

# CÁLCULO DE DOSE DEVIDO A INGESTÃO DE $^{40}\text{K}$ EM AMOSTRAS DE FEIJÃO UTILIZANDO ESPECTROMETRIA E MCNP.

R W D Garcêz<sup>1</sup>, J M Lopes<sup>1</sup>, A M Domingues<sup>2</sup>, A X Silva<sup>1</sup>, M A F Lima<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro – PEN / COPPE, Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21941-914 - Rio de Janeiro, RJ;

<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense – Instituto de Física, Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº, Campus da Praia Vermelha, 24210-346 – Centro, Niterói, RJ;

<sup>3</sup> Universidade Federal Fluminense – Instituto de Biologia, Rua Mario Santos Braga, s/nº, Campus do Valonguinho, 24020-141 – Centro, Niterói, RJ.

E-mail: marqueslopez@yahoo.com.br

**Resumo:** Uma metodologia baseada na espectrometria gama e no uso de fantasmas em voxel para o cálculo de dose devido à ingestão de  $^{40}\text{K}$  contida em amostras de feijão é apresentada neste trabalho. Para quantificar a atividade do radionuclídeo, um detector HPGe foi utilizado e os dados inseridos no arquivo de entrada do código MCNP. O maior valor encontrado de dose equivalente foi de  $7,83 \mu\text{Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$  no estômago para o feijão branco, cuja atividade de  $452,4 \text{ Bq}\cdot\text{Kg}^{-1}$  foi a maior entre as cinco analisadas. A ferramenta mostrou-se adequada quando se deseja calcular a dose em órgãos devido à ingestão de alimentos.

**Palavras-chave:** HPGe; MCNP; Fantasmas em Voxel; Dose Equivalente.

**Abstract:** A method based on gamma spectroscopy and on the use of voxel phantoms to calculate dose due to ingestion of  $^{40}\text{K}$  contained in bean samples are presented in this work. To quantify the activity of radionuclide, HPGe detector was used and the data entered in the input file of MCNP code. The highest value of equivalent dose was  $7.83 \mu\text{Sv}\cdot\text{y}^{-1}$  in the stomach for white beans, whose activity  $452.4 \text{ Bq}\cdot\text{Kg}^{-1}$  was the highest of the five analyzed. The tool proved to be appropriate when you want to calculate the dose in organs due to ingestion of food.

**Keywords:** MCNPX, Voxel Phantoms, Natural Radioactivity, Equivalent dose.

## 1. INTRODUÇÃO

O ser humano está diariamente exposto às radiações ionizantes. Na superfície terrestre, a exposição se dá principalmente devido aos

radionuclídeos naturais provenientes do decaimento radioativo das séries do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , somando um total de 80% da dose total recebida pelo indivíduo.

1º Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes, Rio de Janeiro/RJ, novembro de 2014

Dentre os elementos naturalmente radioativos podemos destacar o  $^{40}\text{K}$ . Sua via de acesso às plantas se dá por meio da absorção de elementos minerais essenciais para seu desenvolvimento, como  $\text{K}_2\text{O}$ , que é um macronutriente essencial de todo tecido celular e está presente no solo. Desde que se percebeu a importância da radioatividade natural na dose recebida pela população mundial, avaliações dos níveis de radiação gama oriundas de fontes naturais tem ganhado particular importância. Entre as ferramentas disponíveis para esta análise, a espectrometria gama é uma técnica direta de análise de radionuclídeos e pode ser utilizada para obter a atividade de elementos radioativos nos mais diferentes tipos de amostras, entre elas os alimentos. A técnica aqui apresentada utiliza um detector de germânio hiperpuro (HPGe) capaz de determinar com boa resolução fotopicos de energias e com softwares apropriados quantificar as atividades dos emissores gama (Rosa et al, 2013).

