

Desempeño del Sistema de Detección de ^{235}U y ^{241}Am en Pulmón de la Autoridad Regulatoria Nuclear

Pedemonti, E.¹, Villella, A.¹ Puerta, N.¹, Gossio, S.¹ y Rojo, A.M.¹

¹ Autoridad Regulatoria Nuclear

RESUMEN

El Laboratorio de Dosimetría Interna (LDI) de la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) de Argentina, dispone de un sistema espectrométrico para la detección *in vivo* de actínidos, único en el país. Este equipamiento permite dar apoyo en el control ocupacional de la exposición interna en trabajadores expuestos a Uranio y en la potencial exposición a Americio de los trabajadores involucrados en tareas de extensión de vida de la Central Nuclear de Embalse, provincia de Córdoba.

Este trabajo presenta el proceso de calibración en eficiencia y determinación de los límites de detección de este equipamiento para ^{235}U y ^{241}Am en pulmón. Este sistema de detección espectrométrico está formado por cuatro detectores de Germanio que conforman el equipo denominado ACTII marca Canberra. Los detectores se encuentran en el interior de un recinto de acero, interiormente recubierto con capas plomo y de cadmio. El maniquí empleado en la calibración es el *Lawrence Livermore Realistic Phantom*, que contiene pulmones y nódulos activos y cuatro cubiertas torácicas que simulan tejido muscular con distintos espesores.

Para el sistema descrito se obtuvieron las curvas de eficiencia versus espesor de tejido muscular torácico correspondientes a las energías de 143,8; 163,4 y 185,7 keV del ^{235}U y a la energía de 59,5 keV del ^{241}Am . Así mismo, se determinaron los límites de detección correspondientes a cada energía y espesor del ^{235}U y del ^{241}Am .

A partir de este análisis de desempeño del sistema para la detección *in vivo* de ^{235}U y ^{241}Am puede concluir que este equipamiento de la Autoridad Regulatoria Nuclear de Argentina responde a los estándares internacionales para el apoyo al control regulatorio de la exposición interna de los trabajadores en la rutina y para asegurar una rápida respuesta ante una posible situación de emergencia

1. INTRODUCCIÓN

Debido a las próximas tareas asociadas a la primera extensión de vida de la Central Nuclear Embalse, en la provincia de Córdoba, se identificó la necesidad de evaluar la exposición interna a radionucleídos emisores alfa en los trabajadores involucrados. Es por esto que, al Laboratorio de Dosimetría Interna (LDI) de la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) de Argentina, se le encomendó dar apoyo en el diseño de los programas de monitoreo para el control ocupacional en las tareas asociadas a la extensión de vida de la Central Nuclear de Embalse en situación rutinaria y asegurar una rápida respuesta ante una posible situación de emergencia.

Gracias a la experiencia de la extensión de vida de Centrales Nucleares con reactores CANDU, se identificó que en situaciones de emergencia, la exposición interna a ^{241}Am puede ser significativa [1]. Se consideró entonces, que el sistema de medición específico para la

¹ E-mail del Autor: epedemonti@arn.gov.ar

detección “in vivo” de actínidos en pulmón (ACTII) que dispone el LDI podría ser calibrado, de modo de responder eficazmente ante una situación de emergencia en un escenario de exposición interna a ^{241}Am . El ACTII permite además dar apoyo en el monitoreo ocupacional por exposición a compuestos insolubles de Uranio, por lo cual también es importante que este sistema sea adecuadamente calibrado para la detección de Uranio en pulmón.

En este trabajo se presenta el proceso de calibración del sistema ACTII para el ^{235}U y el ^{241}Am en pulmón utilizando un maniquí simulador de tórax compuesto por una serie de capas que simulan el tejido muscular de distintos espesores.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema de detección espectrométrico está formado por cuatro detectores de Germanio Hiperpuro (GeHp) con eficiencia relativa del 38% (ACTII). Los detectores se encuentran localizados en el interior de un recinto de acero, interiormente recubierto con capas plomo y de cadmio. El maniquí empleado en la calibración fue el Lawrence Livermore Realistic Phantom, que contiene pulmones y nódulos activos con ^{241}Am y Uranio natural, y cuatro cubiertas torácicas que simulan tejido muscular con distintos espesores.

