



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ANÁLISE DA ATIVIDADE ESPECÍFICA DE 40K, 226RA, 228RA, 232TH E DETERMINAÇÃO DO RISCO DE CÂNCER A PARTIR DA INGESTÃO DE FÓRMULAS INFANTIL

Thais Santos Fernandes

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

Julho de 2019

ANÁLISE DA ATIVIDADE ESPECÍFICA DE 40K, 226RA, 228RA E 232TH E
DETERMINAÇÃO DO RISCO DE CÂNCER A PARTIR DA INGESTÃO DE
FÓRMULAS INFANTIL

Thais Santos Fernandes

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

Examinada por:

Prof. Ademir Xavier da Silva, D. Sc.

Prof. Delson Braz, D. Sc.

Prof. Edmilson Monteiro de Souza, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO de 2019

Fernandes, Thais Santos

Análise da atividade específica de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th e determinação do risco de câncer a partir da ingestão de fórmula infantil/ Thais Santos Fernandes. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2019.

X, 1 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Nuclear, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 30-31.

1. Dose Efetiva Comprometida. 2. Risco De Câncer. 3. Fórmulas Infantis. 4. Atividade Específica. I. da Silva, Ademir Xavier. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica. III. Análise da atividade específica de ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th e determinação do risco de câncer a partir da ingestão de fórmula infantil

AGRADECIMENTOS

Gostaria de primeiramente agradecer a Deus, pela minha vida, pela minha família, pela oportunidade de estudar numa faculdade renomada como a UFRJ e de conseguir chegar ao fim dessa jornada sem desistir.

Aos meus pais, pela educação passada, por cada palavra e gesto de incentivo, por todo apoio emocional e financeiro dado até aqui, meu muito obrigada. Sem vocês eu não teria conquistado nada até hoje, espero que eu tenha atingido suas expectativas, amo vocês.

À minha madrinha, que sempre teve orgulho da carreira que eu escolhi, minha mãe não poderia ter escolhido pessoa melhor para minha segunda mãe.

Aos meus irmãos, por toda cumplicidade e torcida pelo meu sucesso. Aos meus sobrinhos e afilhados, por todo amor trocado, vocês são muito especiais para mim. À minha prima, por toda lealdade e incentivo, meu espelho.

Aos meus amigos, em especial Ana Coppe, Igor Rocha e André Vidal, agora meus colegas de profissão, pelas tardes de estudos, pelas inúmeras sextas de festas em que ficamos na faculdade, e não menos importante, meus cúmplices Lucas Wilian e Íris Costa, que sempre estiveram presentes nesses momentos inesquecíveis de distrações importantíssimos para minha conclusão.

Ao meu orientador, Ademir Xavier, pela oportunidade e confiança em participar da sua equipe e por ter acreditado no meu potencial, sempre me motivando a evoluir.

Aos meus colegas de laboratório, em especial José Marques Lopes, por toda a dedicação em passar seu conhecimento, pelas ajudas em todas as pesquisas realizadas por mim e não menos importante, pela paciência que sempre teve colaborando para o meu crescimento acadêmico.

Aos meus professores, os melhores que eu poderia escolher, pela amizade e trocas de conhecimento fundamentais para meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Aos funcionários do PEN – Programa de Engenharia Nuclear, em especial ao Washington e Reginaldo, sempre solícitos e dispostos a ajudar os alunos a qualquer momento.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

ANÁLISE DA ATIVIDADE ESPECÍFICA DE ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra E ^{232}Th E
DETERMINAÇÃO DO RISCO DE CÂNCER A PARTIR DA INGESTÃO DE
FÓRMULAS INFANTIL

Thais Santos Fernandes

Julho/2019

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Curso: Engenharia Nuclear

O conhecimento da radioatividade natural no homem e no seu ambiente é importante, uma vez que os radionuclídeos naturais são as principais fontes de exposição à radiação humana. É um fenômeno natural em que elementos radioativos e isótopos, que se encontram na natureza, são capazes de emitir radiações, como partículas alfa e beta, e radiação gama. Os nuclídeos radioativos presentes no ambiente natural entram no corpo humano principalmente através da ingestão de alimentos e água.

O presente trabalho apresenta valores de concentrações específicas dos radionuclídeos ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{40}K em amostras de fórmulas infantis coletadas no município do Rio de Janeiro. A partir destes valores foi estimada a dose efetiva comprometida devida a ingestão das fórmulas infantis coletadas. O ^{40}K teve atividade específica média de $202,24 \pm 9,00\text{Bq/Kg}$. Os outros radionuclídeos tiveram atividades específicas abaixo do limite de detecção pelo método utilizado. A dose efetiva anual devida ao ^{40}K é de $260,90\mu\text{Sv}$, para crianças de 0 a 6 meses e de $136,46\mu\text{Sv}$ para crianças de 6 a 24 meses.

Se tratando do risco de câncer esse presente trabalho calculou para essas amostras um valor médio de $1,99 \text{E}-4/\text{ano}$, ou seja, a probabilidade de aumento do risco de câncer a dieta diária é de apenas 0,0199%.

Palavras-chave: Dose Efetiva Comprometida, Risco de Câncer, Fórmulas Infantis, Atividade Específica

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

SPECIFIC ACTIVITY ANALYSIS OF ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra AND ^{232}Th AND DETERMINATION OF THE RISK OF CANCER DUE TO THE OF INFANT FORMULA

Thais Santos Fernandes

July/2019

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Course: Nuclear Engineering

The knowledge of natural radioactivity in humans and its environment is important, since natural radionuclides are the main sources of exposure to human radiation. It is a natural phenomenon in which radioactive elements and isotopes, which are found in nature, are capable of emitting radiations, such as alpha and beta particles, and gamma radiation. The radioactive nuclides present in the natural environment enter the human body primarily through the ingestion of food and water.

The present work presents values of antigen concentrations of the radionuclides ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{40}K in samples of infant formulas collected in the city of Rio de Janeiro. From elucidation values was estimated an effective dose compromised due to ingestion of the infant formulas collected. The ^{40}K had a mean specific activity of $202,24 \pm 9,00$ Bq/Kg. The other radionuclides had antigen Activities below the detection limit by the method used. The annual effective dose inducing ^{40}K is $260,90\mu\text{Sv}$, for children from 0 to 6 months and $136,46\mu\text{Sv}$ for children aged 6 to 24 months.

Regarding the risk of cancer this work calculated for these samples an average value of $1,99 \text{ E-}4/\text{year}$, that is, the probability of increased risk of cancer the daily diet is only $0,0199\%$.

Keywords: Effective Dose Compromised, Risk of Cancer, Infant Formula, Specific Activity

Sumário

Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas	8
Capítulo 1 Introdução	9
Capítulo 2 Fundamentação teórica	10
2.1 Fórmula Infantil	10
2.2 Radiação	12
2.3 Radioatividade	12
2.3.1 Elemento ^{40}K	13
2.4 Radionuclídeos nos alimentos	14
2.5 Atividade específica	14
2.5.1 Atividade mínima detectável	15
2.6 Equilíbrio secular	15
2.7 Espectrometria gama	16
2.8 Detectores semicondutores	17
2.8.1 Blindagem	18
2.9 Efeitos biológicos da radiação	18
2.10 Dose efetiva	19
2.11 Risco de câncer	20
Capítulo 3 Materiais e métodos	21
3.1 Preparo das amostras	21
3.2 Detector semiconductor Germânio Hiperpuro	22
3.3 Deficiência em energia de calibração	23
3.4 Eficiência da detecção	24
Capítulo 4 Resultados	25
4.1 Cálculo da atividade específica	25
4.2 Cálculo da dose efetiva	26
4.3 Cálculo do risco de câncer	26
Capítulo 5 Conclusões	29
Referências Bibliográficas	30

Lista de Figuras

Figura 1. Fórmula infantil	10
Figura 2. Esquema de decaimento do Potássio-40	13
Figura 3. Meios de incorporação de radionuclídeos pelo homem	14
Figura 4. Amostras de fórmula infantil utilizadas na pesquisa	21
Figura 5. Amostras devidamente lacradas e identificadas	22
Figura 6. Espectrômetro utilizado e seus componentes e acessórios	23
Figura 7. Visualização gráfica do Geometry Composer	24
Figura 8. Espectro de energia da Amostra 2	25

