações de atividade encontradas para o ^{228}Th em amostras de leite em pó no presente trabalho são inferiores ao valor encontrado pelo autor.

Tabela 9: Comparação entre as concentrações de atividades de ^{228}Th no leite em pó em outro estudo.

País	Concentração de atividade (Bq.kg ⁻¹)	Referência
Brasil (Rio de Janeiro)	0,89±0,7 - 1,59 ± 0,63	Presente trabalho
Iraque	1,78 ± 1,33	AMMER, 2017

Os valores encontrados para as concentrações de atividades do ^{228}Ra no presente estudo e na literatura estão representados na Tabela 10. Uma comparação entre tais valores revela que o maior é 4,35 Bq.kg⁻¹, enquanto que o menor é 0,6 Bq.kg⁻¹. Portanto os valores encontrados no presente trabalho situam-se entre esses extremos.

Tabela 10: Comparação entre as atividades de ^{228}Ra no leite em pó em outros estudos.

País	Atividade específica (Bq.kg ⁻¹)	Referência
Brasil (Rio de Janeiro)	0,6 ± 0,39 - 2,87±1,44	Presente trabalho
Jordânia	0,78±0,19 - 1,28±0,22	ABABNEH, 2009
Iraque	1,85 ± 1,36	AMMER, 2017
Nigéria	4,35 ± 2,06	OSIBOTE

Os resultados do estudo feito na Arábia Saudita elevam a média do grupo de dados, portanto a média dos valores encontrados no presente estudo são ligeiramente menores que a média total entre os outros estudos encontrados para atividade específica de ^{228}Ra em amostras de leite em pó.

A Figura 16 permite visualizar através de uma escala de cores os valores da Tabela 10.

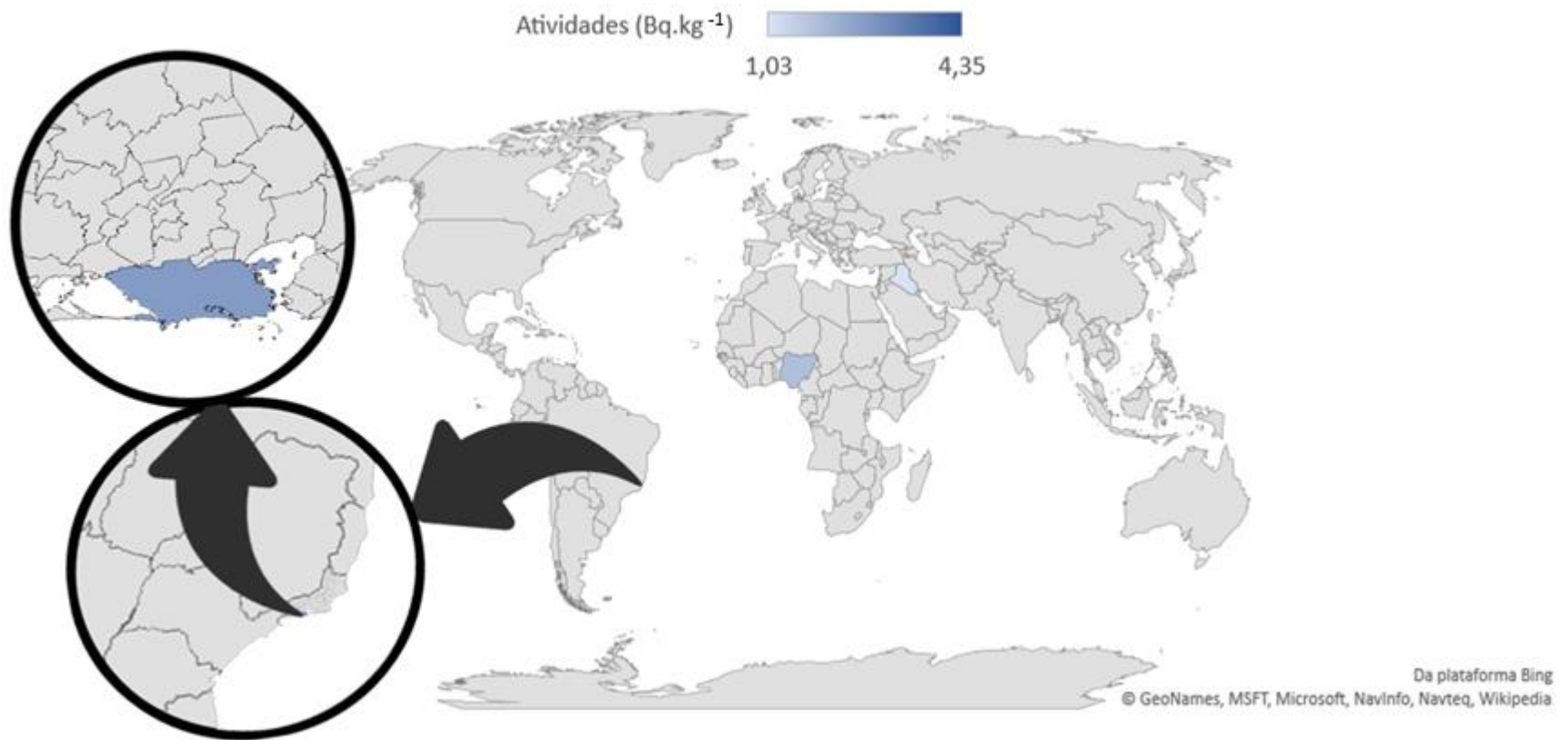


Figura 16: Atividades específicas de ^{228}Ra em outros estudos (Bq.kg^{-1}).