2.1. El Maniquí

El maniquí que se utilizó para la calibración es el Lawrence Livermore Realistic Phantom; fabricado bajo la dirección del Departamento de Energía de Estados Unidos por Radiology Support Device of Long Beach, California, como patrón de referencia para el recuento in vivo de las emisiones de los nucleídos transuránicos de baja energía.

El maniquí está compuesto por un esqueleto óseo sintético hecho dentro de material tejido equivalente. Los órganos se encuentran en una cavidad interna con una cubierta separada que cierra el maniquí y representa el tórax de un hombre adulto promedio (ver fig. 1). Esta cubierta tiene moldeada en su sección anterior las costillas y el esternón. Los órganos de interés son los pulmones, el hígado y los ganglios. Bloques de tejido blando-equivalente se utilizan para colocar los órganos y llenar los espacios de aire significativos, proporcionando continuidad de tejido a lo largo del maniquí. Los nódulos linfáticos están representados por tres cilindros; dos de 8 mm de diámetros y 17 mm de longitud, y uno de 13 mm de diámetro y 25 mm de longitud. Cada uno de estos órganos puede ser radiactivo o inerte. La construcción básica del material de los órganos es poliuretano comercial con CaCO_3 adicionado en las concentraciones necesarias para la simulación de los distintos tejidos a saber; músculo: 1,70% Ca; cartílago: 2,33% Ca; tejido óseo: 13,00% Ca y pulmones: 2,10% Ca.

Dado que las emisiones de los nucleídos transuránicos de baja energía pueden estar atenuadas por tejido muscular y adiposo propio de la persona; el maniquí cuenta con una serie de cubiertas torácicas de diferentes espesores que se pueden superponer para simular esos distintos porcentajes de masa muscular y tejido adiposo, y así asegurar la validez de conteo in vivo de diferentes individuos modelos. Cada capa tiene impresa tres conjuntos de círculos concéntricos, dos ubicados sobre la región de los pulmones y uno sobre la región del hígado, que sirven para posicionar los detectores en el momento de realizar las mediciones de calibración [2].



Figura 1. Lawrence Livermore Realistic Phantom y capas torácicas

2.2. Equipos

El recinto de medición está formado por una cámara blindada de 200x150 cm² de área, 200 cm de altura y 40 Tn de peso; compuesta por paredes de 15 cm de acero recubiertas en su interior con capas de plomo y cadmio de 0,5 y 0,05 cm respectivamente. Dentro de la misma se halla ubicada, a parte del sistema de medición, una camilla en posición fija predeterminada la cual permite obtener una geometría de medición horizontal. El recinto posee en su interior un sistema de circuito cerrado de televisión para poder monitorear al sujeto en caso de algún inconveniente.

El sistema de medición está compuesto por cuatro detectores de GeHp modelo ACTII (GL3820RT/S) de Canberra dispuestos en pares en dos criostatos. Cada detector tiene un área activa de 3800 mm², un diámetro de 70 mm y un espesor de 20 mm. Cada detector posee una ventana de un compuesto de carbono de 0,6 mm de espesor. Todo el sistema está suspendido por una estructura móvil que permiten cambiar la posición con respecto al torso de la persona a medir [3].

2.3. Métodos

Para la calibración del sistema ACTII en eficiencia se ubicó el maniquí Livermore, con pulmones activos con ²⁴¹Am y ²³⁵U de actividad conocida, frente al detector y se colectó el espectro por 86400 s de modo que los picos de interés estuvieran bien conformados.

Para cada tipo de pulmones activos (²⁴¹Am o ²³⁵U), se sumaron y analizaron los espectros adquiridos de las mediciones correspondientes a cada detector. Se realizaron tres mediciones independientes de 86400 seg de duración por cada una de las cubiertas de tórax del maniquí,

se calculó el factor de calibración para cada uno de ellos, y se tomó como valor final el promedio de los mismos. Se tomó como geometría de medición una distancia de 1 cm entre la superficie del tórax del maniquí y el detector.