Lista de Tabelas

Tabela 1. Unidades de radiação	12
Tabela 2. Elementos radioativos presentes no corpo humano	19
Tabela 3. Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da dose efetiva	20
Tabela 4. Características das amostras analisadas	21
Tabela 5. Energias utilizadas na calibração de acordo com o radionuclídeo analisado	23
Tabela 6. MDA das amostras analisadas	26
Tabela 7. Atividade específicas das amostras analisadas	26
Tabela 8. Valores comparativos de atividade específica em Bq/Kg	26
Tabela 9. Valores de dose efetiva para as amostras em análise	26
Tabela 10. Valores comparativos de dose efetiva comprometida	27
Tabela 11. Valor de referência para dose efetiva comprometida	27
Tabela 12. Valores de dose efetiva de vida útil	27
Tabela 13. Valores de risco de câncer para lactantes entre 0 e 6 meses	28
Tabela 14. Valores de risco de câncer para lactantes entre 6 e 24 meses	28
Tabela 15. Valores de risco de câncer para lactantes entre 0 e 24 meses	28

Capítulo 1 Introdução

O conhecimento da radioatividade natural no homem e no seu ambiente é importante, uma vez que os radionuclídeos naturais são as principais fontes de exposição à radiação humana. Os nuclídeos radioativos presentes no ambiente natural entram no corpo humano principalmente através da ingestão de alimentos e água (ASEFI, 2005).

A exposição pública à radiação devido aos elementos das cadeias naturais do ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th deve-se ao fato da característica solúvel, principalmente ^{232}Th , e sua capacidade migratória para reservatórios subterrâneos, contaminando vegetais que retiram seus nutrientes do solo. Especificamente, radionuclídeos de ocorrência natural pertencentes as cadeias do ^{232}Th e ^{238}U contribuem aproximadamente com 30 a 60% da dose devido a radiação interna (ELE ABIAMA, 2012).

A medida de traços radioativos no ambiente e em alimentos é de fundamental importância para o monitoramento dos níveis de radiação a que o homem está exposto direta ou indiretamente. Você pode achar que a contaminação por radiação só atinge as regiões e pessoas que vivem próximo ou trabalham em usinas nucleares ou com qualquer outra fonte de radioatividade. Porém diariamente estamos normalmente expostos a uma pequena quantidade de radiação proveniente do ambiente e dos alimentos que ingerimos (MELCHIADES, 2004).

O conteúdo de radionuclídeos nos materiais que são disponibilizados para o homem deve ser conhecido para atender aos limites das normas nacionais e internacionais. Desse modo, em todo produto comercializado é exigido uma declaração do conteúdo de radioatividade presente. Dentre esses produtos estão incluídos carnes, grãos, açúcar e embutidos. Desde que a ingestão de radionuclídeos naturais não exceda as recomendações, a dose interna devido ao seu consumo não é nociva (UNSCEAR, 2000).

Os alimentos consumidos no estado do Rio de Janeiro vêm de toda a parte do Brasil e do exterior. Portanto, as características radiométricas dos alimentos são as mais variadas, devido às características do solo onde são cultivados as frutas, legumes, verduras, cereais, etc. Essa característica variada da composição radiométrica dos alimentos torna importante o conhecimento da radioatividade natural que o homem está sujeito e o conhecimento da dose efetiva devido ao consumo diário de alimentos, pois a ocorrência natural de radionuclídeos no meio ambiente é a maior fonte de exposição para o ser humano, sendo a alimentação e o consumo diário de água, a principal via de acesso de radionuclídeos para o corpo (UNSCEAR, 2000).

O leite materno é o alimento mais adequado para recém-nascidos. Sua composição é única para atender as necessidades de nossa espécie, proporcionam inigualáveis vantagens nutricionais, imunológicas, psicossociais e econômicas (CALIL et al, 1991; GURMINI e VIEIRA, 2002). A amamentação estreita o vínculo entre mãe e bebê, satisfazendo suas necessidades emocionais e é mais econômica que o aleitamento artificial por não envolver gastos para obtenção do produto e de utensílios para a utilização e preparo (ACCIOLY et al, 2005). A Organização Mundial de Saúde afirma que a fórmula infantil preparada de acordo com os padrões *Codex Alimentarius* é um alimento complementar seguro e um substituto adequado do leite materno (OMS, 2003).

O objetivo do presente trabalho é determinar a concentração de atividade dos radionuclídeos K-40, Ra-226 e Ra-228, a partir da utilização da espectrometria gama, a fim de estimar a dose efetiva comprometida e o risco de câncer devido a ingestão de fórmulas infantis e comparar tais valores com os encontrados na literatura.

Capítulo 2 Fundamentação teórica

2.1 Fórmula infantil

O aleitamento materno é o melhor alimento para o lactente, sendo capaz de suprir as necessidades nutricionais da maioria das crianças até o sexto mês de vida, com adequado teor de macronutrientes, vitaminas e minerais, raramente havendo Contraindicações, como em infecções maternas por agentes de alta patogenicidade ou uso de medicamentos incompatíveis com a amamentação (LACERDA e ACCIOLY, 2003).



Figura 1 – Fórmula infantil

A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda a amamentação exclusiva até os seis meses de idade. O uso desnecessário de mamadeiras ou a introdução de demais alimentos e bebidas durante este período pode prejudicar o aleitamento materno e dificultar o retorno à amamentação. Após o sexto mês de vida, deve-se iniciar a alimentação complementar apropriada à idade do lactente, mantendo-se o aleitamento materno até os dois anos de idade ou mais.

Mas sabe-se que, na impossibilidade do aleitamento materno, a fórmula infantil é indicada por ser modificada para atender às necessidades nutricionais e às condições fisiológicas do lactente no primeiro ano de vida. E considerando que a introdução de outros alimentos na dieta de crianças com idade inferior a dois anos é cada vez mais precoce, a opção pelas fórmulas infantis é a mais segura (CTENAS e VITOLLO, 1999; VIEIRA et al., 2004).

É bom esclarecer que não há fórmula infantil no mercado capaz de copiar a excelência do leite materno. Acontece que algumas mulheres não podem amamentar. Entre os motivos estão a presença de certas condições, como infecção pelo vírus HIV, ou o uso de quimioterápicos para tratamento de câncer, ou ainda aquelas que simplesmente não conseguem levar o aleitamento adiante. Nesses contextos, as fórmulas infantis, feitas principalmente com leite de vaca, surgem como solução para nutrir os recém-nascidos (SOCIEDADE BRASILEIRA DE PEDIATRIA, 2018).

As fórmulas são diferentes entre si para atender as exigências nutricionais de cada fase do desenvolvimento de um bebê ou necessidades especiais,

e por isso, seu uso deve ser sempre recomendado por um pediatra ou nutricionista. Há diversos tipos de fórmulas, e estas são divididas em:

Para prematuros – esse tipo de fórmula possui uma composição diferenciada para oferecer os nutrientes que um bebê prematuro precisa, além de ser modificado para facilitar a digestão. Geralmente possui mais proteínas, misturas e gorduras bem balanceadas e adição de ácidos graxos específicos, essenciais para o desenvolvimento cerebral, visual e psicomotor. Vale lembrar que muitas vezes esse tipo de fórmula é apenas um complemento, já que os especialistas no geral recomendam que o bebê prematuro seja alimentado com leite materno, recebendo principalmente o colostro (ANVISA, 2011).

Fase 1 – chamadas de fórmulas de partida atendem as necessidades nutricionais de crianças saudáveis até seis meses de idade. A lactose é o principal carboidrato e são acrescidas de amido, sacarose e maltodextrina. O teor proteico é maior que o do leite materno e as gorduras podem ser acrescidas de óleos vegetais com a finalidade de melhorar a digestibilidade. A composição dos ácidos graxos de cadeia longa é modificada para se chegar num ideal para o desenvolvimento do sistema nervoso central. Estas formulações têm também um teor maior de micronutrientes em relação ao leite materno, como ferro e aminoácidos (ANVISA, 2011).

Fase 2 – são as fórmulas para o segundo semestre de vida da criança e o diferencial é um maior teor de ferro, já que a quantidade de proteínas é semelhante aos leites do primeiro semestre (ANVISA, 2011).

