

Espectroscopía gamma mediante la utilización de un centellador de NaI(Tl)

Daniel Bellot, Arturo Collado, Franco Pasian, Javier Portillo, Federico Turco
Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica, (8400) Bariloche, Argentina
 (Dated: 16 de abril de 2015)

Mediante la utilización de un detector fototubo con centellador de INa(Tl), se midió el espectro de radiación gamma de distintos elementos, y se determinaron los elementos radiactivos existentes en los mismos. Se encontró la presencia de ^{40}K en la sal light y en la radiación de fondo, así mismo se encontró ^{232}Th , ^{212}Pb , ^{228}Ac y ^{208}Tl en la camisa sol de noche. Se estudió una muestra de uranio-235 y se determinó la existencia de ^{231}Th además del mismo ^{235}U . Por otra parte, en una muestra de dióxido de uranio se determinó la presencia de ^{235}U , ^{238}U y ^{231}Th . Por último se midieron distintas arenas provenientes de playas de Brasil, midiendo la radiación del ^{232}Th , ^{212}Pb , ^{228}Ac y ^{208}Tl .

I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la interacción de la radiación con la materia es de gran importancia. Dichos conocimientos son de gran valor, no sólo como aporte en ciencia básica, sino también por la gran cantidad de aplicaciones, las cuales abarcan una gran diversidad de temas, desde tratamiento de diversas enfermedades, hasta protección de dispositivos espaciales. Un tipo de radiación de gran interés es la radiación gamma, compuesta por fotones de alta energía (algunos MeV). Su interacción con la materia se da a través de 3 fenómenos: Efecto fotoeléctrico, efecto Compton y creación de pares. El efecto fotoeléctrico es un tipo de interacción entre un fotón γ y un electrón ligado. Si el fotón tiene una energía mayor que la energía de ligadura, es decir $h\nu > E_{lig}$, este será completamente absorbido. El electrón, por su parte, será emitido con una energía correspondiente a $E_e = h\nu - E_{lig}$. Un esquema de este proceso puede verse en la figura 1. Teniendo en cuenta que las energías de ligadura son del orden de los eV se cumple que $h\nu \gg E_{lig}$, por lo que la energía de ligadura puede aproximarse según $E_{e-} \simeq h\nu$.

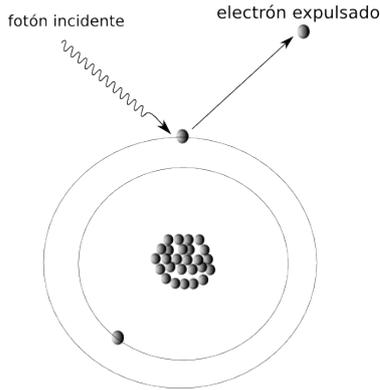


Figura 1. Esquema del efecto fotoeléctrico, el fotón incidente es totalmente absorbido por un electrón ligado.

El efecto Compton es un tipo de dispersión en la cual un fotón γ colisiona con un electrón y es dispersado un cierto ángulo θ . Parte de la energía del fotón incidente se transforma en energía cinética del electrón, mientras que el fotón dispersado se lleva la energía restante. Planteando la conservación de impulso y energía se puede llegar a [1] :

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos(\theta))} \quad (1)$$

donde $h\nu'$ es la energía del fotón dispersado y $\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2}$ es el cociente entre la energía del fotón incidente y la energía en reposo del electrón. En base a esto podemos llegar a una expresión para la energía del electrón [2] :

$$E_{e-} = \frac{2h\nu\alpha}{1 + 2\alpha + (1 + \alpha)^2 \tan^2\phi} \quad (2)$$

La energía máxima que puede ser transferida al electrón va a estar dada por [2]:

$$E_{e-}^{(max)} = \frac{2h\nu\alpha}{1 + 2\alpha} \quad (3)$$

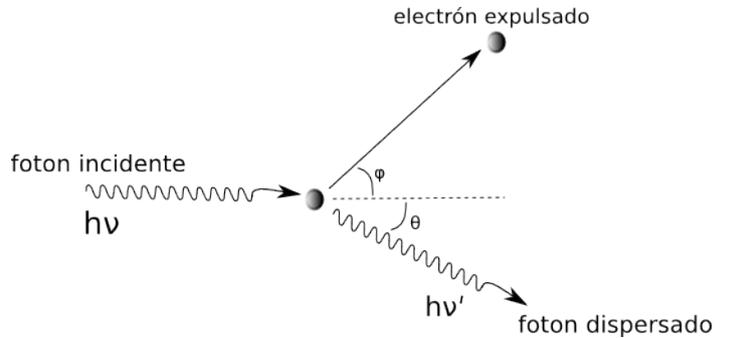


Figura 2. Esquema del efecto Compton, el fotón incidente es deflecionado por un electrón