El análisis de los espectros se efectuó con las herramientas que provee el código de adquisición de datos y análisis GENIE2K [4].

Para la estimación de la eficiencia del sistema con el maniquí Livermore se empleó la expresión 1:

$$Ef = \frac{A_N}{A_{mm} \times \varepsilon \times T} \quad (1)$$

Donde **Ef** es la eficiencia en cuentas por segundo por Bq (cps Bq⁻¹), **A_N** es el área neta del fotopico de interés correspondiente al radionucleido empleado en la calibración expresado en cuentas, **A_{mm}** es la actividad actualizada contenida en el maniquí a la fecha de medición, **ε** es la emisividad correspondiente al fotopico y **T** es el tiempo de medición.

La expresión utilizada para el cálculo de la incertidumbre de la eficiencia (**σ_{ef}**) está dada por:

$$\sigma_{ef} = Ef \sqrt{\left(\frac{\sigma_{A_N}}{A_N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{A_{mm}}}{A_{mm}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2} \quad (2)$$

Donde **σ_{ef}** es la incertidumbre estándar combinada asociada a la eficiencia, **σ (A_N)** es la incertidumbre estándar asociada al número de cuentas netas en la ROI, **σ (A_{mm})** es la incertidumbre estándar combinada asociada a la actividad de la fuente de calibración, **σ (ε)** es la incertidumbre estándar asociada a la emisividad y **σ (T)** es la incertidumbre estándar asociada al tiempo de medición.

La eficiencia obtenida mediante la expresión 1, permite obtener la actividad de ²⁴¹Am y ²³⁵U contenidos en los pulmones de un hombre, sin embargo no es adecuada para el cálculo en mujeres.

Actualmente no se dispone en el mercado de maniqués físicos de mujer, ya que la gran variedad de tamaño y forma que presenta la mama dificulta la fabricación de un modelo que sea representativo de la mujer [5].

Para que el sistema ACTII sea apropiado para la medición de mujeres, se implementó el método de calibración propuesto por J. Farah *et al* [5]. En este método se corrige el valor de la eficiencia obtenida para el hombre con el maniquí Livermore mediante un factor de corrección que toma en cuenta el valor del contorno de torso a la altura de la mama y la taza (A, B, C, D, E ó F), tal como se muestra en la expresión 3.

$$Ef_{mujer} = \frac{Ef_{Livermore}}{\text{factor de corrección}} \quad (3)$$

Donde Ef_{mujer} es la eficiencia estimada para la mujer para una energía de interés, $Ef_{Livermore}$ es la eficiencia para esa misma energía obtenida para el maniquí Livermore con solo la capa donde se encuentra el esternón, y el factor de corrección es un valor que se puede obtener del trabajo de J. Farah *et al* [5] dependiendo del tamaño del torso y de la mama.

Para estimar los límites de detección para el hombre se midieron los fondos con el maniquí Livermore con órganos inertes y con los diferentes espesores torácicos. A pesar de que el maniquí no contiene todos los elementos químicos presentes naturalmente en el cuerpo humano, el fondo se ve incrementado debido a la interacción de la radiación ambiente con el maniquí. Se calculó de esta forma, para la combinación de los cuatro detectores, los límites de detección correspondientes a 3600 segundos de medición, mediante la siguiente expresión [6]:

$$LD = \frac{4,65\sqrt{B}}{Ef T} + \frac{3}{Ef T} \quad (4)$$

Donde B es el número de cuentas del fondo correspondiente a la zona de los fotopicos de interés, Ef es la eficiencia en cps Bq^{-1} correspondiente y T es el tiempo de medición.

Se efectuaron mediciones de fondo con cuatro hombres voluntarios y se estimó para cada voluntario el espesor de su tórax mediante la expresión 5 [7]. Se calculó el límite de detección correspondiente a 3600 segundos de medición para cada hombre voluntario y se comparó con los valores de LD obtenidos para el maniquí:

$$ETM(cm) = 11,5 \left(\frac{W}{H} \right) - 2,0038 \quad (5)$$

Donde ETM es el espesor torácico muscular, W es el peso del individuo en kg y H es la altura en cm.

3. RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran las eficiencias obtenidas para el hombre en función del espesor torácico muscular (ETM) para las tres energías características del ^{235}U , y en la tabla 2 para el ^{241}Am :

Tabla 1. Eficiencias obtenidas para el hombre en función del espesor del tórax para energías características de ^{235}U

ETM*(cm)	143,8 keV		163,4 keV		185,7 keV	
	Eficiencia (cps/Bq)	σ_{ef} (cps/Bq)	Eficiencia (cps/Bq)	σ_{ef} (cps/Bq)	Eficiencia (cps/Bq)	σ_{ef} (cps/Bq)
1,638	1,437E-02	2E-05	1,401E-02	2E-05	1,204E-02	2E-05
2,351	1,072E-02	2E-05	1,010E-02	1E-05	9,118E-03	1E-05
2,958	9,03E-03	1E-05	8,53E-03	1E-05	7,71E-03	1E-05
3,295	8,08E-03	1E-05	7,57E-03	1E-05	6,92E-03	1E-05
3,871	7,15E-03	1E-05	6,81E-03	1E-05	6,172E-03	9E-06

*ETM: Espesor Torácico Muscular

Tabla 2. Eficiencias obtenidas para el hombre en función del espesor del tórax para la energía característica del ^{241}Am

ETM*(cm)	59,5 keV	
	Eficiencia (cps/Bq)	σ_{ef} (cps/Bq)
1,638	1,09E-02	3E-04
2,351	8,0E-03	2E-04
2,958	6,8E-03	2E-04
3,295	6,1E-03	1E-04
3,871	5,1E-03	1E-04

*ETM: Espesor Torácico Muscular

En la figura 1 se muestran los datos experimentales de las eficiencias obtenidas para el hombre en función del espesor del tórax para las tres energías características del ^{235}U y para el ^{241}Am , con las curvas de ajuste obtenidas.

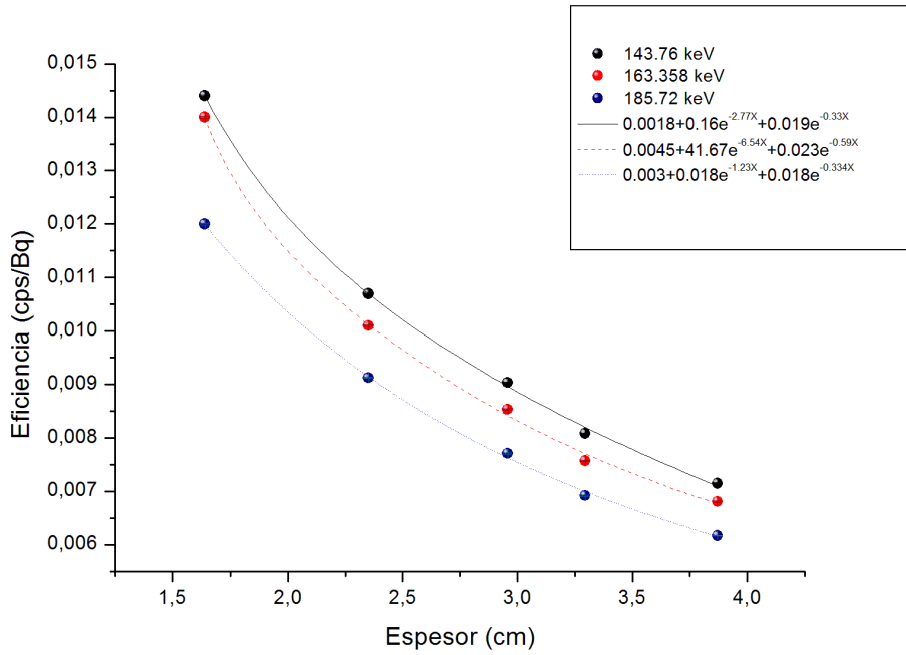


Figura 1. Eficiencias obtenidas para el hombre en función del espesor del tórax para energías características del ^{235}U y curvas de ajuste ($R^2=0,99$)

