

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS ASSOCIADOS À MONITORAÇÃO IN VIVO DE ISÓTOPOS DE URÂNIO NOS PULMÕES

Silvia P. Juppá, Eder A. Lucena, Bernardo M. Dantas, Ana Letícia A. Dantas.

Laboratório de Monitoração In Vivo
Divisão de Dosimetria
Instituto de Radioproteção e Dosimetria
Comissão Nacional de Energia Nuclear
Av. Salvador Allende – Rio de Janeiro – RJ, CEP 22780-160, Brasil
adantas@ird.gov.br

Resumo. A manipulação de compostos de urânio nas diversas etapas do ciclo do combustível nuclear requer a avaliação da exposição ocupacional interna dos trabalhadores envolvidos em tais práticas. Para tal utilizam-se técnicas de monitoração individual *in vivo* e *in vitro*. O contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas de monitoração interna e de calibração dos sistemas de detecção visam à melhoria da qualidade da avaliação de exposições ocupacionais. O objetivo deste trabalho é avaliar os parâmetros associados à monitoração *in vivo* de isótopos de urânio nos pulmões. A técnica *in vivo* é aplicada rotineiramente no Instituto de Radioproteção e Dosimetria e consiste na medição direta do radionuclídeo no corpo humano, utilizando-se um conjunto de quatro detectores semicondutores de germânio hiperpuro, instalado no interior de uma sala blindada denominada de Contador de Corpo Inteiro (CCI). A partir da monitoração *in vivo*, em um tempo de 60 minutos, são obtidos os valores de contagens totais para cada região do espectro analisado. Estes dados, correlacionados com os dados antropométricos de cada indivíduo e com a curva de calibração da instrumentação, possibilitam o cálculo da atividade mínima detectável (AMD). Neste trabalho foi avaliada a variação da AMD em função da espessura de camada torácica (ECT), visto que cada indivíduo atenua os fótons emitidos de forma diferenciada em função de suas próprias características antropométricas. Os dados experimentais analisados indicam que a atividade mínima detectável e a espessura de camada torácica apresentam uma correlação exponencial. Esta correlação pode ser utilizada como ferramenta para a avaliação da AMD de forma individualizada, em função da ECT, calculada para cada indivíduo monitorado.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de radionuclídeos em diversas áreas de atuação e pesquisa gera uma preocupação em monitorar os indivíduos ocupacionalmente expostos, utilizando-se técnicas *in vivo* e *in vitro* para a avaliação de exposição interna. O desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas de monitoração interna constituem um permanente esforço que visa à melhoria da qualidade da avaliação de exposições ocupacionais, contribuindo para a redução dos riscos associados à manipulação e utilização de radioisótopos [1].

A análise *in vivo* em dosimetria interna consiste na determinação qualitativa e quantitativa de radionuclídeos incorporados, realizando medições diretas no corpo humano através de detectores de cintilação e semicondutores (ICRP, 1997). Para a monitoração interna de indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) envolvidos com a manipulação de isótopos de urânio, nas diversas etapas do ciclo do combustível, tem como geometria de contagem mais adequada a de pulmão, sendo realizada em uma sala denominada unidade de contador de corpo inteiro [2].

A monitoração individual inclui também a interpretação de dados de bioanálise, aplicando-se modelos biocinéticos e dosimétricos que simulam a distribuição dos radionuclídeos no corpo humano, seu decaimento radioativo e excreção. Tais modelos permitem estimar as doses absorvidas pelos indivíduos expostos em decorrência da incorporação de radionuclídeos.

O objetivo deste trabalho é avaliar os parâmetros associados à técnica de monitoração de indivíduos expostos a isótopos de urânio, visando à otimização da técnica e redução de incertezas associadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados neste estudo dados antropométricos e de contagens totais, obtidos durante os anos de 2003 a 2011, de 795 indivíduos. Os dados foram correlacionados utilizando o programa operacional MS-Excel para a montagem dos gráficos utilizados. A monitoração de cada indivíduo foi realizada em um tempo de 60 minutos, com os fatores de calibração obtidos para a técnica. Os espectros dos indivíduos monitorados foram considerados como espectros de radiação de fundo (*background*) de indivíduos não ocupacionalmente expostos.