Por último, la creación de pares consiste, como su nombre lo indica, en la creación de un par electrón-positrón a partir de un fotón γ . Para que este proceso sea energéticamente posible, la energía del rayo incidente debe ser mayor a dos veces la energía de la masa en reposo del electrón ($1,02\text{MeV}$). Si existe un exceso de energía del fotón " γ " respecto a este valor mínimo, esta se distribuirá en energía cinética de las partículas creadas.

En el presente trabajo tenemos como objetivo la medición de los espectros de radiación de diversas muestras cuyas composiciones son desconocidas. Se tratará de identificar los posibles isótopos correspondientes a los diferentes picos observados. También nos familiarizaremos con los diferentes instrumentos de medición y el programa de adquisición de datos MAESTRO.

II. MÉTODO EXPERIMENTAL

Para la detección de la radiación γ se utilizó un fototubo. Este consiste en un centellador de Yoduro de Sodio dopado con Talio (NaI(Tl)) junto con un fotomultiplicador, como se muestra en la figura 3.

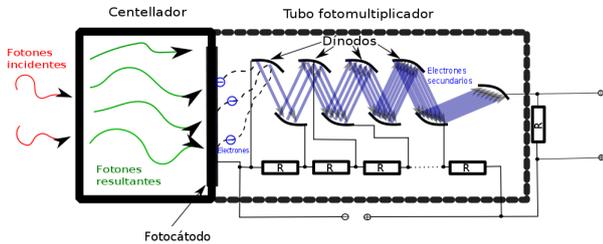


Figura 3. Detector de radiación gamma denominado fototubo. Consiste en un centellador y un fotomultiplicador.

La función del centellador es generar fotones en el espectro visible a partir de los fotones γ incidentes, dado que estos últimos no interactúan con el fotocátodo. Esto se logra dado que al incidir radiación γ sobre el material (NaI(Tl)) excita a los electrones de valencia, que en el proceso de desexcitación se emiten fotones de mayor longitud de onda que los incidentes y de menor energía.

Los fotones generados en el centellador inciden en el fotocátodo que por efecto fotoeléctrico se producen electrones. La cantidad de electrones emitidos es proporcional a la cantidad de fotones incidentes. La cadena de dinodos en el fotomultiplicador permite amplificar el número de electrones y obtener una corriente eléctrica proporcional a la energía de radiación.

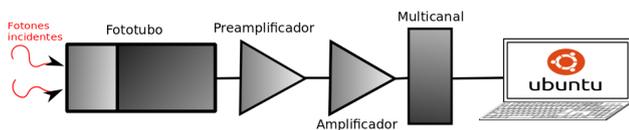


Figura 4. Esquema del sistema de adquisición. El fototubo es conectado a un pre amplificador seguido de un amplificador. Luego el multicanal entrega la señal procesada a la computadora.

El fototubo se encuentra conectado a un pre amplificador el cual integra la señal siendo la intensidad de salida proporcional a la energía incidente. Luego de esto un amplificador recibe la señal y se genera una señal digital la cual es entregada a un multicanal (fig. 4). El multicanal reparte la señal a distintos canales dependiendo de la altura de los pulsos digitales. Siendo número del canal de salida proporcional a la energía de la radiación. La cantidad de pulsos se denomina *número de cuentas*. Esta información digital es entregada a una computadora para la adquisición de los datos con un programa llamado MAESTRO.

En la figura 5 se muestra un espectro típico de radiación producido por una fuente de rayos γ . En ésta se presenta el número de cuentas en función del número del canal. Se observa un pico denominado *fotopico*, el cual está ubicado en el canal correspondiente a la energía de los fotones γ emitidos por la fuente. El detector almacenará una cuenta

en ese canal siempre y cuando el fotón que llegue al centellador deposite toda su energía en él; esto ocurrirá siempre que se produzca efecto fotoeléctrico. Por otra parte puede resultar que el fotón no deposite toda su energía, esto ocurrirá siempre que se produzca efecto Compton. Las energías depositadas por efecto Compton varían de un valor mínimo ubicado en el *pico de Backscattering* a un valor máximo ubicado en el codo Compton (fig. 5) de manera continua. También puede ocurrir que un mismo fotón produzca varias veces efecto Compton (Compton múltiple) pudiéndose depositar mayor energía que la indicada en el codo Compton.