Antirrefluxo – esse leite um pouco mais engrossado foi criado exclusivamente para bebês que apresentam regurgitação – o refluxo gastroesofágico. Ele é similar às fórmulas da fase 1 mas, além dos carboidratos habituais, possui amido de arroz ou milho pré gelatinizado que se espessa em contato com a secreção gástrica, minimizando o refluxo (ANVISA, 2011).

Sem lactose – criada para crianças com intolerância a esse carboidrato. É recomendado para bebês que passaram por alguma patologia que teve como sintoma uma diarreia persistente, que acaba por alterar a flora intestinal e diminuir a produção da enzima que digere a lactose, a lactase. Esse acontecimento chamasse intolerância à lactose é passageiro e o bebê pode depois, com a recomendação do pediatra, voltar para o leite normal (ANVISA, 2011).

Hipoalergênicas – fórmula infantil à base de proteína do soro do leite parcialmente hidrolisada, o que confere uma característica hipoalergênica ao leite, sendo recomendada para crianças com histórico familiar de alergia ao leite de vaca (ANVISA, 2011).

À base de soja – podem ser um substituto para crianças com mais de seis meses que são alérgicas a proteína do leite de vaca, com intolerância a lactose ou para famílias que optam por uma alimentação vegetariana. Estas fórmulas são feitas à base de proteína isolada de soja, isentas de lactose e sacarose. Geralmente contém mais vitaminas e minerais e são suplementadas com aminoácidos (ANVISA, 2011).

Diferenciadas – de tempos em tempos existem lançamentos de fórmulas criadas para situações específicas como por exemplo, com mais fibras para crianças com constipação intestinal ou com ingredientes específicos e levemente hidrolisados para bebês com cólicas. Mas apenas um pediatra ou nutricionista pode recomendar seu uso (ANVISA, 2011).

2.2 Radiação

A maior parte da radiação recebida pela população do mundo é proveniente de fontes naturais. As fontes terrestres, elementos radioativos na superfície ou no interior da terra, são responsáveis pela maioria da radiação natural a que o homem está exposto. Outra parte provém de uma infinidade de raios cósmicos que atingem a Terra constantemente, e o restante é devido às fontes artificiais criadas pelo homem, sejam elas para aplicações médicas e industriais, armas nucleares, usinas nucleares, que introduziram vários elementos radioativos artificiais na biosfera (MELCHIADES, 2004).

A Tabela 1 traz as unidades de radiação mais utilizadas atualmente.

Tabela 1. Unidades de radiação

Unidade	Especificação
Becquerel (Bq)	Nome especial da unidade de atividade. Um Becquerel equivale a uma desintegração por segundo
Gray (Gy)	Nome especial da unidade de dose absorvida. Está relacionada com a quantidade de energia da radiação ionizante absorvida pela matéria
Siviert (Sv)	Nome especial da unidade de dose equivalente. Está relacionada ao dano que a radiação causa nos seres humanos

2.3 Radioatividade

A radioatividade pode ser dividida em natural e artificial. A radioatividade natural é um fenômeno natural em que elementos radioativos e isótopos, que se encontram na natureza, são capazes de emitir radiações, como partículas alfa e beta, e radiação gama. Já a radioatividade artificial é um fenômeno artificial cujo nome prediz, em que os elementos não são capazes de emitir radiação naturalmente. Esta ocorre quando certo elemento estável é exposto à uma radiação específica.

Decaimentos radioativos que ocorrem espontaneamente são exemplos de radioatividade natural. Existem três séries radioativas, conhecidas como a série de urânio, a de actínio e a de tório, nomeadas de acordo com o elemento que inicia a série (exceto a série do actínio que começa com um radioisótopo de ^{235}U). Cada elemento da série decai através de núcleos instáveis por meio de emissões radioativas, até que cada uma delas termine em um isótopo estável do elemento chumbo (LOPES, 2018).

2.3.1 Elemento ^{40}K

O Potássio é o sétimo elemento mais comum no solo e possui três isótopos naturais: ^{39}K e ^{41}K ambos estáveis e com abundância natural aproximadamente iguais a 93,3% e 6,7%, respectivamente. Já o ^{40}K , radioativo, possui abundância natural de aproximadamente 0,012%, sua meia-vida é de 1,26 bilhões de anos e sua atividade específica média é de 850 Bq/Kg.

Cerca de vinte e quatro radionuclídeos primordiais de linha gama única, estão identificados na literatura, sendo o ^{40}K mais significativo por estar presente essencialmente em todas as amostras ambientais, e isso se deve ao fato de o Potássio ser encontrado em altos níveis na maioria dos solos.

No corpo humano o ^{40}K comporta-se como um nutriente essencial devido à semelhança com o potássio estável, sendo uniformemente distribuído nos tecidos musculares e sua concentração mantém-se constante devido o equilíbrio homeostático. O corpo de um ser humano de 70 Kg contém aproximadamente 140 g de potássio, conseqüentemente a atividade do ^{40}K correspondente é de 3.700 Bq, sendo responsável por um equivalente de dose anual no corpo humano de 0,17 mSv para adultos e de 0,19 mSv para crianças, e a maior contribuição no cálculo da dose é devido à radiação beta e não a radiação gama emitida (LOPES, 2018).

O potássio 40 (^{40}K) decai para o cálcio 40 (^{40}Ca) via decaimento β^- em 89,3% das vezes, emitindo um elétron cuja energia máxima é de 1,314 MeV. Também há uma pequena possibilidade (0,001%) de ele decair por decaimento β^+ emitindo um pósitron cuja energia máxima é de 1,505 MeV, e o restante, aproximadamente 10,7%, decairão via captura de elétrons, em um estado excitado do argônio ($^{40}_{18}\text{Ar}$), este por sua vez chegará ao estado fundamental emitindo um fóton característico de energia 1460,8 keV (GARCEZ, 2016). O decaimento do $^{40}_{19}\text{K}$ é mostrado na Figura 2.

Meia vida

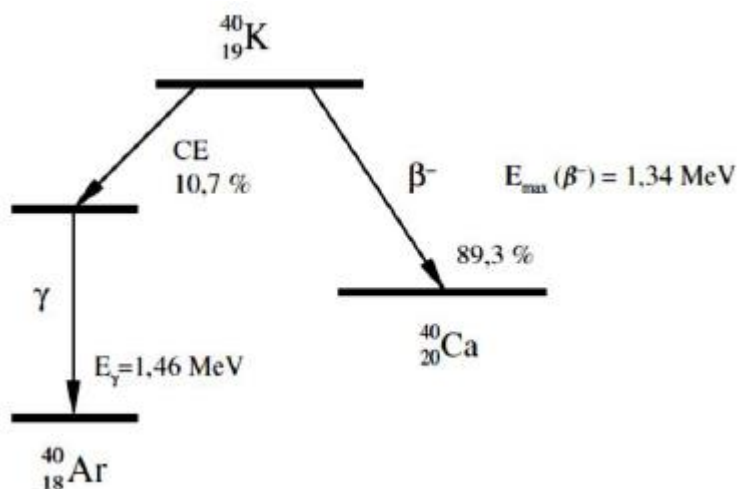


Figura 2. Esquema de decaimento do Potássio-40

2.4 Radionuclídeos nos alimentos

Dentre os radioisótopos naturais que podem entrar na dieta humana, deve-se destacar o Potássio 40. O cálcio, o fósforo e o potássio são os minerais mais abundantes no corpo humano. O potássio é um nutriente essencial para o metabolismo e funcionamento das células, sendo fundamental para manter o equilíbrio dinâmico apresentado pelas membranas, depositando-se principalmente nos músculos. Portanto, toda matéria orgânica apresentará, de alguma forma, uma pequena quantidade de radioatividade (LOPES, 2018).

O isótopo radioativo ^{40}K é o que mais contribui para a dose total pela radioatividade natural interna, cerca de 60 a 70%. Num homem de 70 Kg contém aproximadamente 140 g de potássio distribuído em todos os órgãos do corpo. Dessa quantidade, 0,01652 seriam de ^{40}K , o que corresponde a atividade de 3,7KBq (UNSCEAR, 2000).

Na figura 4 é mostrado o esquema de incorporação dos radionuclídeos (MELCHIADES, 2004).