Por outro lado, os modelos antropomórficos são incorporados a códigos computacionais para simular e calcular a dose em órgãos e tecidos do corpo humano em consequência à exposição desses à radiação ionizante. Esses podem representar a anatomia do corpo humano, com informações sobre a densidade, composição química, forma, tamanho e localização dos órgãos. Os simuladores mais realistas são obtidos a partir da manipulação de imagens internas do corpo humano. Fantomas em voxel (*Volume piXEL*) provêm de uma sequência de imagens digitais de pessoas reais que são superpostas por tomografia computadorizada ou ressonância magnética, que mostram áreas de seção, vistas de topo, ao longo do corpo do indivíduo a ser analisado (ICRP 110, 2009). Os fantomas em voxels são a representação real do corpo humano e sua estrutura permite determinar a energia depositada devida aos radionuclídeos presentes nos alimentos quando ingeridos, através do método de Monte Carlo.

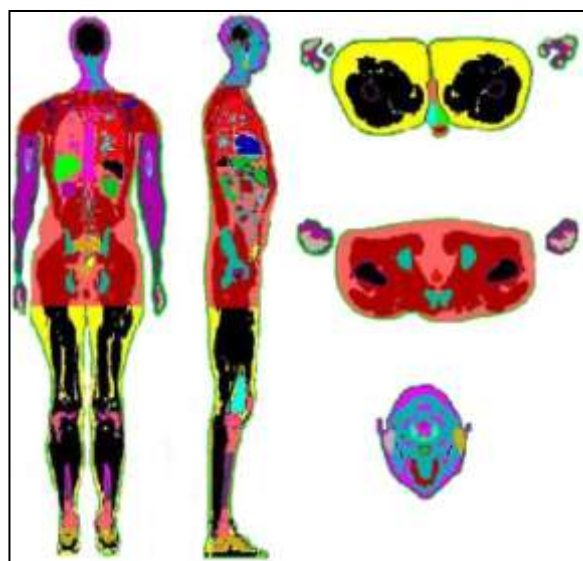


Figura 1. Fantoma masculino REX observado nos planos coronal, sagital e axial.

Os modelos em Voxel recomendados pela ICRP, na publicação nº 110 (ICRP 110, 2009) utilizado neste estudo é o fantoma masculino (REX), que representa um adulto padrão. A figura 1 apresenta as imagens nos planos coronal, sagital e axial do fantoma REX.

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar um estudo do nível de concentração de  $^{40}\text{K}$  presente em cinco diferentes tipos de feijão dispostos no comércio varejista do Estado do Rio de Janeiro. Posteriormente, utilizando modelagem computacional e fantomas em voxel, estimar a dose de radiações decorrente de  $^{40}\text{K}$  que o indivíduo está submetido devido apenas à ingestão destes tipos de feijão.

## 2. METODOLOGIA

As amostras utilizadas foram coletadas no comércio varejista do Estado do Rio de Janeiro. Depois de limpas e secas, as amostras foram trituradas, peneiradas em uma tela de 16 mesh e, depois de homogeneizada, acondicionadas em béqueres tipo marinelli com volume máximo de 1

litro. A densidade foi aferida utilizando uma balança da marca Gehaka modelo BG 4000 com resolução de centésimos de gramas. Para o levantamento do espectro de energia da radiação gama foi utilizado um detector de Germânio Hiper-Puro (HPGe) da marca Canberra modelo 10487 com blindagem de 11 cm de espessura e eficiência de 30%. O *software* Genie2K foi utilizado para o cálculo de eficiência de detecção a partir da inserção das características físicas e químicas do marinelli. O tempo de contagem utilizado para o levantamento do espectro de fundo e da atividade foi de 8 horas. A figura 2 mostra os aparatos utilizados para o levantamento dos níveis de  $^{40}\text{K}$  nas amostras de feijão.

A calibração em energia do sistema foi feita utilizando fontes radioativas, totalizando um número de cinco pontos experimentais correspondendo aos picos de  $^{137}\text{Cs}$  (0.6617 MeV),  $^{60}\text{Co}$  (1.17 e 1.33 MeV) e  $^{152}\text{Eu}$  (0.1218 e 0.3443 MeV).



Figura 2. Aparatos experimentais utilizados para cálculo dos níveis de  $^{40}\text{K}$  em amostras de feijão. Em (a) o detector HPGe. Em (b) tem-se detalhes da balança e do béquer tipo marinelli utilizados.