Por último existen algunos efectos como ser ruido térmico o posibles reacciones que se produzcan en materiales cercanos al detector que pueden producir fotones de rayos X (fig. 5) al interactuar con los γ de la fuente.

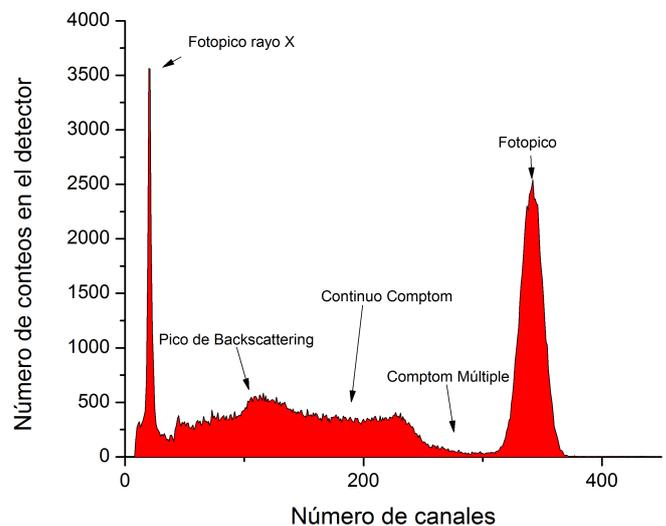


Figura 5. Espectro típico de radiación obtenido mediante el sistema de adquisición.

Para la calibración del sistema de adquisición se utilizaron distintas fuentes de radiación γ de energías conocidas, siendo estas ^{137}Cs , ^{60}Co y ^{133}Ba . Las fuentes radiactivas fueron ubicadas frente al detector durante un tiempo de 300 segundos en cada medición. El resultado de la calibración puede verse en la figura 7. Para determinar los fotopicos de los espectros se restó el fondo (ver figura /reffondo) medido durante 300 segundos.

Por último, se midió la radiación emitida por distintas muestras durante 300 segundos. Las muestras utilizadas fueron un paquete KCl (sal de mesa light), una muestra de ^{235}U , UO_2 dióxido de uranio, arena adquirida de playas de Brasil, una camisa de sol de noche, y un trozo de madera fosilizada.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 8 se observan los espectros de radiación correspondientes a una muestra de uranio natural (dióxido de uranio) y una muestra de uranio enriquecido (U-235). Se identificaron los principales picos del espectro asignan-

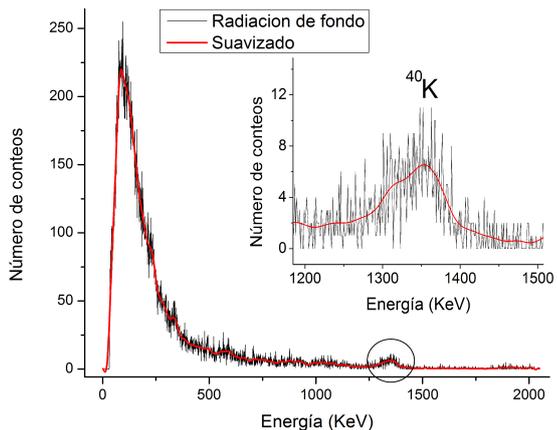


Figura 6. Espectro de la radiación de fondo. Se observa la presencia de ⁴⁰K en el ambiente.

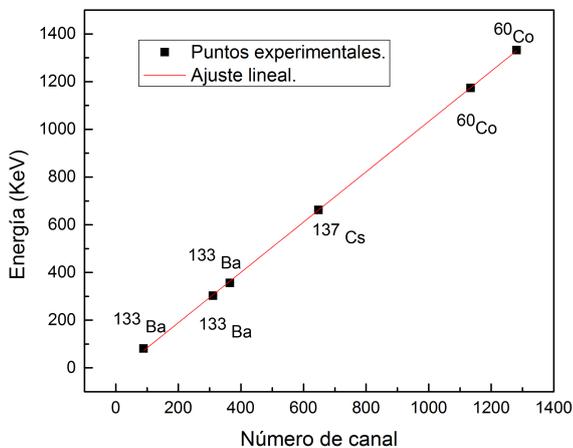


Figura 7. Calibración de energía versus número de canal realizada con fuentes de ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co y ¹³³Ba. El ajuste de los datos se realizó mediante una recta del tipo $E=m*\text{canal}+n$, obteniéndose los valores $a = 1,05 \pm 0,01$ y $b = -22 \pm 5$

doles una determinada energía dada la recta de calibración (Fig. 7). El error en los valores de las energías se detalla en el apéndice.