A monitoração *in vivo* foi realizada utilizando-se um conjunto de quatro detectores de germânio hiper puro (HPGe) na medição de radionuclídeos emissores de fótons na faixa de 10 a 200 KeV. A medição de ^{238}U foi baseada na detecção de fótons de 62,8 e 92,3 keV emitidos por seu descendente ^{234}Th . O ^{235}U , por sua vez, foi identificado diretamente através da detecção de seus fótons de 185,7 keV. Estas monitorações foram realizadas na Unidade de Contador de Corpo Inteiro do IRD (UCCI), que consiste em uma sala com dimensões internas de 2,5m x 2,5 m x 2,62 m, feitas de aço e possuindo um revestimento interior de 3 mm de chumbo, 1,5 mm de cádmio e 0,5 mm de cobre [3].

Antes de realizar a monitoração de indivíduos ocupacionalmente expostos, a instrumentação foi calibrada, usando-se um simulador de pulmão contendo atividade conhecida de urânio natural (figura 1).



Figura 1: Calibração dos detectores de HPGe utilizando um simulador de pulmão.

O cálculo do fator de calibração é mostrado abaixo e é a razão entre a atividade do simulador e a taxa de contagem líquida:

$$F_c = ((T-B)/T_c)/A_t \quad (1)$$

Onde, F_c é o fator de calibração em cpm.Bq^{-1} , A_t é a atividade do simulador em Bq, T é o total de contagens obtidas com o simulador ativo, B é o total de contagens da radiação de fundo (*Background*) e T_c é o tempo de contagem em minutos. O termo $(T-B)/T_c$ é denominado taxa de contagem líquida [4].

A detecção dos fótons é atenuada de modo diferente em relação à espessura de camada torácica (ECT) de cada indivíduo, sendo necessária a correlação com a taxa de contagem, utilizando-se para o cálculo de ECT, em (mm), a equação abaixo [5]:

$$ECT = 0,1105 \times (P/A) - 2,0038 \quad (2)$$

Onde P é o peso em kilogramas, e A é a altura do indivíduo em metros.

A atividade mínima detectável (AMD) representa o valor mínimo de atividade que é detectável pela instrumentação utilizada. O cálculo da atividade mínima detectável (AMD) para a técnica *in vivo* se dá através da equação abaixo [6]:

$$AMD = \frac{4.65\sqrt{N}}{F_c \times T} + \frac{3}{F_c \times T} \quad (3)$$

Onde N representa o total de contagens para um indivíduo não ocupacionalmente exposto, F_c é o fator de calibração em cpm.Bq^{-1} , e T é o tempo de contagem em minutos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizada uma análise do perfil dos indivíduos monitorados montando-se uma planilha com os dados antropométricos, como mostrado na tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Faixas de dados antropométricos dos indivíduos monitorados entre os anos de 2003 a 2011.

Sexo	Faixa de idade (anos)	Faixa de peso (Kg)	Faixa de altura (m)	Nº de ind.
Fem.	20 - 35	44 - 129	1,48 - 1,73	51
	36 - 50	50 - 101	1,49 - 1,79	71
	50 - 65	43 - 82	1,49 - 1,78	23
	> 66	-	-	-
Masc.	20 - 35	50 - 129	1,59 - 1,97	232
	36 - 50	49 - 134	1,57 - 1,87	318
	50 - 65	49 - 138	1,56 - 1,87	97
	> 66	99 - 103	1,70 - 1,76	3

Podemos observar um número maior de indivíduos do sexo masculino, e a predominância da faixa etária entre 36 e 50 anos para ambos os sexos. Do mesmo modo, foi montada uma planilha para avaliar a média das contagens totais obtidas para ambos os isótopos de urânio e ambos os sexos (tabela 2).

Tabela 2: Totais de contagem em 60 minutos nas regiões do ^{238}U e ^{235}U , para indivíduos do sexo masculino e feminino, obtidas com sistema de detecção HPGe da UCCI-IRD.

Sexo	^{238}U	^{235}U
M	338	129
F	288	120

A média de contagens obtidas respectivamente para ^{238}U e ^{235}U , para indivíduos do sexo masculino foi de 338 e 129 e para indivíduos do sexo feminino foi de 288 e 120. Observa-se que o valor médio de contagens totais encontradas para a região de energia correspondente ao ^{238}U se apresenta significativamente diferente se comparado à mesma região para o sexo feminino. Para a região de energia correspondente ao ^{235}U esta diferença é menos evidente.