Depois de quantificado a atividade de  $^{40}\text{K}$  nas amostras de feijão, estes dados foram inseridos no arquivo de entrada do código MCNP. Uma idealização do bolo alimentar foi inserida no estômago do fantoma masculino Rex (ICRP 110,

2009) como sendo uma esfera de 1,5 cm de raio. A figura 3 mostra a localização do bolo alimentar (esfera) em três seções retas. Foram quantificadas as doses em alguns órgãos radiosensíveis, que se localizam próximo ao estômago. Todas as simulações foram feitas no Laboratório de Neutronografia em Tempo Real (LNRTR) da COPPE/UFRJ utilizando um Intel (R) Core (TM) i7-4770K com 3.5 GHz e 64 Bits.

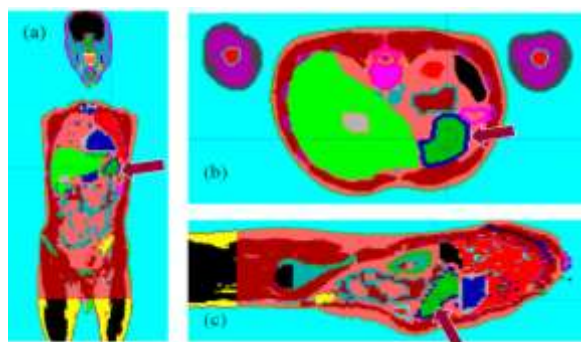


Figura 3. As setas indicam a localização da esfera que idealiza o bolo alimentar mostrada em três diferentes seções: (a) Frontal, (b) superior e (c) lateral.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram escolhidas cinco diferentes tipos de feijão, de acordo com a facilidade de aquisição no comércio varejista do Rio de Janeiro considerando o *ranking* de consumo no Brasil: preto (36%), carioca (48%), branco, vermelho e fradinho (Fernandes, 2010). Depois de trituradas e peneiradas as amostras foram submetidas ao processo de aferição de massa para quantificar suas densidades. A finalidade desta etapa é inserir no *software* Genie2K as condições físicas das amostras para eficiência de detecção para o cálculo da auto-atenuação do material em análise. Os valores das densidades são apresentados em ordem crescente na Tabela 1.

Tabela 1. Densidade do feijão para amostras trituradas e peneiradas

Tipos de Feijão	Densidade (gcm <sup>-3</sup> )
Vermelho	0,600
Preto	0,602
Branco	0,608
Carioquinha	0,612
Fradinho	0,642

As atividades de <sup>40</sup>K nas amostras foram feitas observando diretamente o pico de energia do radionuclídeo (1,4608 MeV). A figura 4 mostra os espectros obtidos para cada uma das amostras de feijão. Com os dados da geometria dispostos no Genie2K, a varredura do espectro, o cálculo da auto-atenuação e a quantificação das atividades são feitas automaticamente. Um relatório é emitido com informações como energia, probabilidade de emissão, MDA (*minimum detectable activity*) e atividade da fonte. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 2 em ordem crescente de atividades.