Se procedió a determinar los posibles elementos radiactivos que componen a las muestras con isótopos radioactivos desconocidas. Se comparó la energía de los picos observados con la energía de los fotones γ emitidos en distintas reacciones de fisión [3]. Se pudo verificar que la energía de los picos obtenidos en el espectro del uranio enriquecido coinciden con algunos de los isótopos del Uranio-235 y del Torio-231, ver tabla (I).

En las figuras 9 y 10 se observan los espectros correspondientes a dos muestras de arena extraídas de distintas playas de Brasil y una muestra de camisa de sol de noche. Los picos detectados en los 3 casos pudieron ser asociados a distintos componentes de la cadena del Torio (Tabla 1). Se puede observar que a pesar de la similitud entre ambos espectros de las arenas, existen diferencias en algunas regiones. Dichas diferencias podrían deberse a la presen-

cia de otros elementos radiactivos, pero que no pudieron ser caracterizados debido a la baja intensidad de los picos

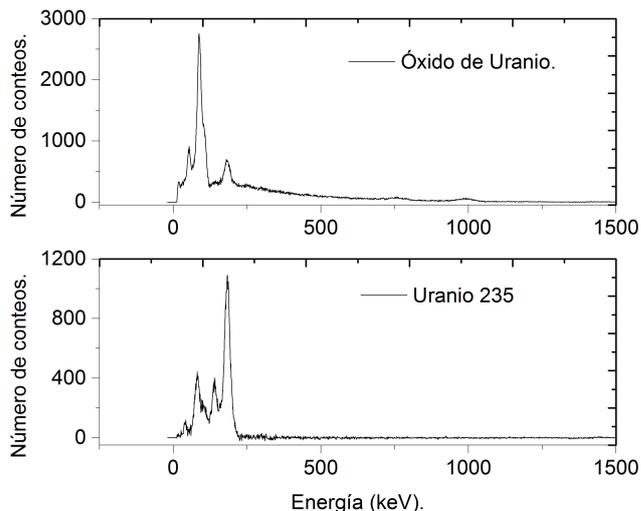


Figura 8. Espectro de radiación para muestras de uranio enriquecido y dióxido de Uranio natural. En las figuras se pueden apreciar los diferentes picos de las muestras.

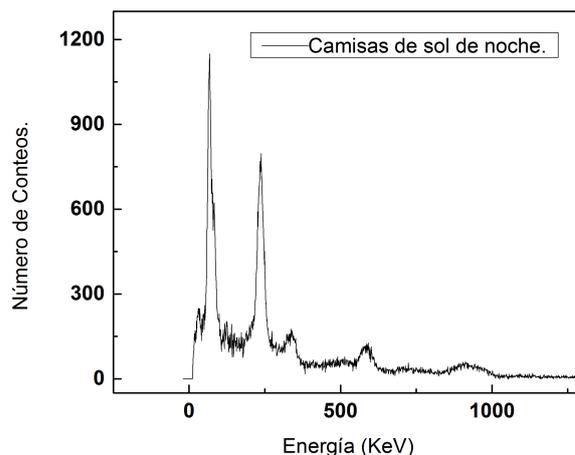


Figura 9. Espectro de radiación para la muestra de la camisa de sol de noche

producidos por estos.

IV. CONCLUSIONES

Se calibró el detector centellador mediante las mediciones de muestras conocidas. Se estudiaron y graficaron los espectros de radiación de diferentes materiales, entre ellos las llamadas camisas de sol de noche. Para estas últimas se logró identificar los isótopos que se corresponden a las energías de los gammas observados. En el caso de la sal light se observó la presencia del isótopo K-40.