As contagens totais de ^{238}U e ^{235}U foram correlacionadas com a espessura de camada torácica de cada indivíduo como mostram as figuras 2 e 3 respectivamente.

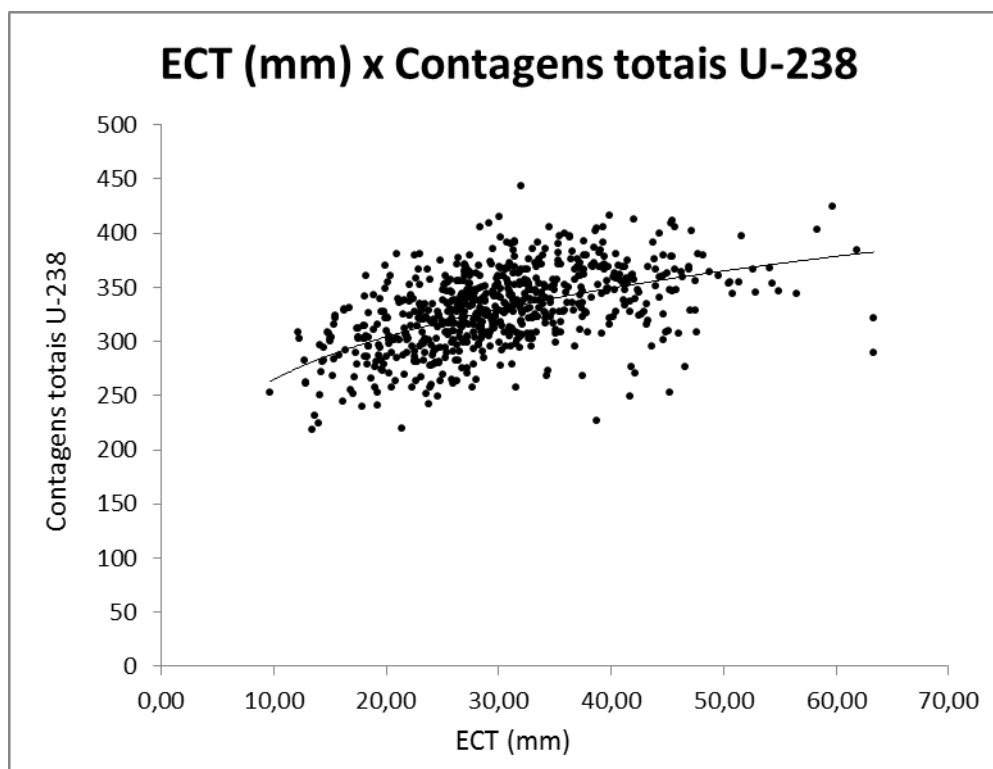


Figura 2: Relação entre contagens totais na região do ^{238}U e espessuras de camada torácica de cada indivíduo (ECT).