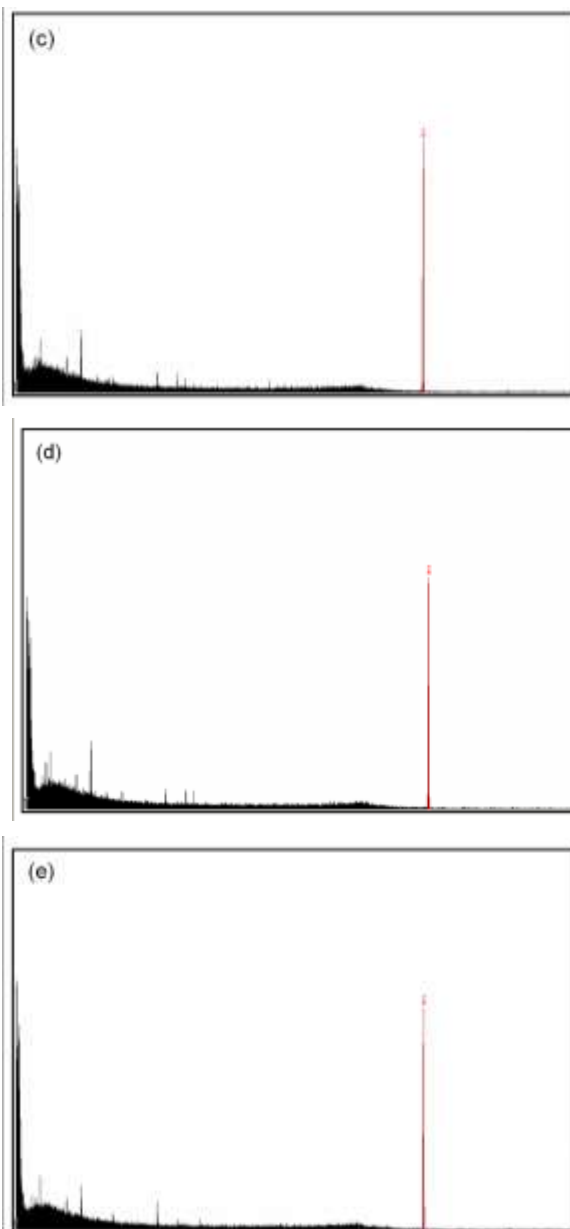
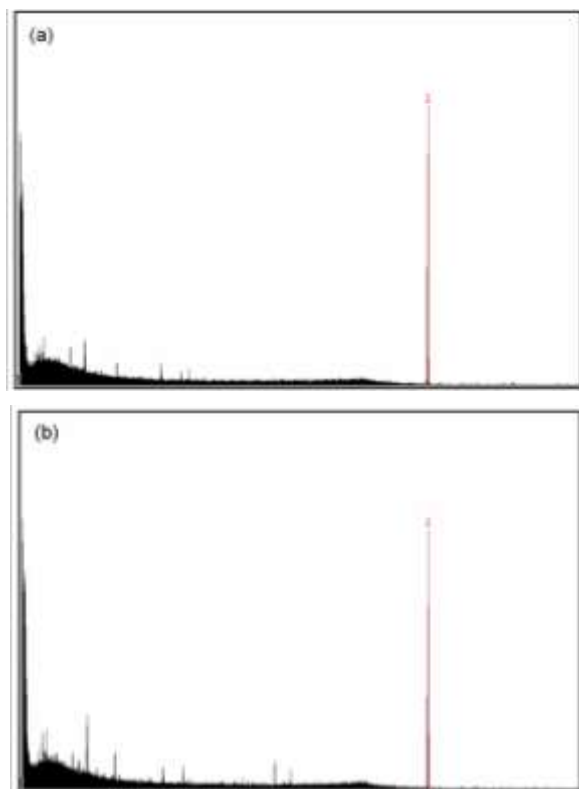


Figura 4. Espectros das amostras de feijão analisadas: (a) Branco, (b) Carioquinha, (c) Vermelho, (d) Preto e (e) Fradinho.

Hernández e colaboradores (Hernández, 2009) analisaram amostras de feijão por espectrometria gama e os autores encontraram  $370 \pm 40$  Bq.Kg<sup>-1</sup> para grãos de feijão importados e comercializados na ilha de Tenerife na Espanha, e  $380 \pm 20$  Bq. Kg<sup>-1</sup> para grãos produzidos no local. Santos e colaboradores (Santos, 2002) ao

analisarem exposição interna devido ao  $^{40}\text{K}$  e encontraram atividade de  $544 \text{ Bq. Kg}^{-1}$  para feijão preto.

Tabela 2. Atividades de  $^{40}\text{K}$  nas amostras de feijão analisadas.

Tipos de Feijão	Atividades ( $\text{Bq.Kg}^{-1}$ )
Fradinho	372,3
Preto	399,6
Vermelho	404,9
Carioquinha	441,7
Branco	452,4

Visando quantificar as doses decorrentes do radionuclídeo  $^{40}\text{K}$  em amostras de feijão, as atividades encontradas foram incluídas no arquivo de entrada do código MCNP, considerando a fonte centralizada no estômago com emissão isotrópica. O detalhe do cartão, como localização da fonte e órgãos de interesse, é apresentado na figura 5.