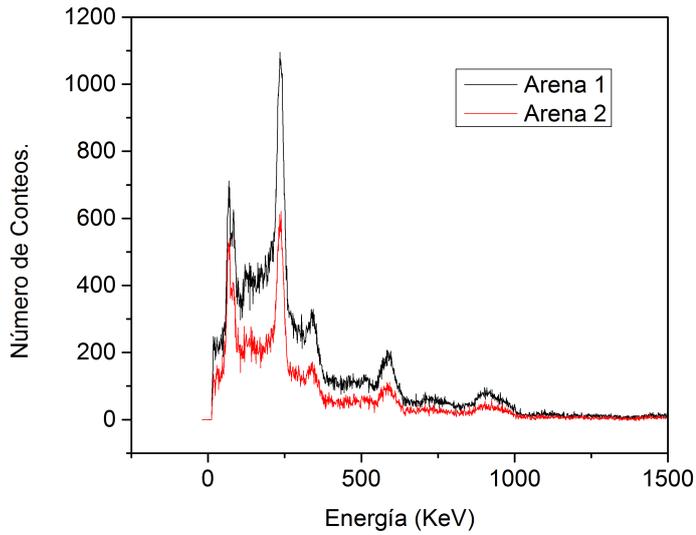


Figura 10. Espectro de radiación de dos muestras de arena recolectada en playas de Brasil. Se observan pequeñas diferencias en algunas regiones.

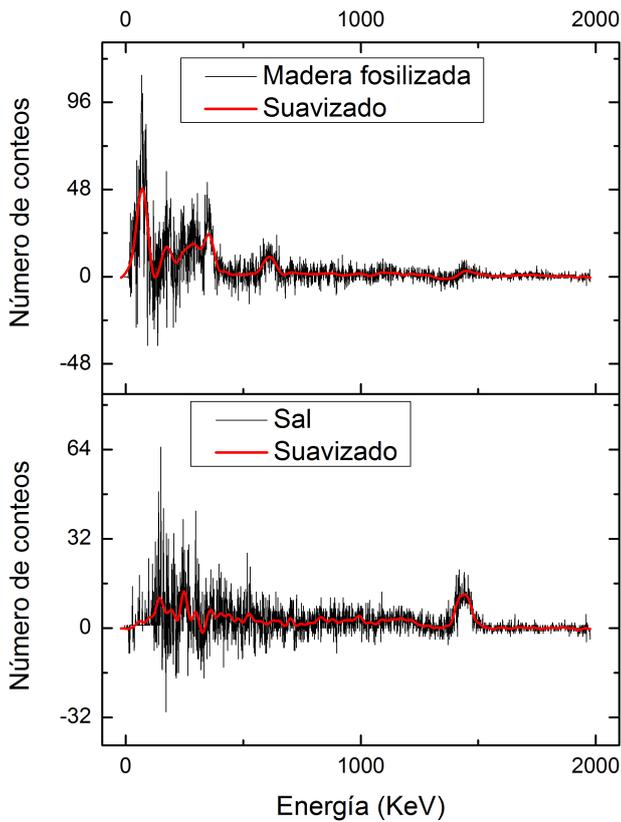


Figura 11. Espectro de radiación para muestras de sal light y madera fosilizada, para esta se pudo observar la presencia de varios picos mediante la realización de un suavizado, el cual se observa en la figura. Para la sal light se detectó presencia de ^{40}K .

Muestra	Energía pico (KeV)	Elementos posibles
Uranio 235	84 ±6	th-231
	140 ±7	U-235
	182 ±7	U-235
Dioxido de Uranio	54 ±6	U-238
	86 ±7	th-231
	182 ±7	U-235
Camisa	69 ±6	Th-232
	235 ±8	Pb-212
	340 ±9	Ac-228
	592 ±11	Tl-208
	911 ±14	Ac-228
Arena	69 ±6	Th-232
	236 ±8	Pb-212
	325 ±9	Ac-228
	588 ±11	Tl-208
Sal light	1460 ±19	K-40

Tabla I. Valores de energía obtenidos de los espectros para las distintas muestras medidas.

- [1] Rodrigo Bonazzola, Mauricio Montellano Durán, Hernán Saraceni, Alberto Villagrán, “Espectroscopía gamma utilizando un centellador de NaI”, Instituto Balseiro - Universidad de Cuyo. Páginas 1-2.
- [2] Di Paolo Agustín, Fabre Ignacio, Mangussi Franco, y Sesin Pablo Ezequiel, “Espectroscopía Gamma de baja resolución utilizando un centellador de NaI(Tl)”, Instituto Balseiro - Universidad de Cuyo. Páginas 1-2.
- [3] <http://ie.lbl.gov/decay.html>

Apéndice A: Determinación del error en la energía a partir de la recta de calibración.