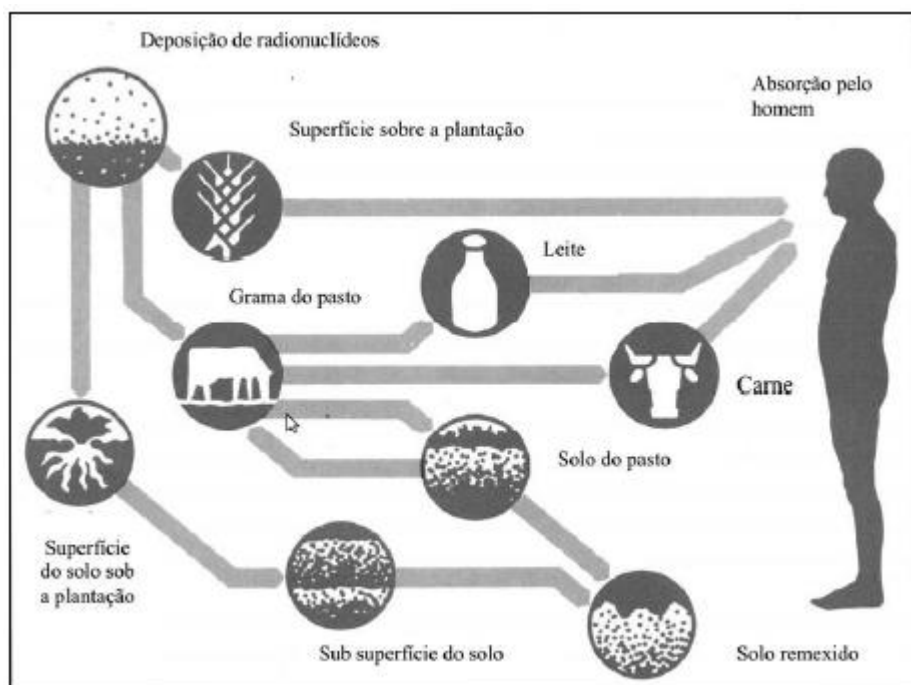


Figura 3. Meios de incorporação dos radionuclídeos pelo homem

2.5 Atividade específica

A taxa de mudanças dos átomos instáveis em um determinado instante é denominada de Atividade. Assim, chamando de $n(t)$ o número de átomos existentes numa amostra, no instante t , a atividade $A(t)$, será expressa por:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

Onde: $A(t)$ é a atividade do radionuclídeo num tempo t [Bq]

A_0 é a atividade inicial do radionuclídeo [Bq]

λ é a constante de tempo [s⁻¹]

2.5.1 Atividade mínima detectável

O cálculo da atividade mínima detectável por unidade de massa de uma amostra, para uma dada linha de emissão gama, com certo nível de confiança definido pelo coeficiente k . A equação utilizada para o cálculo da MDA é expressa da seguinte forma:

$$MDA = \frac{k^2 + \sqrt{8}k\sigma}{P_\gamma t m \varepsilon}$$

Onde: MDA é a energia mínima detectável [Bq/Kg]

k é o coeficiente que determina o nível de confiança e está ligado ao percentual de medidas que estará fora de um intervalo definido a partir de um valor médio

t é o tempo de exposição [s]

m é a massa da amostra [Kg]

P_γ é a probabilidade de emissão de uma certa energia

ε é a eficiência de detecção para determinada energia

σ é o desvio padrão da radiação de fundo da blindagem considerando o porta amostra

Neste trabalho, o percentual foi definido em 5%, logo, 95% das medidas ($k = 1,96$) estarão dentro de $1,96\sigma$ do valor médio.

2.6 Equilíbrio secular

Para a análise de decaimentos em série, é necessário considerar o equilíbrio secular. É um evento na qual a quantidade de um isótopo radioativo permanece constante porque sua taxa de produção é igual a sua taxa de decaimento. E este só pode ocorrer numa cadeia de decaimento radioativo se a meia vida do radionuclídeo filho for muito menor que a meia vida do radionuclídeo pai.

Nessa situação, a taxa de decaimento do nuclídeo pai e, portanto, a taxa de produção do nuclídeo filho, é aproximadamente constante, porque a meia vida do nuclídeo pai é muito longa em comparação com as escalas de tempo consideradas. A quantidade de radionuclídeo filho aumenta até que o número de átomos do pai, decaindo por unidade de tempo, se torne igual ao número produzido por unidade de tempo. Então a quantidade de radionuclídeo filho atinge um valor constante de equilíbrio.

Seja uma cadeia radioativa, cujos subíndices 1 e 2 indicam informações relacionadas ao nuclídeo pai e filho, respectivamente.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

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

Onde: $\frac{dN}{dt}$ é a taxa de variação do número de nuclídeos por unidade de tempo

λ é a constante de decaimento para o radionuclídeo

Considerando agora que $N_1(0) = N_0$ e $N_2(0) = 0$, tem-se que a solução da equação diferencial é dada por:

$$N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

E uma vez que a atividade é dada por $A = \lambda N$, podemos escrever:

$$A_2(t) = A_0 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Ao considerar a meia vida do nuclídeo pai muito maior que a meia vida do nuclídeo filho, a equação torna-se:

$$A_2(t) = A_0(1 - e^{-\lambda_2 t})$$

Por fim, fazendo a aproximação de $t \gg T_{1/2}$ tem-se que:

$$A_2(t) = A_1$$

Para que o equilíbrio secular se estabeleça é necessário ter certeza que nenhum elemento da cadeia de decaimentos seja removido ou escape naturalmente. O período necessário para que um sistema fechado, contendo inicialmente nuclídeos pais de cada série natural de decaimento, atinja 98,5% do equilíbrio é cerca de seis vezes a meia vida do radionuclídeo filho de menor constante de decaimento (LOPES, 2018).

2.7 Espectrometria gama

A espectrometria gama é um dos ramos mais desenvolvidos da Física Nuclear Experimental porque a detecção da radiação gama e a determinação do seu espectro são fundamentais na espectrometria. É uma técnica direta de análise de radionuclídeos e pode ser utilizada para se obter a concentração de atividade destes em diferentes materiais e entre eles água e alimentos.

A técnica permite a determinação dos radionuclídeos emissores de radionuclídeos emissores de radiação gama com fotópicos de energia que podem variar em equipamentos convencionais de 30KeV até 2000KeV. Por ser uma técnica de determinação direta não é necessária a separação química prévia dos radionuclídeos. A técnica utiliza detectores de germânio hiperpuros (HPGe) que possuem boa resolução e possibilitam a determinação de radionuclídeos com fotópicos de energia baixa desde a faixa dos Raios X até alguns MeVs e softwares específicos para a identificação e quantificação dos mesmos.

As vantagens do uso da Espectrometria Gama com detector de germânio hiperpuros são devidas principalmente ao seu tempo de resolução, que é de aproximadamente 10^{-8} s, e a sua linearidade de resposta em uma ampla faixa de energia. É um método que possui boa precisão e sensibilidade para análise de radionuclídeos em amostras de alimentos visando seus limites para o consumo, exportação e importação. A linearidade corresponde à capacidade do método em fornecer resultados diretamente proporcionais do analito em amostras, dentro de uma determinada faixa trabalho. Foi realizada por meio da análise de radionuclídeos contidos em fontes pontuais em toda faixa útil do equipamento.

A espectrometria gama de alta resolução tem sido largamente utilizada na determinação de radionuclídeos em amostras ambientais, técnica não destrutiva que permite a identificação e a determinação da atividade dos emissores gama diretamente das amostras, sem a necessidade de separação química dos elementos, gerando máxima eficiência, obtendo-se uma identificação qualitativa e quantitativa dos radionuclídeos presentes na amostra.

Os principais parâmetros a serem considerados para análise por espectrometria gama para garantir um bom desempenho dos detectores e um aumento da confiabilidade dos resultados são: (1) Eficiência de contagem por energia do fóton, pois a determinação da eficiência de contagem é o problema chave para medidas por espectrometria gama; (2) Boa calibração do sistema de medidas; (3) Boa resolução do sistema por fotópico; (4) Baixo limite de detecção; (5) Um sistema que forneça o cálculo da área líquida do fotópico; (6) Um arranjo experimental que permita validar os resultados experimentais com a utilização de padrões certificados; (7) Minimização da auto absorção pelo uso de padrões com densidades semelhantes às amostras analisadas e padronização das massas das amostras analisadas, dos padrões e do tempo de aquisição (JÚNIOR, 2009).