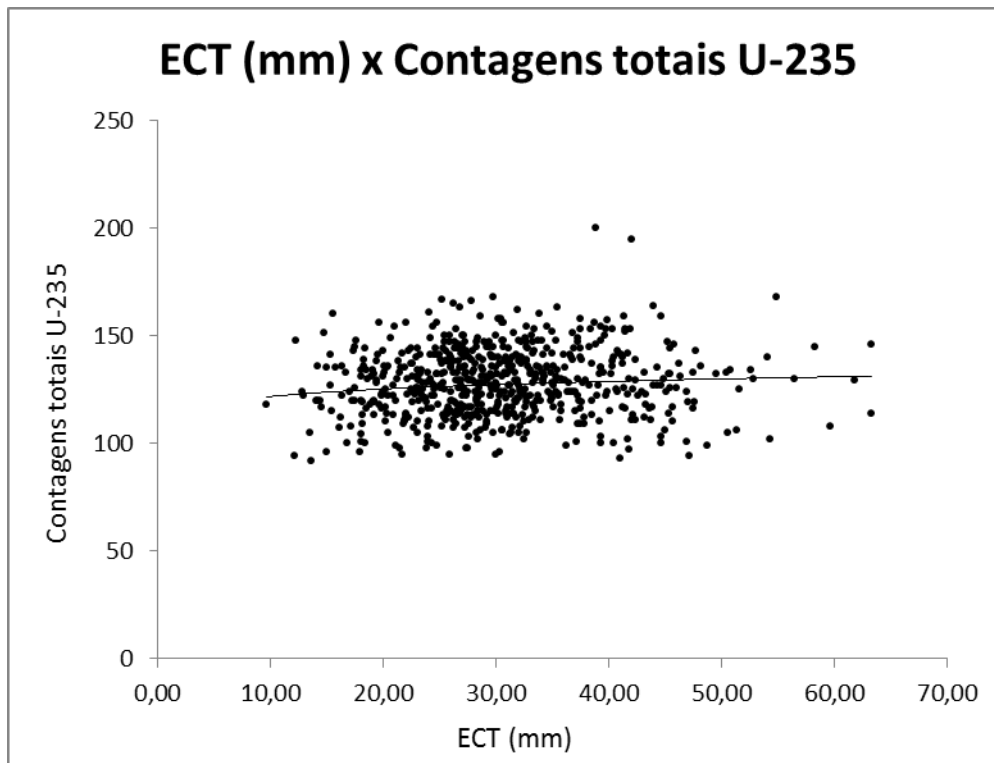


Figura 3: Relação entre contagens totais na região do ^{235}U e espessura de camada torácica de cada indivíduo (ECT).

A figura 2 apresenta os valores de contagens de ^{238}U na faixa de 200 e 450 contagens, valor superior ao observado na figura 3 para ^{235}U que fica em 80 e 200 contagens. Essa diferença é devido à faixa de energia utilizada para cada isótopo de urânio, no caso, para o ^{238}U utilizam-se duas regiões do espectro enquanto que, para o ^{235}U , utiliza-se apenas uma região, como mencionado anteriormente na parte de materiais e métodos. Esta metodologia é indicada para se reduzir os valores de atividade mínima detectável quando da obtenção dos dados e cálculo, a partir dos espectros dos indivíduos [7].

Observa-se uma flutuação na relação entre espessura de camada torácica e contagens totais para ambos os isótopos de urânio. A atenuação por parte da ECT depende do percentual de músculo/gordura presente no organismo, que para esse estudo não foi determinado. Outro fator que contribui para esse resultado é a presença de ^{40}K nos músculos. A meia vida do ^{40}K é de $1,28 \times 10^9$ anos e, no processo de decaimento, emite fótons de 1460,8 keV, ocorrendo o efeito Compton associado a esta emissão. Como as energias dos radionuclídeos em estudo se encontram abaixo de 200 keV, o efeito Compton é um parâmetro que contribui no total de contagens. Para indivíduos com a mesma relação peso/altura, quanto maior a proporção de músculo presente, maior a quantidade de ^{40}K corporal [8], de tal forma que a presença deste radionuclídeo passa a ser determinante no aumento do total de contagens devido à radiação de fundo. Para o sexo feminino, que normalmente apresenta menor percentual de massa muscular, os valores encontrados para o total de contagens, principalmente para a região do ^{238}U , se apresentam menores. Um outro parâmetro importante está associado a presença das glândulas mamárias nos indivíduos do sexo feminino, cuja densidade é de aproximadamente 1,05 [9], podendo conduzir a maior atenuação de fótons de baixa energia, tanto relativos à radiação de fundo quanto emitidos pelo ^{238}U , provenientes da região pulmonar, no caso de haver uma contaminação interna.

Como a determinação da atividade nos pulmões depende da ECT do indivíduo, é necessário determinar a equação do fator de calibração a ser utilizada para o cálculo. As curvas de calibração utilizadas pelo Contador de Corpo Inteiro (CCI), do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), foram obtidas em três intervalos de anos, desde 1999 até 2012. A Tabela 3 apresenta as equações obtidas a partir das curvas de calibração utilizadas para monitoração de ^{238}U e ^{235}U .

Tabela 3: Curvas de calibração de ^{238}U e ^{235}U , utilizadas nas monitorações de indivíduos entre os anos de 1999 a 2012.

Intervalo de Calibração (anos)	Equação para ^{238}U	Equação para ^{235}U
1999-2003	$y = 0,0869e-0,031x$ $R^2 = 0,9462$	$y = 0,3775e-0,03x$ $R^2 = 0,9454$
2004-2008	$y = 0,0844e-0,04x$ $R^2 = 0,9707$	$y = 0,3872e-0,03x$ $R^2 = 0,9611$
2009-2012	$y = 0,0996e-0,04x$ $R^2 = 0,9831$	$y = 0,4544e-0,03x$ $R^2 = 0,9732$

Ao longo deste período foram obtidas 3 curvas de calibração com a utilização do fantoma de pulmões e tórax, sendo garantida a qualidade das medições através de verificações intermediárias e controle de qualidade rotineiro, utilizando-se fontes pontuais de U-Nat e ^{241}Am .