La relación entre número de canal y energía es lineal y se puede escribir de la siguiente forma:

$$E = mx + n \quad (A1)$$

donde m, n son la pendiente y el intercepto con el eje de la energía de la recta de calibración (Fig. 7), el valor de x se corresponde a los canales. Una manera de estudiar los errores en la energía a partir de este ajuste se muestra a continuación:

$$E + \Delta E = (m + \Delta m)(x + \Delta x) + n + \Delta n \quad (A2)$$

donde ΔE , Δm , Δx , Δn son las incertezas de la energía, la pendiente, los canales y el intercepto respectivamente. Realizando un poco de álgebra elemental se llega a que el error en la energía es:

$$\Delta E = x\Delta m + \Delta n + m\Delta x + \Delta x\Delta m \quad (A3)$$

Para determinar el error de los canales, se utilizó el criterio del 10

Apéndice B: Exposición a la radiación durante el experimento.

A fin de tener una perspectiva sobre los efectos en la salud causados por la exposición a la radiación durante el experimento, se realizó un cálculo de la dosis de radiación absorbida.

1. Criterio para el cálculo de la dosis.

Se define *dosis absorbida* como “el valor esperado de la energía impartida a la materia por unidad de masa”.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (B1)$$

Para obtener la energía es necesario considerar el flujo de las fuentes que se usaron. En el caso especial de una fuente monoenergética, la expresión para el flujo por unidad de área es:

$$\Phi_E = E \frac{dN}{da} \quad (B2)$$

Donde N es el número de fotones que atraviesan el elemento de área da , siendo E la energía de cada fotón. Para un determinado medio, de densidad ρ y coeficiente de atenuación lineal μ , la relación entre la dosis absorbida y el flujo de energía es:

$$D = \Phi_E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_E \quad (B3)$$

La cantidad $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)$ es llamada coeficiente másico de absorción energética, y determina la cantidad de energía que se transfiere al medio por parte de la radiación de energía E .

Para estimar la dosis en función del tiempo de exposición es necesario conocer la variación temporal del flujo energético.

$$\frac{d\Phi_E}{dt} = E \frac{dN}{da dt} \quad (\text{B4})$$

pero $\frac{dN}{dt}$ es la actividad de la fuente con energía E , de modo que la variación temporal de la dosis por unidad de área es, asumiendo una fuente puntual e isotrópica a una distancia r :

$$\frac{d}{dt}D = E \frac{A_E}{4\pi r^2} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_E \quad (\text{B5})$$

2. Estimación de la dosis absorbida.

Usando la fórmula anteriormente expuesta es posible calcular la dosis por unidad de área sobre un determinado material en un determinado intervalo temporal debido a una fuente monoenergética de actividad A_E . Es necesario mencionar que no todos los isótopos radioactivos usados en el experimento se pueden considerar fuentes monoenergéticas, ya que poseen más de un pico de energía, por otra parte, la actividad de referencia para las fuentes usadas en el laboratorio no discrimina las contribuciones debidas a energías diferentes. Para realizar un cálculo exacto de la dosis recibida, además de tener la actividad de cada pico

de energía, sería necesario tener el coeficiente $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)$ específico para cada tejido vivo y cada energía emitida. Los dosis presentadas a continuación son estimaciones que usan el coeficiente de absorción del agua en lugar de los tejidos vivos, se usan los valores disponibles en tablas más aproximados a las energías usadas para el cálculo. Se consideran solo las dosis resultado de la manipulación de las fuentes de Bario 133, Cesio 137 y Cobalto 60. Para el Cesio se usó un solo pico de energía, para el Cobalto se usaron dos, y para el Bario se usaron tres. Los coeficientes de absorción del agua se tomaron de las tablas publicadas en el sitio del NIST (National Institute of Standards and Technology).

Isótopo	Actividad (11-03-2015)	Distancia	Exposición	Dosis
Cs137	191718 Bq	1 m	1 hora	0.01623 $\mu\text{J}/\text{kg}$
Co60	4400 Bq	1 m	1 hora	0.00153 $\mu\text{J}/\text{kg}$
Ba133	46681 Bq	1 m	1 hora	0.00208 $\mu\text{J}/\text{kg}$

Como es posible notar, los valores de las dosis son inferiores a la dosis equivalente de una banana (0.1 μSv), lo cual indica que el efecto en la salud provocado por el experimento es mínimo, ya que la exposición a la radiación no es significativamente superior a la de otras actividades diarias.