4.3 Doses efetivas comprometidas

Os valores para dose efetiva comprometida devido ao ^{40}K estão apresentados na Tabela 11, divididos em idades, sendo considerados adultos indivíduos maiores de 17 anos. A faixa de idades inferior a um ano de idade não foi abordada devido às especificidades do leite em pó consumido pelos recém-nascidos serem diferentes das abordadas no presente trabalho.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 11, é possível perceber que para todas as idades, a amostra A3 apresentou os maiores valores de dose, e a amostra 4, os menores valores.

Tabela 11: Estimativas de dose efetiva comprometida devido ao ^{40}K em amostras de leite em pó.

Dose devido ao ^{40}K pela ingestão de leite em pó ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$)					
Amostras \ Idades	A1	A2	A3	A4	A5
1 ano	1,73	1,73	1,77	1,64	1,72
5 anos	0,86	0,86	0,88	0,82	0,86
10 anos	0,54	0,53	0,55	0,51	0,53
15 anos	0,31	0,31	0,32	0,30	0,31
adulto <70 anos	0,26	0,25	0,26	0,24	0,25

Além disso, nota-se um decréscimo nas doses efetivas comprometidas devido ao ^{40}K conforme o avanço da idade. Este fato pode ser melhor visualizado através da Figura 17.

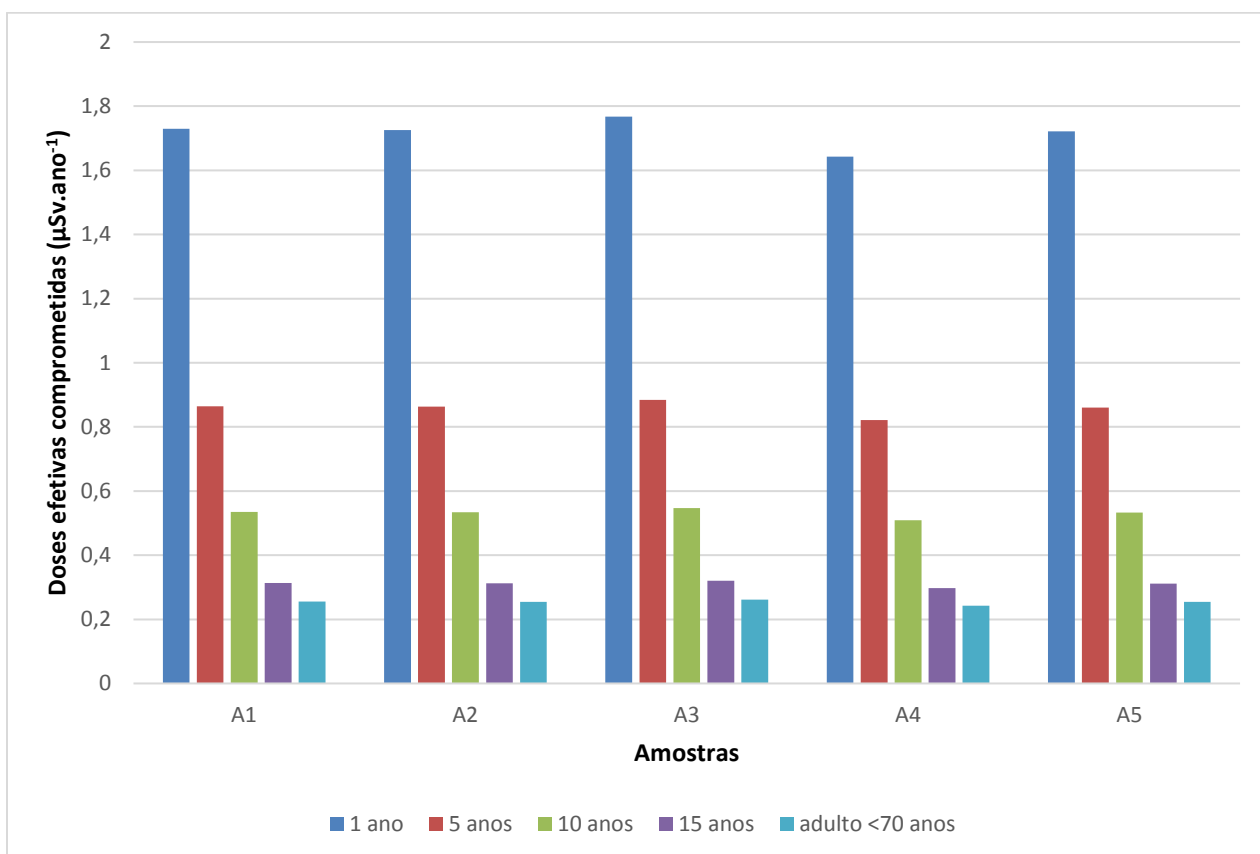


Figura 17: Dose devido ao ^{40}K em diferentes idades devido ao consumo de leite em pó ($\mu\text{Sv.ano}^{-1}$).