2.8 Detectores semicondutores

O detector de radiação é um dispositivo que ao entrar em contato com a radiação é capaz de indicar sua presença (TAUHATA, 2003). Normalmente é constituído de um elemento ou material sensível à radiação e um sistema que transforma esses efeitos num valor relacionado a uma grandeza de medição dessa radiação. Nem todas as radiações que incidem no detector fornecem um sinal de saída, e vários fatores influenciam nisso.

A detecção da radiação ionizante é o resultado da interação desta com algum meio sensível a esta radiação, de onde seja possível extrair informações. Existem vários materiais que podem ser utilizados para a detecção de radiação ionizante, sendo os detectores mais utilizados aqueles que utilizam regiões sensíveis à base de gás, os cintiladores, os semicondutores e os termoluminescentes. Os detectores semicondutores funcionam a partir do princípio da excitação de elétrons, que passam das bandas de valência para a banda de condução dando origem ao processo de detecção (LOPES, 2018).

Alguns detectores semicondutores são resfriados a temperatura criogênica porque à temperatura ambiente estes materiais possuem seus elétrons da banda de valência com quantidade de energia capaz de migrar para a banda de condução criando a chamada corrente de fuga e interferindo no resultado esperado (ruído), mesmo sem receber energia proveniente da interação com alguma forma de radiação ionizante (LOPES, 2018).

As vantagens do uso de detectores semicondutores são: (1) Alta densidade do meio ionizado, implica uma considerável eficiência de detecção por unidade de volume efetivo do detector. (2) A energia necessária para produzir um par de portadores de cargas é 10 vezes menor que nos gases, e 100 num cintilador. (3) Menor flutuação estatística, melhor resolução (4) A mobilidade dos elétrons e buracos é elevada e o volume efetivo do meio detector é reduzido, isto se traduz um tempo de resolução de cargas da ordem de nano segundos, assim é elevada a resolução no tempo.

2.8.1 Blindagem

A espectrometria de raios gama de amostras ambientais de baixa atividade normalmente se depara com o problema de maximizar a taxa de contagem no fotópico de interesse em relação à contagem de fundo, além da necessidade da utilização de detectores que discriminam raios gama de energias próximas. A radiação de fundo (Background, em inglês) do sistema tem influência determinante na qualidade do espectro adquirido pela espectrometria de raios gama, e por isso, o sistema deve apresentar a radiação de fundo tão baixa quanto for possível atingir. Então para analisar amostras ambientais de baixa atividade é essencial realizar uma adequada blindagem do detector e da amostra para reduzir a radiação de fundo do ambiente no espectro da amostra (SCHEIBEL, 2003).

Existem blindagens padrões para o uso em espectrometria de raios gama de amostras ambientais de baixa atividade. A espessura do material utilizado na blindagem depende da atenuação que se deseja para um dado raio gama. Essas blindagens são fabricadas com chumbo, mas outros materiais de número atômico menor também fazem parte da blindagem para absorver os raios X derivados da interação dos raios gama com o chumbo, diminuindo a sua incidência no detector. A blindagem ideal utiliza chumbo envelhecido, denominado assim por ser isento de impurezas radioativas, principalmente aquelas provenientes de precipitações de testes nucleares (LOPES, 2018).

Para blindagens com alto fator de atenuação, principalmente às radiações do meio ambiente, devem-se usar três camadas metálicas na sua composição. A primeira camada, a mais externa, é constituída de chumbo; a segunda camada é de cádmio ou estanho e sua função é atenuar as radiações do chumbo que emite raios X característicos com energias entre 22 e 27 KeV; a terceira e mais interna é feita de cobre ou alumínio cuja função dessa camada é atenuar os raios X característicos emitidos pela fluorescência do chumbo, com energias entre 72 e 82 KeV.

2.9 Efeitos biológicos da radiação

O efeito biológico constitui a resposta natural de um organismo, ou parte dele, a um agente agressor ou modificador. O surgimento destes efeitos não significa uma doença. Quando a quantidade de efeitos biológicos é pequena, o organismo pode recuperar, sem que a pessoa perceba. Por exemplo, numa exposição à radiação X ou gama, pode ocorrer uma redução de leucócitos, hemácias e plaquetas e, após algumas semanas, tudo retornar aos níveis anteriores de contagem destes elementos no sangue. Isto significa que, houve a irradiação, ocorreram efeitos biológicos sob a forma de morte celular e, posteriormente, os elementos figurados do sangue foram repostos por efeitos biológicos reparadores, operados pelo tecido hematopoiético.

Se a substância alterada possui um papel crítico para o funcionamento da célula, pode resultar na alteração ou na morte da célula. Em muitos órgãos e tecidos o processo de perda e reposição celular, faz parte de sua operação normal. Quando a mudança tem caráter deletério, ela significa um dano. Quando a quantidade e frequência dos efeitos biológicos começa a desequilibrar o organismo provoca vários sintomas, mau funcionamento de órgãos, doenças. Esta é a fase orgânica em que efetivamente ocorre incapacidade de o organismo recuperar ou reparar os danos induzidos.

A ação da radiação sobre o material biológico é dada de duas maneiras, direta e indireta. Na ação direta, a radiação incidente provoca lesão no DNA que posteriormente causará danos para o sistema com ocorrência de 20%. Já na ação indireta, a radiação incidente provoca danos em moléculas biológicas e então estas biomoléculas danificam o DNA onde a ocorrência é de 80%.

A exposição interna da população aos radionuclídeos pode se dar de forma direta por meio da inalação, ou indiretamente por meio da ingestão de água e alimentos contaminados. Isótopos radioativos dos elementos pesados, como por exemplo ^{226}Ra , por sua semelhança química com o carbono se fixará preferencialmente nos ossos. Já o ^{40}K localiza-se preferencialmente nos músculos numa proporção entre 0,2 e 0,3%. Sendo assim, a radioatividade no corpo humano estará relacionada com a região e a dieta alimentícia (LOPES, 2018).

Outra via de entrada de material radioativo é a respiração. O ar contém gases e pode conter pó radioativo. Este pó radioativo se deposita ao longo do aparelho respiratório sendo carregado por mucosas até o aparelho digestivo de onde é levado até a circulação.

Na Tabela 2 é mostrada uma estimativa das quantidades de materiais radioativos presentes no corpo humano.

Tabela 2. Elementos radioativos presentes no corpo humano

Radionuclídeo	Massa total (g)	Atividade total (Bq)	Quantidade diária ingerida ou inalada pelo homem (g)
Urânio	90E-6	1,1	1,9E-6
Tório	30E-6	0,11	3E-6
Potássio-40	17E-3	4400	0,39E-3
Rádio	31E-12	1,1	2,3E-12
Carbono-14	95E-6	1500	1,8E-6
Trício	0,06E-12	23	0,003E-12
Polônio	0,2E-12	37	0,6E-8

2.10 Dose efetiva

As doses internas de radiação são significativas e contribuem em cerca de 80% da dose total recebida pelo homem devido à radioatividade natural. O principal radioisótopo responsável pela dose interna é o ^{40}K , contribuindo com cerca de 70% da dose total (GARCÊS, 2016).

Em geral, dois terços da dose equivalente efetiva que as pessoas recebem de fontes naturais provém de substâncias radioativas presentes no ar que respiram e nos alimentos e na água que ingerem (MELCHIADES, 2004).

Os elementos incorporados via alimentos são prontamente absorvidos pelo trato gastrointestinal. Essa incorporação resultará em dose efetiva comprometida.

O cálculo é feito levando em conta uma única ingestão, mas pode ser aplicado para ingestões crônicas. Nesse caso, para calcular a dose efetiva comprometida em 50 anos há de se obter a atividade incorporada a cada ano a partir

do consumo de cada alimento e da atividade específica média. Disso obtêm-se a contribuição à dose efetiva interna anual que somada durante 50 anos chega-se à dose efetiva comprometida devido a cada radionuclídeo ingerido cronicamente (UMISEDO, 2007). Mas neste trabalho, o valor de interesse corresponde a 2 anos.

$$D = A \times C \times f \quad [Sv/ano]$$

Onde: D é a dose efetiva [Sv/ano]

A é a atividade específica [Bq/Kg]

C é o consumo anual médio [Kg/ano]

f é o fator de correção

É possível calcular a dose efetiva utilizando os valores de referência da UNSCEAR-2000 e do IBGE, ambos apresentados a seguir pela Tabela 3.