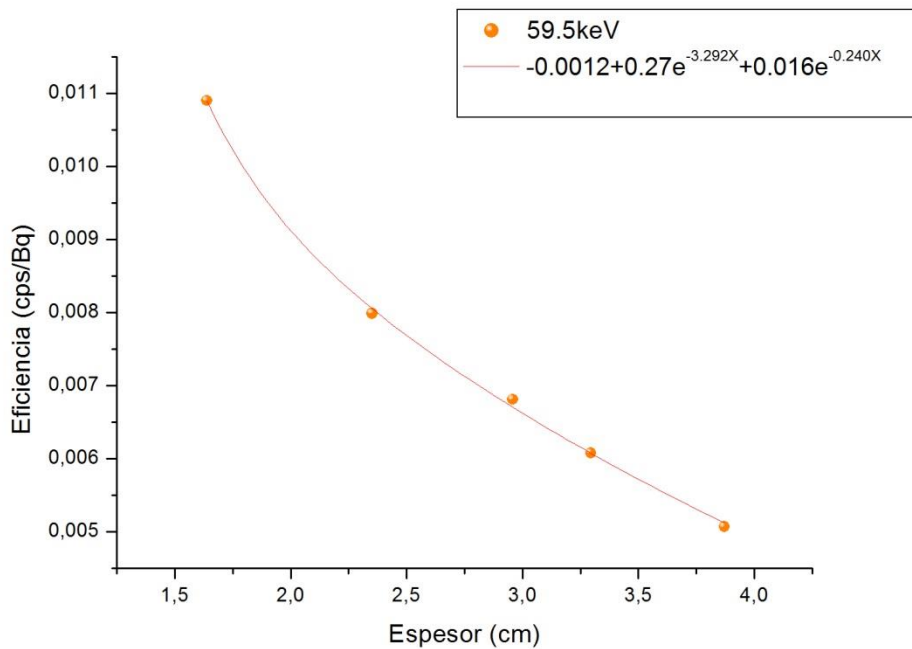


Figura 2. Eficiencia obtenida para el hombre en función del espesor del tórax para la energía de 59,5 keV característica del ^{241}Am y curva de ajuste ($R^2=0,99$)

En la tabla 3 se presentan los resultados de las eficiencias obtenidas para la mujer de acuerdo al contorno del tórax en cm y el tamaño de mama, y para la energía de 59,5 keV característica del ^{241}Am y de 185,7 keV característica del ^{235}U .

Tabla 3. Eficiencias obtenidas para la mujer de acuerdo al contorno del tórax y el tamaño de la mama, para la energía 59,5 keV característica del ^{241}Am y de 185,7 keV característica del ^{235}U

Contorno de Tórax (cm)	Tamaño de la mama	Eficiencia (cps/Bq)	
		59,5 keV	185,7 keV
85	A	1,01E-02	1,19E-02
	B	8,6E-03	1,10E-02
	C	7,8E-03	1,04E-02
	D	7,5E-03	1,01E-02
	E	6,7E-03	9,3E-03
90	A	9,0E-03	1,14E-02
	B	7,9E-03	1,04E-02
	C	7,6E-03	1,01E-02
	D	7,2E-03	9,6E-03
	E	6,5E-03	9,1E-03
95	A	6,5E-03	7,7E-03
	B	6,2E-03	7,5E-03
	C	5,8E-03	7,1E-03
	D	5,2E-03	6,5E-03
	E	4,5E-03	5,8E-03
100	B	5,4E-03	7,3E-03
	C	4,9E-03	6,7E-03
	D	4,3E-03	6,2E-03
	E	4,0E-03	5,8E-03
	F	3,5E-03	5,2E-03
	105	B	5,2E-03
C		3,5E-03	4,7E-03
D		3,0E-03	4,2E-03
E		2,5E-03	3,6E-03
F		1,6E-03	2,4E-03
110		B	2,3E-03
	C	2,0E-03	3,2E-03
	D	1,7E-03	2,9E-03
	E	1,6E-03	2,7E-03
	F	1,4E-03	2,5E-03
	115	C	1,7E-03
D		1,2E-03	2,0E-03
E		1,1E-03	1,8E-03
F		7,0E-04	1,2E-03
120	C	8,0E-04	1,5E-03
	D	7,2E-04	1,4E-03
	E	6,3E-04	1,2E-03
	F	5,1E-04	1,0E-03

En la tabla 4 se muestran los resultados de los límites de detección (LD) obtenidos con el maniquí Livermore para cinco diferentes espesores de tórax, para las tres energías características del ^{235}U , y para el ^{241}Am :

Tabla 4. LD obtenidos con el maniquí Livermore para energías características del ^{235}U y ^{241}Am , para cinco espesores torácicos.