Crianças de 1 ano de idade recebem o dobro da dose em comparação com crianças de 5 anos, que por sua vez recebem 1,6 vezes mais dose que crianças de dez anos. Estas últimas recebem 1,71 vezes mais dose que adolescentes de 15 anos, e por fim, estes recebem 1,23 vezes mais dose que adultos devido ao ^{40}K contido no leite em pó.

A Tabela 12 traz informações de doses efetivas comprometidas encontradas em outros estudos, obtidos através de pesquisa bibliográfica, para diferentes faixas etárias devido ao consumo de leite em pó.

Tabela 12: Comparação entre as doses efetivas comprometidas encontradas no leite em pó devido ao ^{40}K em diferentes estudos ($\mu\text{Sv.ano}^{-1}$).

Países Idades	Brasil (Rio de Janeiro) (Presente trabalho)	Iraque (SAHAR, 2016)	Kuwait (ALREFAE, 2012)	Malásia (PRIHARTI, 2016)	Arábia Saudita (PRIHARTI, 2016)	Itália (PRIHARTI, 2016)	Jordânia (PRIHARTI, 2016)
1 ano	1,64-1,77	-	2,6	0,8564	0,9866	0,2961	1,4628
5 anos	0,82-0,88	0,5872	-	0,469	0,1636	-	-
10 anos	0,51-0,55	0,3635	0,878	0,400	0,0981	0,0916	0,4527
15 anos	0,30-0,32	0,2125	-	0,234	0,057	-	-
Adulto <70 anos	0,24-0,26	0,173	0,331	0,1907	0,04684	0,0437	0,2159

Outros estudos, durante a estimativa da dose efetiva comprometida, utilizaram-se de valores de 15 kg.a^{-1} para a faixa etária de 1 a 2 anos, 14 kg.a^{-1} para 2-17 e 13 kg.a^{-1} para adultos acima de 17 anos (PRIHARTI, 2016), enquanto que o presente estudo encontrou valores de $0,109 \text{ kg.a}^{-1}$ baseados no IBGE (2011). A comparação direta resultaria em um grande foco nas ingestões dos países, ocultando as informações a respeito das doses. No intuito de resolver o problema, as doses nos outros estudos foram recalculadas utilizando como base a ingestão de leite em pó encontrada para o Rio de Janeiro de acordo com os dados do IBGE, de modo que fique em evidência a comparação entre as doses, em vez da ingestão anual.

As doses devido ao ^{40}K obtidas no presente estudo, de modo geral, são inferiores aos valores encontrados por Sahar (2016) em todas as idades estudadas e superiores às outras.

Além disso, também nota-se que a dose efetiva comprometida em todos os estudos também mostrou declínio conforme avanço da idade.

Para o ^{228}Th , obteve-se os dados que estão exibidos na Tabela 13 e representados na Figura 18.

Tabela 13: Valores de dose efetiva comprometida devido ao ^{228}Th em amostras de leite em pó.

Dose devido ao ^{228}Th ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$)					
Amostras \ Idades	A1	A2	A3	A4	A5
1 ano	0,04	-	-	0,06	0,05
5 anos	0,02	-	-	0,04	0,03
10 anos	0,01	-	-	0,02	0,02
15 anos	0,01	-	-	0,02	0,01
adulto <70 anos	0,01	-	-	0,01	0,01

A Tabela 13 mostra que os maiores e os menores valores de dose devido ao consumo de ^{228}Th pela ingestão de leite em pó são a amostra A4 e A1, respectivamente. O menor valor de dose devido ao ^{228}Th contido no leite em pó foi de $0,01 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$, para adultos, e o maior valor foi de $0,06 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ para crianças de 1 ano. Novamente, para todas as idades, nota-se a diminuição na dose conforme aumento da idade.

Não foram encontrados dados na literatura com respeito à dose efetiva comprometida devido ao ^{228}Th para traçar um quadro comparativo.

A Figura 18 permite melhor visualização das curvas decrescentes para as amostras nas diferentes idades.