O código MCNP normalmente calcula a dose assumindo a aproximação do kerma, ou seja, assumindo que a energia cinética transferida por partículas carregadas é depositada localmente. Essa condição é satisfeita quando o equilíbrio de partículas é assegurado. Quando o equilíbrio de partículas não pode ser garantido, a dose deve ser determinada utilizando o tally \*f8 do MCNP. Este comando, que foi utilizado no cartão de entrada mostrado na figura 5, contabiliza a energia depositada em um volume dV subtraindo a energia que sai da que entra neste volume (Reis Junior, 2011).

```
mode p e
-----Source definition-----
c Fonte AP
SDEF pos 34.60 9.70 124.50 erg=1.4608 par=2
c
-----Dose calculation-----
*f18:p,e (72<889) $ stomach
*f28:p,e (137<889) $ bladder
*f38:p,e (95<889) $ Liver
*f48:p,e (110<889) $ Oesophagus (wall)
*f58:p,e (132<889) $ Thyroid
*f78:p,e ((76 78 80 82 84 86)<889) $ colon
*f88:p,e ((97 99)<889) $ lungs
*f108:p,e ((120 121)<889) $ salivary glands
*f138:p,e (87<889) $ heart
*f148:p,e ((89 90 91 92 93 94)<889) $ kidneys
*f158:p,e (74<889) $ small intestine
*f168:p,e ((100 101 102 103 104 105)<889) $ Lymph. Nodes
*f198:p,e (113<889) $ pancreas
*f208:p,e (127<889) $ spleen
*f218:p,e (131<889) $ thymus
*f228:p,e (115<889) $ prostata
*f238:p,e ((129 130)<889) $ testes
```

Figura 5. Detalhe do arquivo de entrada onde são definidos as características da fonte e os órgãos de interesse.

Para obter o valor em gray a partir do arquivo de saída em MeV do MCNP, deve-se utilizar da Eq. (1) (Goorley, 2005).

$$Dose (Gy) = \frac{*f8}{m (Kg)} \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \left| \frac{J}{Kg} \right|$$

Eq. (1)

Os valores de dose equivalente são apresentados na Tabela 3. A escolha dos órgãos se deu por aproximação do estômago e sua radiosensibilidade. Os valores de dose aqui apresentados correspondem somente emissões de fótons do radionuclídeo  $^{40}\text{K}$  encontrado nas amostras de feijão, para uma digestão de 2 horas com localização fixa no estômago e um consumo médio diário de  $218,1\text{g/hab.}$  para o Estado do Rio de Janeiro (IBGE, 2011).

Santos e colaboradores (Santos, 2002) estimaram uma dose efetiva anual para o feijão de  $47\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ . Venturini e colaboradores (Venturini, 1999) estimaram a contribuição de  $^{40}\text{K}$  na exposição interna e obtiveram valores de  $87,4\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ . Os valores de dose equivalente encontrado neste trabalho estão na ordem de  $\mu\text{Sv.ano}^{-1}$ . Uma boa aproximação, visto as

limitações impostas nas simulações, principalmente no que diz respeito ao tempo de exposição ao radionuclídeo.

Tabela 3. Dose equivalente devido atividade de  $^{40}\text{K}$  em amostras de feijão branco, carioquinha, vermelho, preto e fradinho. ( $10^{-2} \mu\text{Sv.ano}^{-1}$ )