Foram calculadas as atividades mínimas detectáveis (AMD) para todos os indivíduos, a partir da monitoração *in vivo*, em um tempo de 60 minutos, avaliando-se a sua variação em função da ECT. As figuras 4, 5, 6 e 7 apresentam a variação de atividade mínima detectável em função da espessura da camada torácica, para ambos os sexos e para ^{238}U e ^{235}U respectivamente.

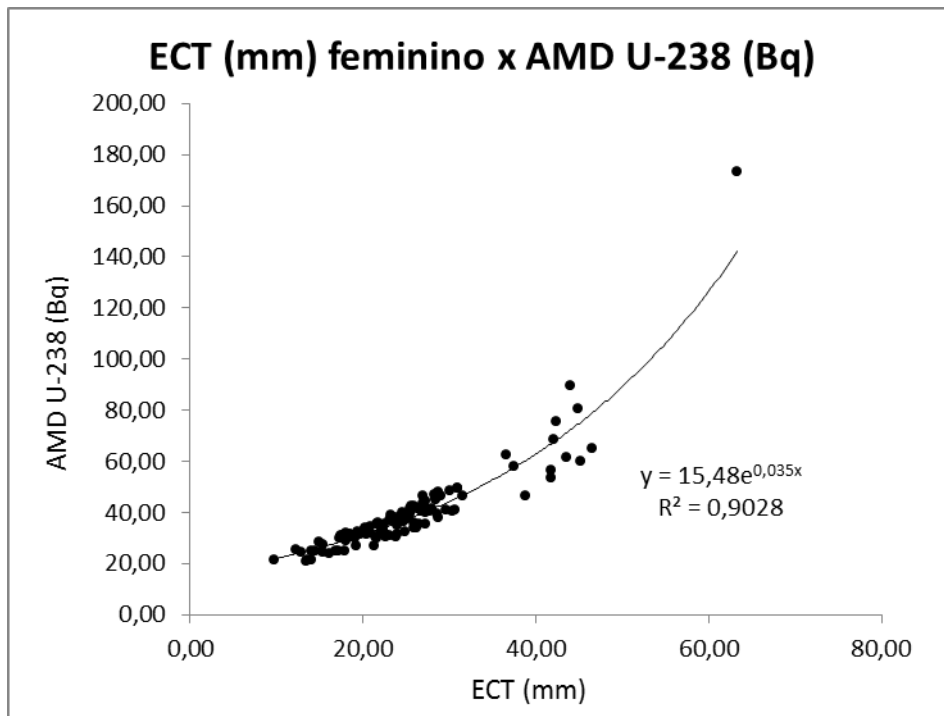


Figura 4: Relação entre atividade mínima detectável (AMD) e espessura de camada torácica (ECT) para ^{238}U , para indivíduos do sexo feminino.