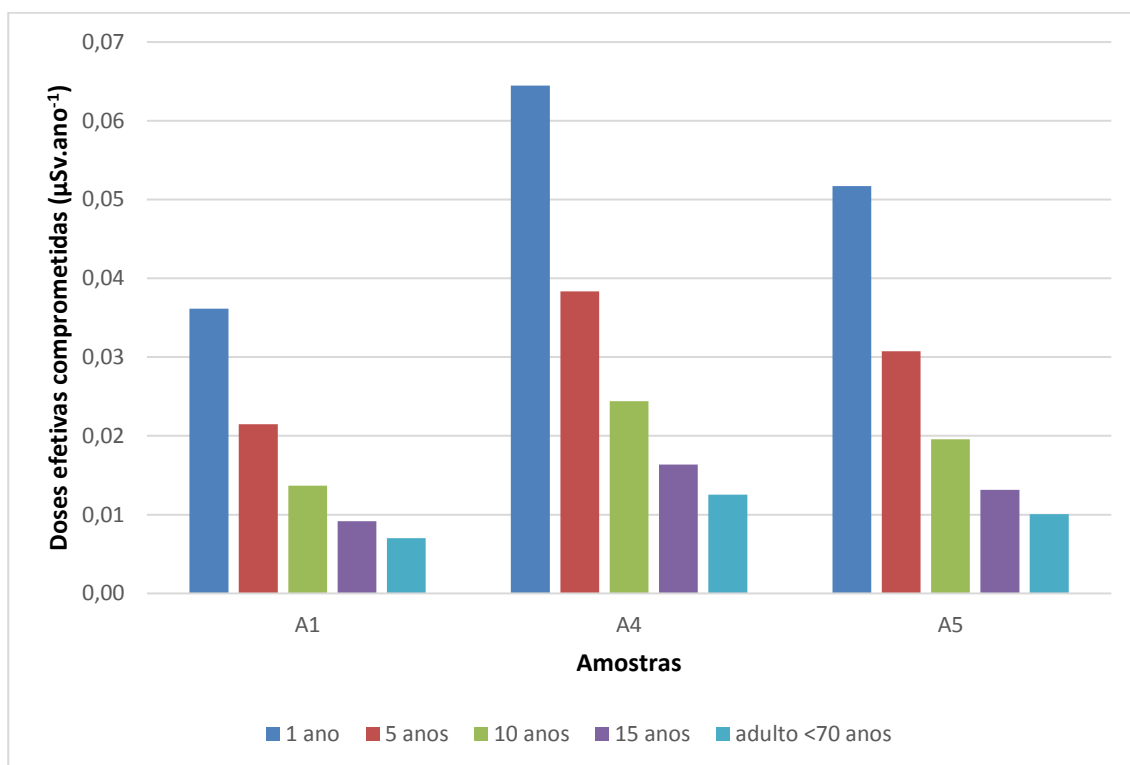


Figura 18: Dose devido ao ²²⁸Th em diferentes idades devido ao consumo de leite em pó (μSv.ano⁻¹).

Os valores das doses efetivas comprometidas devido ao consumo de ²²⁸Ra em amostras de leite em pó estão exibidos na Tabela 14, dispostos de acordo com as idades. A amostra A5 ofereceu uma dose superior à amostra A4 para 1, 5, 10, 15 anos e adultos em 4,71, 4,86, 4,73, 4,77, 4,40 vezes, respectivamente.

Tabela 14: Valores de dose efetiva comprometida devido ao ²²⁸Ra em amostras de leite.

Dose devido ao ²²⁸ Ra (μSv.ano ⁻¹)					
Amostras \ Idades	A1	A2	A3	A4	A5
1 ano	-	-	-	0,38	1,79
5 anos	-	-	-	0,22	1,07
10 anos	-	-	-	0,26	1,23
15 anos	-	-	-	0,35	1,67
adulto <70 anos	-	-	-	0,05	0,22

Os valores de dose para as amostras A1, A2 e A3 não foram calculados, pois suas concentrações específicas estavam abaixo dos limites de detecção para o ^{228}Ra em tais amostras.

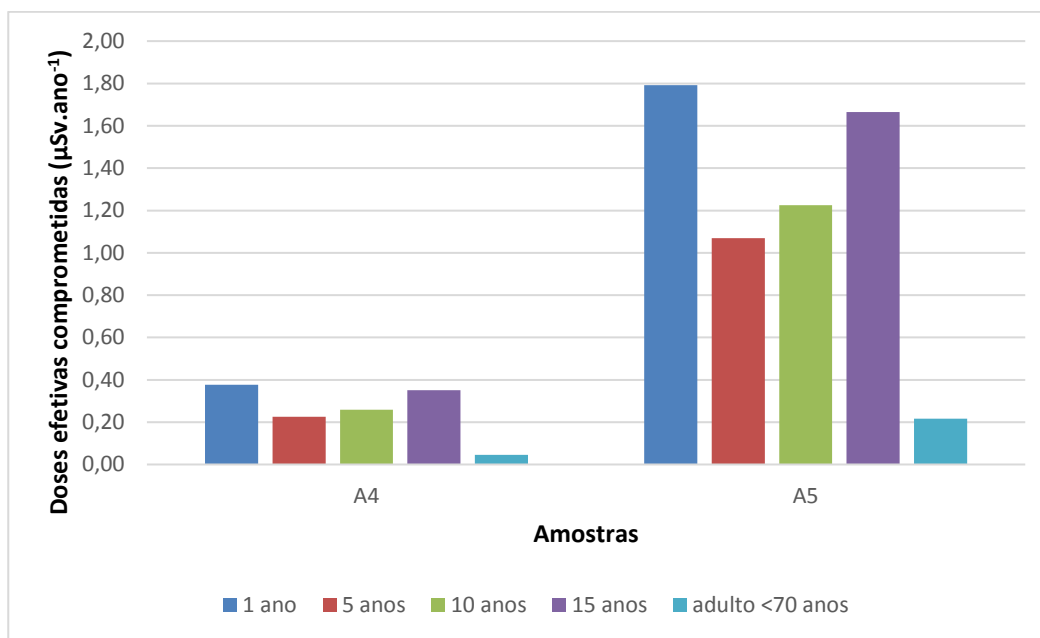


Figura 19: Dose devido ao ^{228}Ra para diferentes idades devido ao consumo de leite em pó ($\mu\text{Sv.ano}^{-1}$).