Tabela 3. Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da dose efetiva

Tipo de amostra	Consumo (Kg/ano)	f(⁴⁰ K)
0 a 6 meses	22,4	6,2E-8
6 a 24 meses	15,0	4,2E-8

2.11 Risco de câncer

O risco à população é estimado assumindo uma relação dose-efeito linear sem limiar conforme a prática ICRP. Para doses baixas, fator de risco de câncer fatal é de 0,05 Sv⁻¹ (ICRP 1990). O fator de risco indica a probabilidade de uma pessoa morrer de câncer aumentar em 5% para uma dose total de 1Sv recebida durante a vida. Para estimar o risco de câncer para uma pessoa adulta usando a seguinte relação (GHANDI, 2014):

$$R_c = C_d \times RF \quad [Sv^{-1}]$$

Onde: R_c é o risco de câncer [Sv]

RF é o fator de risco [Sv⁻¹]

C_d é a dose efetiva de vida útil

Para efeitos estocásticos, a ICRP 60 usa valores para o fator de risco de 0,05 para o público em geral.

A dose efetiva útil é uma medida da dose efetiva total recebida durante uma vida útil média de 2 anos após a ingestão de um radionuclídeo, e este pode ser calculado através da seguinte fórmula (UNSCEAR, 2000):

$$C_d = D \times 2 \quad [Sv]$$

Onde: D é a dose efetiva total para um indivíduo [Sv]

Capítulo 3 Materiais e métodos

A pesquisa descritiva foi conduzida no município do Rio de Janeiro e para obtenção das amostras foi inicialmente realizado um levantamento das fórmulas infantis existentes no comércio varejista. Foram encontrados dentre estes 8 produtos, distribuídos em quatro marcas comerciais mais consumidas.



Figura 4. Amostras de fórmula infantil utilizadas na pesquisa

Tabela 4. Características das amostras analisadas

Amostra	Densidade (Kg/m ³)	Local de fabricação
1	459,6	Brasil
2	502,9	Brasil
3	588,6	Holanda
4	481,7	Brasil
5	449,6	Brasil
6	516,1	Brasil
7	548,2	Holanda
8	528,8	Brasil

3.1 Preparação das amostras

Oito amostras de fórmula infantil acondicionadas em frascos porta amostra de 400 mililitros, dispostas em repouso por 40 dias até que as devidas amostras atingissem o equilíbrio secular, para que então, a análise fosse iniciada. Geometria previamente calibrada quanto a eficiência no Software.



Figura 5. Amostras devidamente lacradas e identificadas

3.2 Detector semicondutor Germânio Hiperpuro

Para obter os espectros de emissão gama foi utilizado um detector de Germânio hiperpuro (HPGe) vertical da Canberra, modelo GC3020, com eficiência relativa de 30%. Este detector tem resolução em energia especificada pelo fabricante de 1,808 KeV para o pico de 1332 KeV dada pelo ^{60}Co .

A blindagem utilizada é cujo modelo é o 747, com 10 cm de chumbo, 1mm de estanho e 1,6mm de cobre. Essa blindagem ainda é recoberta externamente por 9,5mm de aço com baixa percentagem de carbono.

O sistema multicanal utilizado foi um DAS 1000 (Digital Spectrum Analyser, em inglês) de 8192 canais. A voltagem utilizada para criar área de depleção máxima foi de 4500 V.

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, eficiência.

A figura 6 a seguir mostra o sistema de aquisição de dados utilizados neste trabalho.

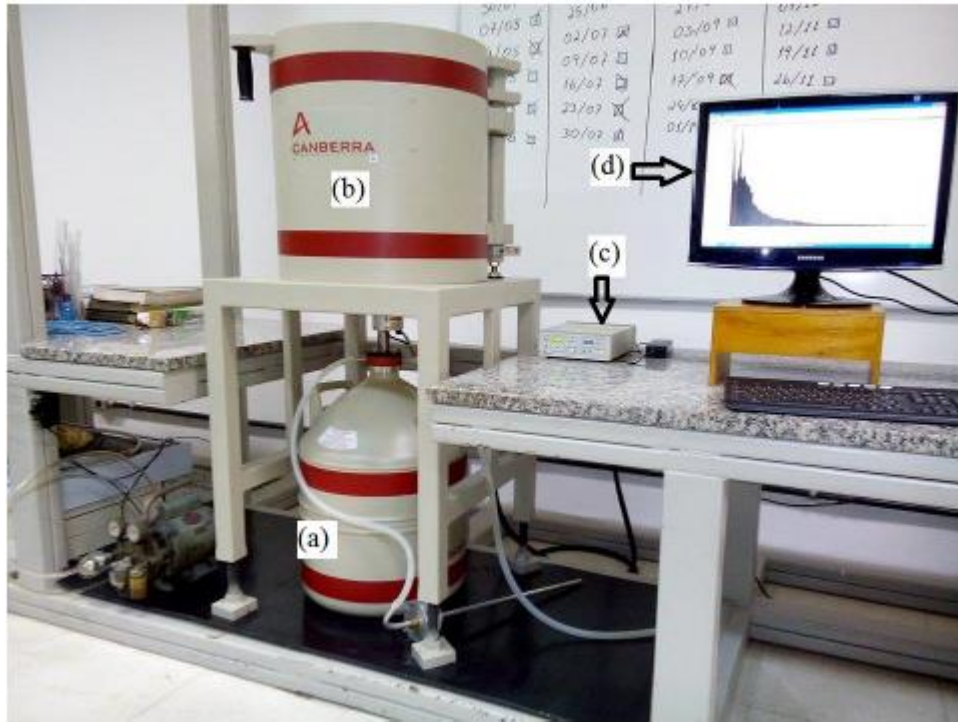


Figura 6. Espectrômetro utilizado e seus componentes e acessórios: (a) Observa-se o dewar, (b) Blindagem do detector, (c) Multicanal DAS 1000, (d) Espectro da amostra

3.3 Energia de calibração do detector

A calibração em energia foi realizada com o auxílio do Programa Analysis do Genie 2000, responsável pelo controle e armazenamento dos dados adquiridos pelo DAS 1000, que faz um ajuste linear quando duas linhas de energia são definidas e um ajuste quadrático se três ou mais linhas de energia são definidas.

Esta calibração em energia do sistema foi feita utilizando fontes radioativas certificadas, totalizando um número de 16 pontos experimentais que correspondem aos picos energéticos dos radionuclídeos dispostos na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5. Energias utilizadas na calibração de acordo com o radionuclídeo analisado

Radionuclídeo	Energia (MeV)
^{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	511,0 - 1274,5
^{60}Co	1173,2 - 1332,5

3.4 Eficiência da detecção

A eficiência de detecção para cada energia foi feita utilizando o pacote de programas LabSOCS (Laboratory Sourceless Calibration Software, em inglês) da Canberra. O LabSOCS é um programa computacional que realiza calibrações matemáticas de eficiência, sem necessidade de fontes radioativas. Isso permite uma calibração rápida e precisa de várias geometrias sem necessidade de fontes de referência. Este software inclui um detector caracterizado e algoritmos computacionais para realizar a correção de auto-atenuação de energias de fótons na amostra, paredes de suporte de amostra e o próprio detector (LOPES, 2018).

Para tal, foi necessário modelar a geometria utilizada em ambiente computacional inserindo as características físicas, químicas e geométricas do porta amostra e da amostra analisada. Após isso, o software divide toda a região fonte em 1024 voxels, e de forma aleatória escolhe um ponto em cada voxel e calcula a eficiência de detecção a partir dos valores encontrados. Depois, o software dobra este número e refaz o processo para comparar os valores considerando os critérios de convergência. Caso estes valores não converjam, o número de voxels é dobrado novamente até obter a convergência satisfatória. A figura 7 mostra a visualização gráfica do Geometry Composer, que faz parte do pacote LabSOCS.