Órgão/Feijão	Brc	Car.	Ver.	Prt	Frad.
Estomago	783	764	700	691	644
Pâncreas	204	199	182	180	168
Baço	125	122	112	110	103
Cólon	111	108	99,0	98,0	91,0
Coração	98,3	96,0	88,0	86,8	80,9
Nodos	86,1	84,0	77,0	76,0	70,8
Intestino Dg.	78,8	77,0	70,5	69,6	64,9
Rins	74,8	73,0	66,9	66,1	61,6
Fígado	74,5	72,7	66,7	65,8	61,3
Esôfago	45,5	44,4	40,7	40,2	37,4
Pulmão	44,6	43,5	39,9	39,4	36,7
Timo	17,5	17,0	15,6	15,4	14,4
Tiróide	10,2	9,70	9,10	9,00	8,40
Bexiga	5,79	5,66	5,19	5,12	4,77
Gd. Salivares	3,91	3,81	3,50	3,45	3,22
Próstata	3,47	3,38	3,10	3,06	2,85
Testículo	1,36	1,33	1,22	1,21	1,12

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma aproximação do cálculo de dose equivalente em órgãos devido à ingestão de  $^{40}\text{K}$  contidas em amostras de feijão. A metodologia mostrou-se adequada quando se deseja quantificar valores de dose em órgãos específicos a partir da ingestão de alimentos. Mais uma vez o uso do HPGe mostrou-se eficiente quando se deseja quantificar a atividade de um radionuclídeo, e o MCNP uma ferramenta indispensável no cálculo de dose utilizando fantasmas em voxel.

Os valores de dose aqui apresentados estão na mesma ordem de grandeza quando comparados aos valores de dose efetiva anual calculado pelo fator de conversão ( $6,02 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$ ) estabelecido pela ICRP 72 para o radionuclídeo  $^{40}\text{K}$  (ICRP 72, 1º Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes , Rio de Janeiro/RJ, novembro de 2014

1996). Isso se deve ao fato do estudo ter analisado apenas as emissões de  $^{40}\text{K}$ , em amostras de feijão, de acordo com dados de ingestão diária, para um bolo alimentar centralizado no estomago e considerando duas horas de digestão.

Pretende-se aproximar ao máximo essas informações da realidade incluindo outros radioisótopos contidos em alimentos e simular outros cenários realísticos com diferentes localizações da fonte, discretizando o trato digestivo. Contudo, a ferramenta mostra-se eficiente para cálculo de dose em órgãos e até mesmo para o cálculo de dose efetiva.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (processo no. E-26/112.087/2012) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento pelo suporte financeiro, sem o qual a realização deste trabalho seria inviável.

#### REFERENCIAS

- Fernandes A C; Calvo M C M; Proença R P C. (2010). *Tipos de Feijões e Técnicas de Preparo Utilizados em Unidades Produtoras de Refeições das Regiões Sul e Sudeste do Brasil*. Rev. Nutr. vol.25 no.2.
- Goorley T. (2005). *Using MCNP5 for Medical Physics Applications*. Los Alamos National Laboratory, TN, USA.
- Hernaández F; Hernaández-Armas J; Catalán A; Fernaández-Aldecoa J C; Landeras M I. (2004). *Activity Concentrations and Mean Annual Effective Dose of Foodstuffs on the Island of Tenerife, Spain*. Radiat. Prot. Dosim. 1-6.

- IBGE (2011). *Análise do Consumo Alimentar Pessoal no Brasil 2008-2009*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- ICRP 72 (1996). *Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients*. Pergamon Press, Oxford.
- ICRP 110 (2009). *Adult Reference Computational Phantoms*. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford.
- Reis Junior J P. (2011). *Avaliações das Aproximações Utilizadas no Planejamento do Tratamento de Braquiterapia de Próstata*. Tese D.Sc. COPPE-UFRJ.
- Rosa, M M L; Custódio, L G; Bonifácio, R L; Taddei, M H T. (2013). *Validação do Ensaio de Medidas por Espectroscopia Gama de Radionuclídeos em Matrizes de Alimentos*. IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety. Rio de Janeiro, BR.
- Santos E E; Lauria D C; Amaral E C S. (2002). *Concentração de K-40 nos principais vegetais consumidos pela população da cidade do Rio de Janeiro*. In: VI National Meeting on Nuclear Applications, Brasil.
- Venturini L, Sord G A. (1999). *Radioactivity and Committed Effective Dose from Some Brazilian Foodstuffs*. Health Physics Society, v.76.