A Figura 19 representa graficamente os dados da Tabela 14, tornando mais fácil de ver que em ambas amostras não há uma relação clara entre idade e dose efetiva comprometida, discordando dos casos anteriores. Isto se deve aos fatores de conversão de dose dados pela ICRP 119 terem um comportamento de ascensão entre as idades de 10 e 15 anos.

Assim como a atividade da amostra A5 foi maior que a da amostra A4, assim também suas doses correspondentes são maiores.

A Tabela 15 compara valores de dose do presente estudo com outro feito na Jordânia (ABABNEH, 2009), utilizando a mesma metodologia aplicada para comparação no caso do ^{40}K .

Tabela 15: Comparação entre as doses efetivas comprometidas encontradas no leite em pó devido ao ^{228}Ra em diferentes estudos.

Dose devido ao ^{228}Ra ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$)		
Países \ Idades	Brasil (Rio de Janeiro)	Jordânia
1 ano	0,38-1,79	0,45-0,7296
5 anos	0,22-1,07	-
10 anos	0,26-1,23	0,30-0,50
15 anos	0,35-1,67	-
adulto <70 anos	0,05-0,22	0,05-0,09
Referência	Presente trabalho	ABABNEH, 2009

A comparação dos dados da Tabela 15 mostram que os valores mínimos encontrados no presente estudo são inferiores aos valores mínimos do estudo feito por Ababneh (2009), em contrapartida os valores máximos do presente estudo são superiores aos valores máximos encontrados pelo autor.

Com exceção do ^{228}Ra , todas as doses mostram uma redução de acordo com a idade, mesmo assim, as crianças de um ano recebem doses maiores que outras idades e isso se deve a alguns fatores. De acordo com Brenner (2003), as crianças são mais vulneráveis aos riscos da radiação porque seus tecidos estão em processo de divisão mais ativamente do que adultos, e têm o potencial de viver mais e, portanto, há mais tempo para o desenvolvimento de um tumor maligno.

Contudo, segundo a UNSCEAR (2000), não há valores de referência para dose devido ao ^{40}K , pois está em equilíbrio homeostático com o organismo, e sua dose efetiva total sugerida é $165 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ para adultos e $185 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ para crianças. Portanto, o consumo de leite em pó proporciona uma dose devido ao ^{40}K que representa 0,3% e 0,2% da dose total no organismo de uma criança e de um adulto, respectivamente. Os valores de referência para dose efetiva anual devido à ingestão de radionuclídeos ^{228}Ra e ^{228}Th estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Valores de referência para dose efetiva comprometida (UNSCEAR, 2000).

Valores de Referência ($\mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$)			
Idade \ Radionuclídeo	1-2 anos	8-12 anos	>17 anos
^{228}Ra	31	40	11
^{228}Th	0,38	0,30	0,22

A comparação entre os dados exibidos nas Tabelas 13, 14 e 15 mostram que as doses efetivas comprometidas encontradas no presente trabalho devido à ingestão dos radionuclídeos ^{226}Ra e ^{228}Th contidos no leite em pó estão abaixo dos valores de referência (UNSCEAR, 2000).

A Tabela 17 une as contribuições de cada radionuclídeo para as doses efetivas comprometidas totais para cada idade, utilizando as médias das doses estimadas.

Tabela 17: Doses efetivas comprometidas totais

Idades	^{40}K	^{228}Ra	^{232}Th	DOSE EFETIVA COMPROMETIDA TOTAL ($\mu\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$)
1 ano	1,72	1,09	0,05	2,85
5 anos	0,86	0,65	0,03	1,53
10 anos	0,53	0,75	0,02	1,29
15 anos	0,31	1,01	0,01	1,33
adulto < 70	0,25	0,14	0,01	0,40

A Tabela 17 mostra que o ^{40}K é o maior contribuinte para a dose efetiva comprometida de 1 a 5 anos de idade e na fase adulta. De 10 a 15 anos o ^{228}Ra contido no leite em pó torna-se o radionuclídeo que entrega maior dose.

Em geral, o ^{228}Th apresentou menos de 3% do valor das doses totais, sendo um pequeno contribuinte para a dose quando comparado aos outros radionuclídeos. Para

todas as idades exceto 10 e 15 anos, as doses devido ao ^{40}K representaram mais de 56% das doses totais. Entre 10 e 15 anos, contudo, o ^{226}Ra representa 58 e 76% das doses totais.