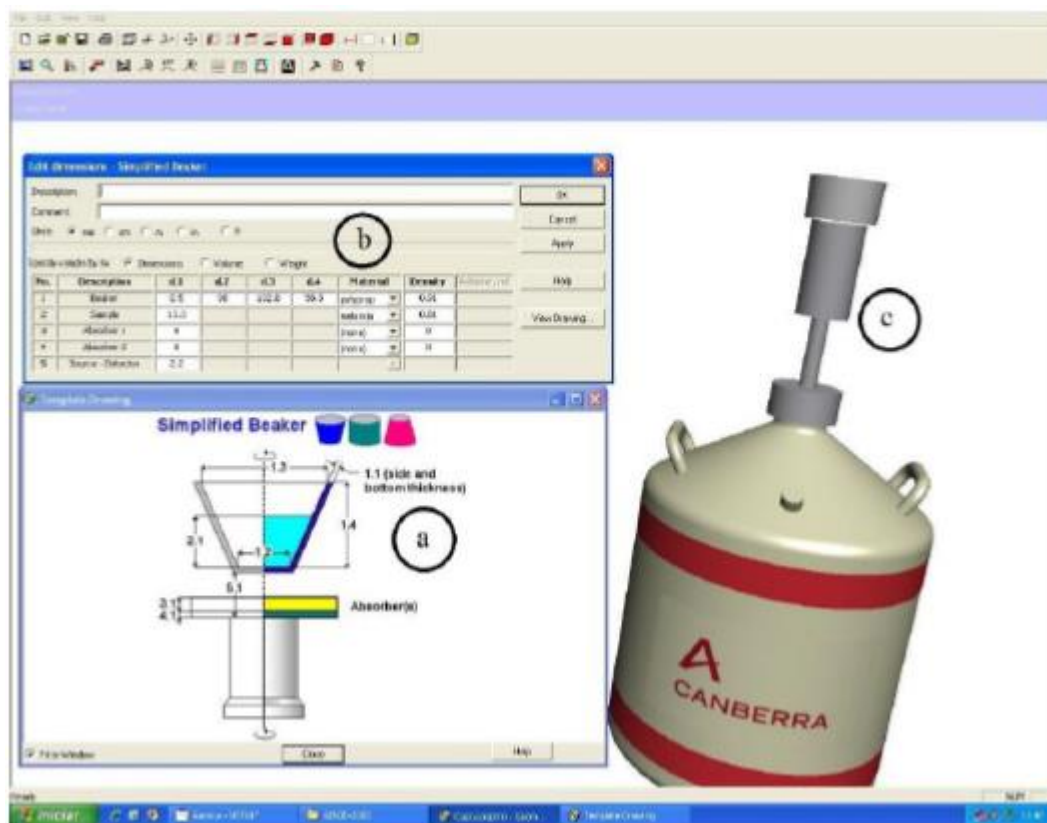


Figura 7. Visualização gráfica do Geometry Composer. (a) Gabarito da geometria a ser modelada, (b) Matriz da caixa de diálogo onde são inseridas as dimensões do porta amostra (c) Resultado visual das inserções

Capítulo 4 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho.

4.1 Cálculo da atividade específica

A partir do espectro de energia como o mostrado na Figura 8 e pelo software Genie 2000, foi possível determinar os valores de MDA e da concentração de atividade específica das oito amostras analisadas.

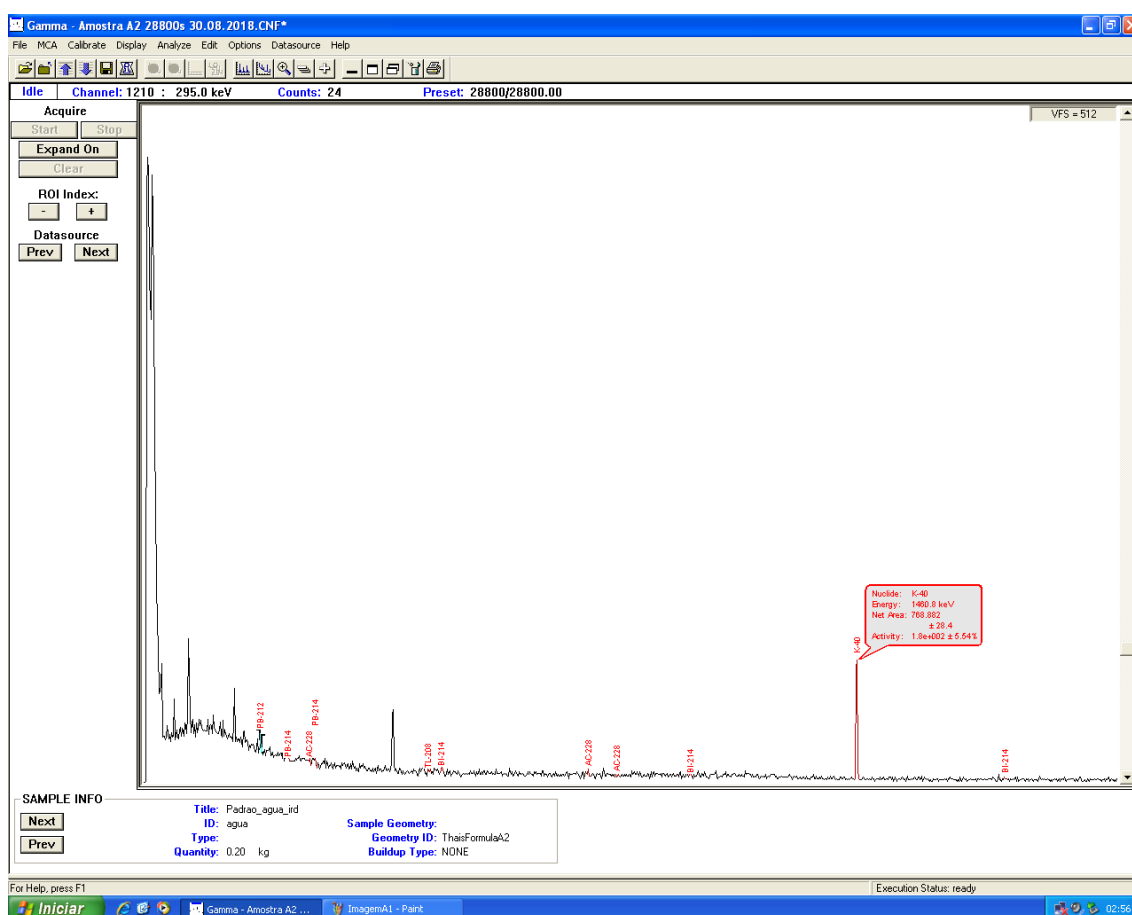


Figura 8. Espectro de energia da amostra 2

Sabe-se que quando o valor encontrado para a atividade de determinada amostra for superior ao calculado para o MDA desta mesma amostra, pode-se afirmar que há a presença do radionuclídeo estudado nesta amostra. Estes valores são apresentados nas Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente.

Tabela 6. MDA das amostras analisadas

MDA (Bq/Kg)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
⁴⁰ K	12,06	12,63	14,68	13,42	14,68	12,98	11,34	13,93
²²⁶ Ra	6,29	6,59	7,68	6,92	7,65	6,78	5,91	7,28
²²⁸ Ra	3,04	3,19	3,71	3,35	3,70	3,28	2,86	4,59
²³² Th	1,44	1,66	1,79	1,59	1,74	1,57	1,50	1,68

Tabela 7. Atividade específicas das amostras analisadas

Atividade (Bq/Kg)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
⁴⁰ K	206,93	175,43	194,87	174,21	210,18	201,65	212,08	242,51
²²⁶ Ra	-3,40	-2,85	-4,65	-4,64	-7,12	-6,31	-5,50	-2,52
²²⁸ Ra	1,62	0,00	2,38	1,36	0,00	0,77	0,37	3,52
²³² Th	-0,14	-0,26	-1,36	-0,95	-0,60	1,41	1,37	0,37

Tabela 8. Valores comparativos de atividade específica em Bq/Kg

Origem da pesquisa	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²³² Th
Presente Trabalho	202,24	-4,62	1,23	-0,81
Malasya	99,10	3,05	-	2,55
Melquiades	489,00	-	-	3,60

4.2 Cálculo da dose efetiva

A partir dos valores determinados para a atividade específica, vistos na Tabela 7, é possível calcular a dose efetiva utilizando os valores de referência apresentados anteriormente pela Tabela 3. O resultado pode ser visto a seguir, na Tabela 9.