ETM (cm)*	LD (Bq)			
	143,76 keV	163,358 keV	185,72 keV	59,5 keV
1,638	2E+00	2E+00	2E+00	3E+00
2,351	3E+00	2E+00	3E+00	4E+00
2,958	3E+00	3E+00	3E+00	5E+00
3,295	3E+00	3E+00	4E+00	6E+00
3,871	3E+00	3E+00	4E+00	6E+00

*ETM: Espesor Torácico Muscular

En la figura 3 se presentan los datos experimentales de los LD en función del espesor del tórax para las tres energías características del ^{235}U y para el ^{241}Am , con las curvas de ajuste obtenidas para el maniquí Livermore.

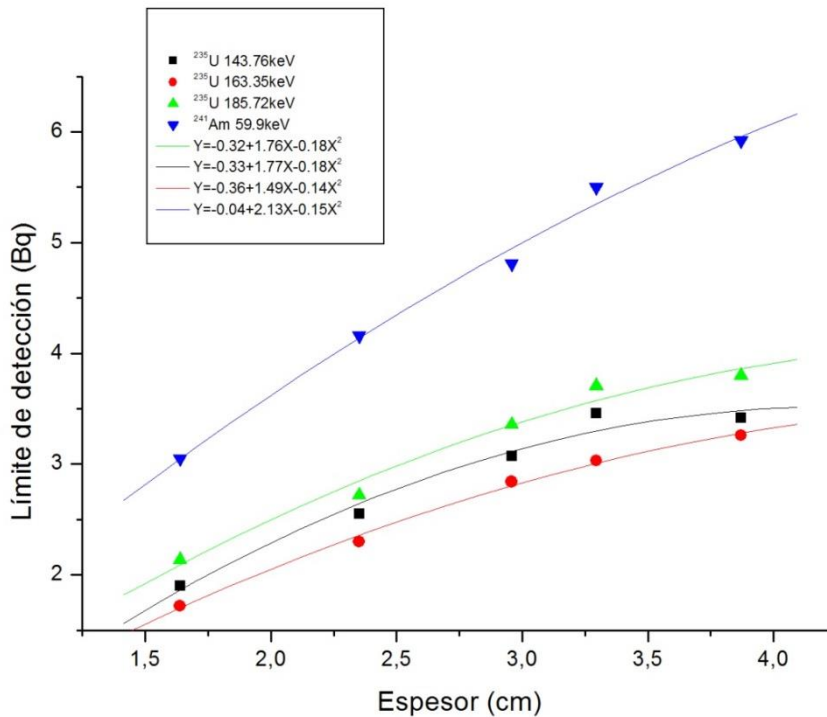


Figura 3. LD en función del espesor del tórax para energías características del ^{241}Am y ^{235}U con curvas de ajuste (R^2 entre 0,97 y 0,99)

En la tabla 5 se muestran los resultados del límite de detección hallados usando la expresión 3 para personas cuyo espesor de tórax se estimó en relación a su peso y altura (expresión 4) para las zonas de energías características del ^{235}U y el ^{241}Am . Además se muestra el LD estimado usando la curva obtenida para el maniquí.