O potássio é um elemento-chave na regulação de muitas funções do corpo como digestão e taxa cardíaca e seu conteúdo no corpo é mantido constante por processos metabólicos, naturalmente possuindo 0,12% de peso correspondendo ao ^{40}K , portanto este último é regulado naturalmente.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo das concentrações das atividades dos radionuclídeos: ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th e ^{137}Cs em amostras de leite em pó de cinco marcas consumidas no município do Rio de Janeiro utilizando espectrometria gama de alta resolução. A partir dos valores das concentrações das atividades foram calculadas as doses efetivas comprometidas devido à ingestão desses radionuclídeos contidos nas amostras de leite em pó

As amostras apresentaram concentrações de atividades devido ao ^{226}Ra e ^{137}Cs abaixo do limite detectável pelo sistema utilizado, e as amostras A2 e A3 apresentaram atividades detectáveis apenas para o ^{40}K .

A atividade máxima obtida para o ^{40}K foi de $384,39 \pm 19,84 \text{ Bq.kg}^{-1}$ e a mínima, $357,22 \pm 18,47 \text{ Bq.kg}^{-1}$. A comparação com outros estudos mostrou que esses valores se encontram dentro do padrão estabelecido pela referente bibliografia. A concentração de atividade para o ^{228}Th variou entre $0,89 \pm 0,7$ e $1,59 \pm 0,63 \text{ Bq.kg}^{-1}$, um valor menor que o encontrado no estudo realizado no Iraque (AMMER, 2017). As concentrações das atividades do ^{228}Ra encontradas nas amostras A4 e A5 resultaram em $0,6 \pm 0,39$ e $2,87 \pm 1,44 \text{ Bq.kg}^{-1}$, valores que se situaram entre os valores encontrados na literatura.

As doses efetivas comprometidas foram calculadas para idades de 1, 5, 10, 15 e 17 a 70 anos. As maiores doses foram correspondentes às crianças de 1 ano, e as menores, para adultos menores que 70 anos. Para o ^{40}K , a maior dose encontrada foi de $1,77 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ e a menor, de $0,24 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$. Para o ^{228}Th , as doses variaram de 0,01 a 0,06 $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$. Para o ^{228}Ra , as doses variaram de $1,79 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$, para crianças de 1 ano, e $0,05 \mu\text{Sv.ano}^{-1}$, para adultos. De modo geral, a comparação entre as doses mostrou que os valores encontrados no presente estudo são próximos aos encontrados na literatura, exceto o ^{228}Th , que não foi comparado com outros estudos por não ter sido encontrado estudo similar na literatura.

As doses efetivas comprometidas totais foram máximas para crianças de um ano de idade, cuja estimativa de dose é $2,85 \mu\text{Sv.Bq}^{-1}$ e mínima para adultos, cuja dose estimativa é $0,40 \mu\text{Sv.Bq}^{-1}$.

Os valores de concentrações das atividades encontradas no presente trabalho estão abaixo dos valores de referência dados pela UNSCEAR (2000).

O presente trabalho contribuiu para estabelecer um padrão local de concentrações das atividades em amostras de leite em pó e sua dose efetiva comprometida associada, permitindo investigações aprofundadas em trabalhos futuros, visando acrescentar dados de água potável aos dados de leite em pó, uma vez que são consumidos juntos muitas vezes. Também pode ser um bom tema para um futuro trabalho tomando este como base o estudo de doses e risco de câncer para crianças de várias faixas etárias e adultos, visto que a composição do leite em pó para esta faixa etária é diferente do leite em pó integral consumido normalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AALAEI, K. Processing and storage stability of skim milk powder. Thesis. Lund University, Sweden. 2017.
- ABABNEH, Q. ZAID; ALYASSIN, M. ABDALMAJEID; ALJARRAH, M. KHALED E ABABNEH, M. ANAS. Measurement of natural and artificial radioactivity in powdered milk consumed in Jordan and estimates of the corresponding annual effective dose. *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 138, No.3, 2009, pp. 278-283.
- ABABNEH, Q. Z; ALYASSIN, M. A.; ALJARRAH, K.; ABABNEH, A. Measurement of natural and artificial radioactivity in powdered milk consumed in Jordan and estimates of the corresponding annual effective dose. *Radiation Protection Dosimetry* (2010), pp. 1-6.
- ABOLLINO O., ACETO M., BRUZZONITI M.C., MENTASTI E. & SARZANINIC., (1998). “ Speciation of copper and manganese in milk by solid - phase extraction/inductively coupled plasma- atomic emission spectrometry”. *AnnalsChimActa*, 375, 299–306.
- ADEMOLA A. K.; OLAOYE M.A; ABODUNRIN P.O. Assessments of natural radioactivity and the estimation of heavy metals in commonly consumed milk in Oke-Ogun area, Nigeria. *RadiatProt Environ* 2015;38:23-8.
- ADENJI, A. E., ALATISE, O. O., AND NWANYA, A. C. 2013. Radionuclide concentrations in some fruit juices produced and consumed in Lagos, Nigeria. *American Journal of Environmental Protection* 2(2):37–41.
- AFSHARI, S. N.; ABBASISAR, F.; ABDOLMALEKI, P.; NEJAD, G. M. Determination of ⁴⁰K concentration in milk samples consumed in Tehran-Iran and estimation of its annual effective dose. *Iran. J. Radiat. Res.*, 2009; 7 (3): 159-164.
- ALAMOUDI M., Zain. Assessment of Natural radionuclides in Powdered milk Consumed in Saudi Arabia and Estimates of the Corresponding annual Effective Dose. *Journal of American Science*. Vol. 9, No. 6, p.267-273, 2013.