Tabela 9. Valores de dose efetiva para as amostras em análise

Dose (μ Sv/ano)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
⁴⁰ K	287,38	243,64	270,64	241,94	132,41	127,04	133,61	152,78
²²⁶ Ra	-	-	-	-	-	-	-	-
²²⁸ Ra	-	-	-	-	-	-	-	-
²³² Th	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 10. Valores comparativos de dose efetiva comprometida

Origem da pesquisa	Dose média correspondente ao ^{40}K ($\mu\text{Sv/ano}$)
Presente trabalho	198,25
Tese Malasya	125,00

4.3 Cálculo do risco de câncer

Os valores de referência da UNSCEAR-2000 para dose efetiva anual devido a ingestão dos radionuclídeos de interesse neste trabalho são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Valores de referência para dose efetiva comprometida (Modificada – UNSCEAR, 2000)

Radionuclídeo	Valor de referência
^{40}K	$165 \mu\text{Sv} \times \text{ano}^{-1}$
Radionuclídeos em geral	$290 \mu\text{Sv} \times \text{ano}^{-1}$

A partir destes valores, podemos calcular a dose efetiva de vida útil (c_d) utilizando como vida média o valor de 2 anos, e estes valores são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores de dose efetiva de vida útil

Dose (μSv)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
^{40}K	574,76	487,28	541,28	483,88	264,82	254,08	267,22	305,56
^{226}Ra	-	-	-	-	-	-	-	-
^{228}Ra	-	-	-	-	-	-	-	-
^{232}Th	-	-	-	-	-	-	-	-

Com os valores de c_d , pode-se calcular o risco de câncer (R_c) utilizando como referência 0.05 Sv^{-1} o fator de risco necessário ao cálculo.

Tabela 13. Valores de risco de câncer para lactantes entre 0 e 6 meses

Amostra	A1	A2	A3	A4
Risco (%)	0,0287	0,0244	0,0271	0,0242

Tabela 14. Valores de risco de câncer para lactantes entre 6 e 24 meses

Amostra	A5	A6	A7	A8
Risco (%)	0,0134	0,0127	0,0134	0,0153

Tabela 15. Valores de risco de câncer para lactantes entre 0 e 24 meses

Amostra	A1+A5	A2+A6	A3+A7	A4+A8
Risco (%)	0,0421	0,0371	0,0405	0,0395

Capítulo 5 Conclusões

Neste trabalho foi feito um estudo das concentrações específicas do ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{232}Th em amostras de fórmulas infantis através da espectrometria gama. Foram analisadas 8 amostras de 4 marcas diferentes e então foi estimada a dose efetiva e o risco de câncer para essas amostras.

A concentração de atividade de ^{40}K foi medida em todas as amostras e estes valores variaram entre 174,21Bq/Kg e 242,51Bq/Kg. Já para o ^{226}Ra estes valores tiveram um máximo de -2,52Bq/Kg e um mínimo de -7,12Bq/Kg. Para o ^{228}Ra os valores variaram entre 0,00Bq/Kg e 4,59Bq/Kg. E por fim, o ^{232}Th teve uma variação entre -1,36Bq/Kg e 1,41Bq/Kg.

Na análise e comparação da dose efetiva anual deste trabalho com a literatura revelaram valores diferentes entre si e isso é importante uma vez que dependendo da concentração do radionuclídeo incorporado pela fórmula pode revelar alguma anomalia na região em qual foi fabricado. Estes valores tiveram uma variação entre $287,38 \mu\text{Sv} \times \text{ano}^{-1}$ e $127,04 \mu\text{Sv} \times \text{ano}^{-1}$, e todos estes valores se encontram abaixo dos valores estipulados pela USCEAR ($290 \mu\text{Sv} \times \text{ano}^{-1}$) e do limite total imposto pela ICRP ($1 \text{mSv} \times \text{ano}^{-1}$).

O único radionuclídeo que contribui para a dose efetiva neste trabalho foi o ^{40}K , com 100% do total. Mas é sabido que o potássio é uniformemente distribuído no corpo, e sua concentração está sob controle homeostático, não representando então um risco para a saúde humana. E não se pode dizer o mesmo dos outros radionuclídeos estudados aqui, cujo é alocado na estrutura óssea.

O risco de câncer médio calculado neste trabalho ao longo de um ano foi estimado em $1,99\text{E}-4/\text{ano}$. Pode-se inferir então que a probabilidade de aumento do risco de câncer à dieta é de apenas 0,0199%. Este valor é muito pequeno, e portanto, é conclusivo que este não apresenta risco significativo quanto a ingestão do produto.

O presente trabalho foi utilizado para acrescentar dados à literatura, já que é o primeiro no Brasil à realizar estimativas do risco de câncer a partir da ingestão de fórmulas infantis consumidas por crianças brasileiras.

Referências bibliográficas

ACCIOLY, E.; SAUNDERS, C.; LACERDA, E.M.A. **Nutrição em Obstetrícia e Pediatria**. Rio de Janeiro: Cultura Médica, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. RDC nº 43, de 19 de setembro de 2011. **Dispõe sobre o regulamento técnico para fórmulas infantis para lactentes**. Disponível em:

<http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/d8361b804aaa96d79ef6de4600696f00/Resolucao_RDC_n_43_de_19_de_setembro_de_2011.pdf?MOD=AJPERES>.

Acessado em: 01/10/2018

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. RDC nº 44, de 19 de setembro de 2011. **Dispõe sobre o regulamento técnico para fórmulas infantis de seguimento para lactentes e crianças de primeira infância**. Disponível em:

<http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/b11b30804aaa974f9effde4600696f00/Resolucao_RDC_n_44_de_19_de_setembro_de_2011.pdf?MOD=AJPERES>.

Acessado em: 01/10/2019

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. RDC nº 45, de 19 de setembro de 2011. **Dispõe sobre o regulamento técnico para fórmulas infantis para lactentes destinadas a necessidades dietoterápicas específicas e fórmulas infantis de seguimento para lactentes e crianças de primeira infância destinadas a necessidades dietoterápicas específicas**. Disponível em:

<http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/95e50b004aaa97b99f08df4600696f00/Resolucao_RDC_n_45_de_19_de_setembro_de_2011.pdf?MOD=AJPERES>.

Acessado em: 01/10/2019

GURMINI, J.; VIEIRA, M.C. Fórmulas alimentares no primeiro ano de vida. **Jornal Paranaense de Pediatria**. Disponível em:

<<http://www.spp.org.br/Jornal/JPed03-02.pdf>>.

Acessado em: 01/10/2018

LOPEZ, F.A., CAMPOS JR, D. **Tratado de pediatria**. Sociedade Brasileira de **Pediatria**. Editora Manole. 1ª edição.

MELQUÍADES, F.L., APPOLONI, C.R. **Radioatividade natural em amostras alimentares**. Cad. Brás. Ens. Fís. 2004.

LOPES, M. José. **Dose efetiva comprometida devida aos radionuclídeos 40K, 226Ra, 228Ra e 228Th contidos nos alimentos da dieta da população do estado do Rio de Janeiro**. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, 2018.

GARCÊZ, R. W. D. **Determinação das atividades específicas do 226Ra, 228Ra e 40K em amostras de fertilizantes minerais**. Dissertação de M. Sc. PEN/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

KHANDAKER, Uddin Mayeen. **Measurement of Natural and Artificial Radioactivity in Infant Powdered Milk and Estimation of the Corresponding Annual Effective Dose.** Department of Physics, Faculty of Science, University of Malasya, 2015.

TAUHATA, L., SALATI, I., PRINZIO, R.D., PRINZIO, A. R.D. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD/CENEN, 10ª revisão, 2014.

UNSCEAR - **United Nations Scientific Committee on the Effects Atomic Radiation.** Sources and effects of ionizing radiation. Vienna, 2000.

SCHEIBEL, V; APPOLONI, C. R. **Radioactive trace measurements of some exported foods from the south of Brazil.** J Food Comp Anal, 2007.