Tabla 5. LD obtenidos con hombres voluntarios para energías características del ^{235}U y ^{241}Am y comparación con LD de maniquí Livermore

I*	Peso (kg)	Altura (cm)	ETM* (cm)	59,5 keV		143,76 keV		163,358 keV		185,72 keV	
				LD persona (Bq)	LD maniquí (Bq)	LD persona (Bq)	LD maniquí (Bq)	LD persona (Bq)	LD maniquí (Bq)	LD persona (Bq)	LD maniquí (Bq)
1	80	182	2,85	6E+00	5E+00	1E+01	4E+00	1E+01	3E+00	1E+01	4E+00
2	71	167	2,69	6E+00	5E+00	1E+01	4E+00	1E+01	3E+00	1E+01	4E+00
3	83	170	3,39	7E+00	6E+00	1E+01	4E+00	1E+01	4E+00	1E+01	4E+00
4	72	168	2,73	6E+00	5E+00	1E+01	4E+00	1E+01	3E+00	1E+01	4E+00

*I: Individuo, ETM: Espesor Torácico Muscular

Los límites de detección en la energía de 59,5 keV característica del ^{241}Am obtenidos con el maniquí Livermore son menores a los detectados con personas voluntarias no expuestas. Esto responde a la presencia de un mayor fondo en esta región energética que es esperable debido a que la radiación dispersa asociada al contenido natural en el cuerpo de otros radionucleidos (^{40}K y radiocesio) tiene una importante contribución en esta zona de energía. Por otro lado, los límites de detección en las energías características del ^{235}U obtenidos con el maniquí Livermore son mayores a los detectados con personas voluntarias no expuestas. Es por lo tanto relevante poder realizar la medición de fondo en cada trabajador.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de la calibración del sistema espectrométrico ACTII de la ARN para energías características del ^{235}U y el ^{241}Am , son adecuados y contribuyen a establecer programas adecuados de protección radiológica con la capacidad de detectar una exposición interna significativa a emisores alfa.

Se verifica que el sistema ACTII es apropiado para el control individual al ^{241}Am y al ^{235}U tanto de hombres como de mujeres, ya que la calibración realizada permitió obtener la eficiencia del sistema para el hombre en función de su espesor torácico y para la mujer en función del contorno de su tórax y tamaño de la mama.

Ante la necesidad de implementar el monitoreo individual de los trabajadores para el control de la exposición interna a ^{241}Am o al ^{235}U , es conveniente medir los fondos propios de las personas involucradas dentro del programa de vigilancia y obtener los límites de detección de

cada una. Sin embargo, en caso de no poder contar con estos fondos propios lo más conveniente es utilizar el fondo de una persona con similar contextura física.

El Laboratorio de Dosimetría Interna (LDI) de la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) de Argentina cuenta con la capacidad técnica y el equipamiento operativo para dar apoyo tanto en el diseño de los programas de monitoreo individual como en la medición directa para el control ocupacional en las tareas asociadas a la extensión de vida de la Central Nuclear de Embalse en situación rutinaria y asegurar una rápida respuesta ante una posible situación de emergencia.

5. REFERENCIAS

- [1] Chitu, C.; Popescu, I.; Baraitaru, M.; Nedelcu, A.; Simionov, V., “Occupational Exposure in a CANDU NPP: Management of the Risk for Internal Alpha Contamination”, *International Symposium for Nuclear Energy*, Bucharest, October (2011)
- [2] “Radiology Support devices: The Lawrence Livermore Realistic phantom” http://www.rsdphantoms.com/hp_lawrence.htm
- [3] Spinella, M. R; Krimer, M; Gregori, B. N; Rojo, A.M; “Eficiencia del sistema de detección de baja energía para la medición de ^{235}U en pulmón de la Autoridad Regulatoria Nuclear” *Memorias IRPA 2006*, CIC Acapulco (2006)
- [4] Canberra Industries, *Genie 2000-Spectroscopy System*, V3.2.1, USA (2009)
- [5] Farah, J.; Broggio, D.; Henriët, J.; Makovicka, L. and Franck, D. “Library of Mesh and NURBS female phantoms for pulmonary in vivo counting studies”, *13th International Congress of the International Radiation Protection Association*, Glasgow (2012)
- [6] ICRU Report 69, Direct determination of body content of radionuclides, Volume 3 N°1 (2003)
- [7] Kruchten, D. A.; Anderson, A. L, “Improved Ultrasonic Measurement Techniques Applied to Assay of Pu and others Transuranics in Lung”, *Health Physics*, **59** (1):117-123, July (1990)