- ALREFAE, Tareq. Radioactivity of long lived gamma emitters in milk powder consumed in Kuwait and estimates of annual effective doses. *Kuwait J. Sci. Eng.* Vol. 39, No. 1A, p. 143-158, 2012.
- AMMER, A.A. Hassan; KADHIM, F. Nada; KARIM, S. Mahmood; RIDHA, A. Ali. Hazard Indices and Age Group Parameters of Powder Milk Consumed in Iraq. *Higher Education Research.* Vol. 2, No. 5, 2017, pp. 117-122.
- ASEFI, M; FATHIVAND, A. A; AMIDI, J; Estimation of annual effective dose from ²²⁶Ra and ²²⁸Ra due to consumption of foodstuffs by inhabitants of Ramsar city, Iran. *Iran. J. Radiat. Res.*, 2005.
- BELITZ, H.-D., GROSCH, W., & SCHIEBERLE, P. (2009). Milk and dairy products. In *Food chemistry* (Vol. 4th revised and extended edition, pp. 512, 528). Leipzig: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Retrieved from e-library (LU-ebooks): http://download.springer.com.ludwig.lub.lu.se/static/pdf/78/bok%253A978-3-540-69934-7.pdf?auth66=1421419401_d6b543c9f2dbf6f827b75b71b1f97160&ext=.pdf
- BICK, Anette. Lactose crystallization in drum dried, freeze dried and spray dried skim milk powders. Master Thesis. Department of Food Technology, Engineering and Nutrition, Lund University. 2015.
- BIRAL, A. R. Radiações ionizantes para médicos, físicos e leigos. Florianópolis: Ed. Insular Ltda., 2002.
- BRENNER DJ, Doll R, GOODHEAD DT, et al. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: assessing what we really know. *Proc Natl Acad Sci USA* 2003;100:13761-6.
- BULDINI P.L.; CAVALLI S. & SHARMA J.L., (2002) “Matrix removal for the ion chromatographic determination of some trace elements in milk”, *Microchem Journal*, 72, 277–284.
- CARDOSO, L.X. Análise de radionuclídeos naturais e artificiais do solo e produtos alimentícios do estado de Sergipe, principalmente da região do platô de Neópolis

(SE). Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em Física, Universidade Federal de Sergipe, 2012.

CARNEIRO, A. V.; SIQUEIRA, K. B. (2013, fevereiro). Conjuntura do mercado – lácteo. Boletim Eletrônico Mensal, Ano 6 (46), 1-16. Recuperado de http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/960144/1/201302C_omercio20InternacionalLeite.pdf

CRUZ, A. da, & GLICKMAN, B.W. (1997). Monitoring the genetic health of humans accidentally exposed to ionizing radiation of Cesium-137 in Goiania (Brazil). International conference Goiania 10 years later: the radiological accident with Cs-137, Brazil.

FREITAS, B. João; REVILLION, P. P. Jean; BELARMINO, C. Luiz. Analysis of Competitiveness of the Whole Milk Powder Production Chain. Revista de Administração Contemporânea. Vol. 19, No. 6, 2015, pp. 750-771.

GARCÊZ, D.W. Ricardo. Determinação das atividades específicas de ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K em amostras de fertilizantes minerais. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, 2016.

GIENAL, M. Characterization of NaI(Tl) detectors for a radioactive decay rate modulation search experiment. Bachelor Thesis in Physics, Department of Physics, University of Zurich, 2017.

GONZÁLEZ-CHORNET G.E GONZÁLEZ-LABAJO J. Natural Radioactivity in Beach Sands From Doñana National Park and Mazagón (Spain). Radiation Protection Dosimetry. 112, (2), 307-310, 2004.

HOSSEINI T. Assessment of annual effective dose from U-238 and Ra-226 due to consumption of foodstuffs by inhabitants of Tehran city, Iran. Radiation Protection Dosimetry 121: 330-332, 2006a.

HOSSEINI T. Assessment of radionuclides in imported foodstuffs in Iran. Iran. J. Radiat. Res., Vol. 4, No. 3, p.149-153, 2006b.