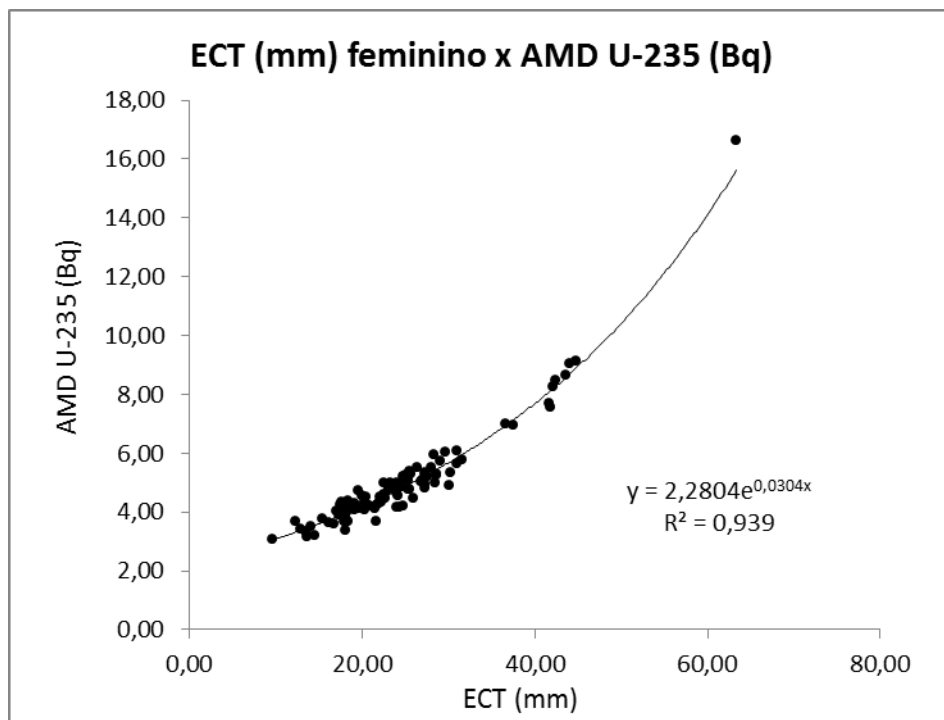


Figura 5: Relação entre atividade mínima detectável (AMD) e espessura de camada torácica (ECT) para ^{235}U , para indivíduos do sexo feminino.

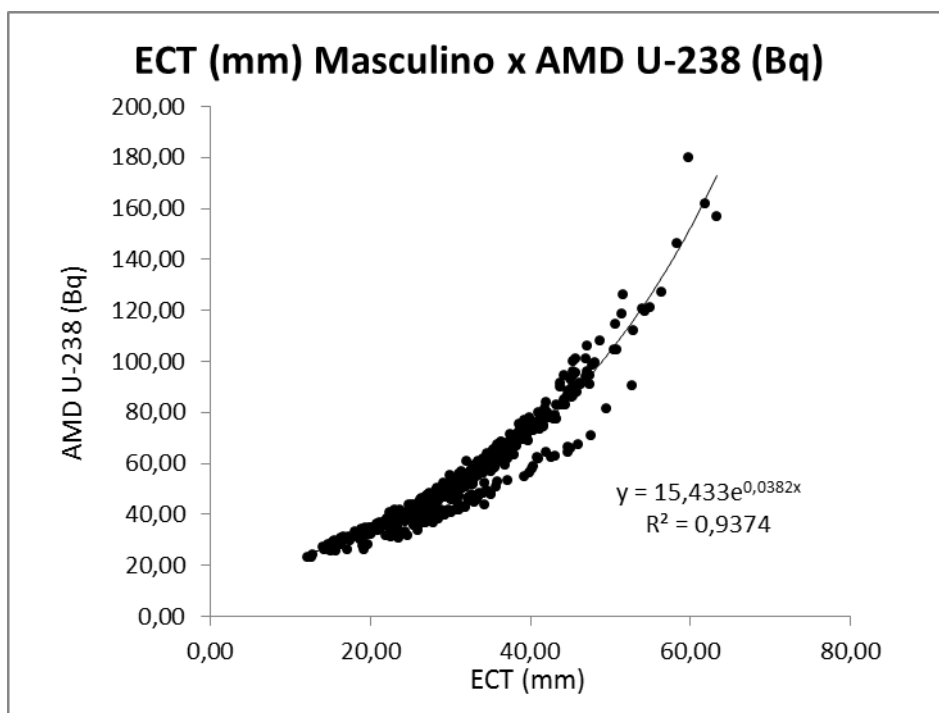


Figura 6: Relação entre atividade mínima detectável (AMD) e espessura de camada torácica (ECT) para ^{238}U , para indivíduos do sexo masculino.