- IBGE; Pesquisa de orçamentos familiares 2008-2009: análise do consumo alimentar pessoal no Brasil / IBGE, Coordenação de Trabalho e Rendimento. - Rio de Janeiro: IBGE, 2011. 150 p.
- ICRP, 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Measurements of radionuclides in food and the environment. Technical Report Series 295, Vienna, 1989.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. Vienna, 2014.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water, IAEA-TECDOC-1788, IAEA, Vienna (2016).
- ISAKSSON, M. Methods of Measuring Radioactivity in the Environment. Doctoral Dissertation. Department of Nuclear Physics. Lund University, 1997.
- LICATA P., ROMBETTAD., CRISTIANI M., GIOFRE F., MARTINO D., CALO M., NACCARI F.,(2004) “Levels of toxic and essential metals in samples of bovine milk from various dairy farms in Calabria Italy”, Environ Res 30,1-6.
- LOPES, M. José. Dose efetiva comprometida devida aos radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{228}Th contidos nos alimentos da dieta da população do estado do Rio de Janeiro. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, 2018.
- MARQUES, M. C. Luís. Estudo comparativo de detectores de HPGe, NaI(Tl), CdZnTe para aplicações em segurança e para resposta a ameaças nucleares e radiológicas. Dissertação de mestrado. Departamento de física, faculdade de ciências, Universidade de Lisboa, 2011.

- MELQUÍADES, F.L.; APPOLONI, C.R. K-40, Cs-137 and Th-232 activities in Brazilian milk samples measured by gamma ray spectrometry. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, Vol. 40, No. 1, p. 5-1, 2002.
- MELQUÍADES, F.L.; APPOLONI, C.R.; Radioatividade natural em amostras alimentares. *Cad. Brás. Ens. Fís.* 2004.
- MILKNET. Leites em pó. Disponível em: < www.milknet.com.br/artigostec7.php > Acesso em 20/06/2018.
- MUNIZ L.C., MADRUGA S.W., ARAÚJO C.L. Consumo de leite e derivados entre adultos e idosos no Sul do Brasil: um estudo de base populacional. *Ciênc Saúde Coletiva*. 2013;18:12.
- NADALETI, C. Willian; FILHO, B. Paulo; NEGE, K. Kassem; ANDREAZZA, Robson; QUADRO, Maurizio; CORREA, K. Erico; CORREA, Luciara; LEANDRO, Diuliana; VIEIRA, Bruno; CASTRO, Andréa. Cinética e equilíbrio secular das principais séries radioativas e suas implicações ambientais. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*. Vol. 2, No. 2, 2016, pp. 1-9.
- NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. (1975), "Natural Background Radiation in the United States", NCRP Report No.45. NCRP, Washington, D.C.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1988. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters: BEIR IV. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/1026>.
- OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. Física das radiações. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- OSIBOTE, O.A.; OLOMO, J.B.; TCHOKOSSA, P.; BALOGUN, F.A. Radioactivity in milk consumed in Nigeria 10 years after Chernobyl reactor accident. Elsevier. Vol. 422, 1999, pp. 778-783.

- PRIHARTI, W.; SAMAT, S.B.; YASIR, S.M.; GARBA, N.N. Assessment of radiation hazard indices arising from natural radionuclides content of powdered milk in Malaysia. *J Radioanal Nucl Chem* (2016) 307:297–303.
- QUINDOS L.S., FENANDEZ P.L. & SOTO J., (1994) “Natural radioactivity in spanish soil”, *Health Physics*, 66,194-200.
- SAHAR A., Amin. Assessment of Natural Radionuclides in Powdered Milk Consumed in Iraq. *Journal of Natural Sciences Research*. Vol. 6, No.13, p.112-115, 2016.
- SANTAWAMAITRE, T. An Evaluation of the Level of Naturally Occurring Radioactive Materials in Soil samples along the Chao Phraya River Basin. Thesis. Department of Physics. University of Surrey.
- SCHEIBEL, V. Determinação das doses efetivas por ingestão de farinhas de cereais através da espectrometria de raios gama. Tese de doutorado. UEL, Londrina, Paraná, Brasil, 2006.
- SHARMA, A; JANA. H. A; CHAVAN S. R. Functionality of milk powders and milk-based powders for end use applications-a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Vol.11, 2012.
- SOUZA, M. A.; PEREIRA, A. R.; YOKOO, M. E.; LEVY, B. R.; SICHIERI, R. Alimentos mais consumidos no Brasil: Inquérito Nacional de Alimentação 2008-2009. *Rev Saúde Pública* 2013;47(1 Supl):190S-9S.
- TAWALBEH, A. A., SAMAT, S. B., YASIR, M. S., AND OMAR, M. 2012. Radiological impact of drinks intakes of naturally occurring radionuclides on adults of central zone of Malaysia. *Malaysian Journal of Analytical Sciences* 16(2):187–193.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. (2000), “Sources and Effects of Ionizing Radiation”, UNSCEAR 2000 Report Vol.1 to the General Assembly, with scientific annexes, United Nations Sales Publication, United Nations, New York

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (2012). Dairy: world markets and trade. United States: Author. Retrieved from <http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/fas/dairymarket//2010s/2012/dairy-market-12-14-2012.pdf>

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (2017). Dairy and Products Annual. United States: Author. Retrieved from <https://www.fas.usda.gov/data/brazil-dairy-and-products-annual-3>

UWATSE, B. O.; OLATUNJI, A. M.; KHANDAKER, U. M.; AMIN, M. Y.; ALKHORAYEF, M. ALZIMAMI. K. Measurement of Natural and Artificial Radioactivity in Infant Powdered Milk and Estimation of the Corresponding Annual Effective Dose. ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE Vol. 32, Number 10, 2015.