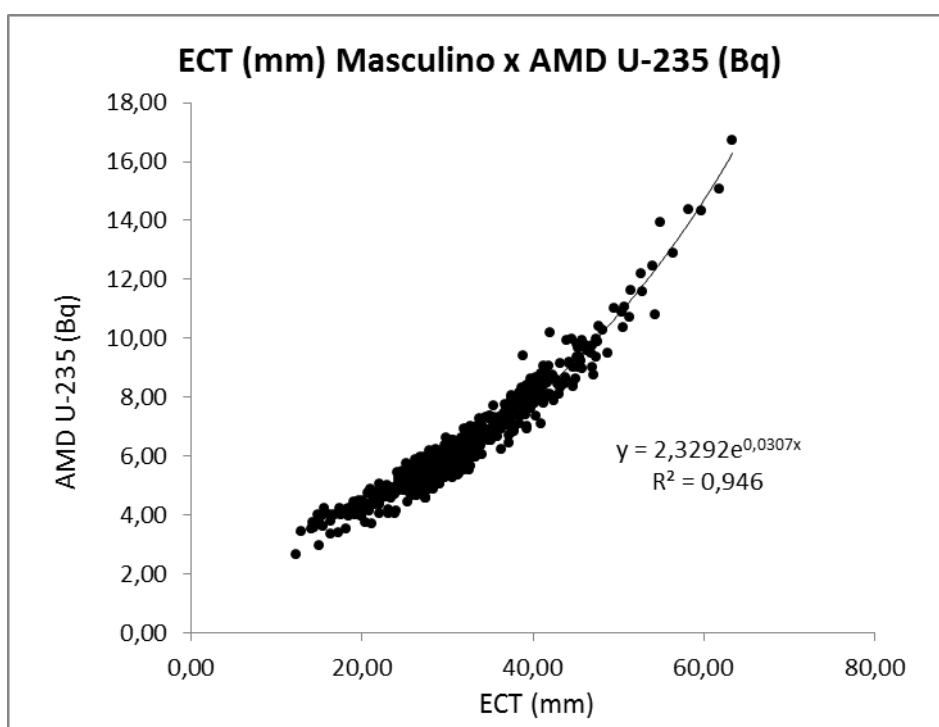


Figura 7: Relação entre atividade mínima detectável (AMD) e espessura de camada torácica (ECT) para ^{235}U , para indivíduos do sexo masculino.

Para ambos os sexos e radionuclídeos, os gráficos apresentaram correlação exponencial entre espessura de camada torácica e atividade mínima detectável após a utilização das equações de calibração mencionadas anteriormente, para todas as ECT.

4. CONCLUSÃO

Os parâmetros em estudo, associados à técnica, foram avaliados de acordo com os resultados obtidos através dos gráficos montados, que relacionam a ECT com as contagens totais e a AMD para ambos os sexos, apresentando relação exponencial entre os mesmos. A relação musculo/gordura e a consequente presença de ^{40}K são parâmetros que influenciam na atenuação e flutuação das contagens totais obtidas. Recomenda-se um estudo mais detalhado da influência da presença de glândulas mamárias no aumento da atenuação de fótons de baixa energia. A partir dos parâmetros antropométricos analisados, não se observou correlação entre as faixas de espessura de camada torácica e os valores de contagens totais dos indivíduos.

O presente trabalho mostrou que as equações obtidas a partir da curva de calibração que correlacionam a ECT e a AMD são adequadas para o cálculo individualizado de atividade mínima detectável de ^{238}U e ^{235}U .

5. REFERENCIAS

1. “International Commission On Radiological Protection (ICRP)”, *Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers*, Publication 78: (1998)
2. “Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides - Safety Standards Series, no. RS-G-1.2”, *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, IAEA, 1999
3. Oliveira C.A.N., Lourenço M.C., Dantas B.M., Lucena E.A., & Laurer G.R, “The IRD/CNEN whole body counter: Background and calibration results”, *Radiation Protection Dosimetry*, 29(3): 203-208, (1989)
4. International Atomic Energy Agency (IAEA). “*Direct methods for measuring radionuclides in the human body*” Safety Series 114, Vienna: IAEA, (1996)
5. D.A., Krushten, & L., Anderson, “Improved ultrasonic measurement techniques applied to assay of Pu and other transuranics in lung”, *Health Physics*, 59(1): 117-123, (1990)
6. “Health Physics Society (HPS)”, *Performance Criteria for Radiobioassay*, HPS N13.30, (1996)
7. Kramer G. H., Allen S. A., Dantas A. L. A., and Azevedo A. M. G. F., “Lung counting: summing techniques to reduce the MDA”, *Health Physics*, 85(2): 220-227, (2003)
8. Sousa W.O., Dantas B.M. & Lipsztein J.L., “In vivo measurement technique of ^{40}K as an indicator of the amount of skeletal muscle tissue in the human body”, *Radiation Protection Dosimetry*, 105(1-4): 487-490, (2003)
9. “International Commission on Radiological Protection (ICRP)”, *Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values*, ICRP Publication 89, Pergamon Press: Oxford, (2003)