

## Herramienta basada en código abierto para el cálculo de blindaje en las instalaciones de Medicina Nuclear

### Open Source Based Tool for Shielding Calculation in Nuclear Medicine Installations

Karla Batista García-Ramó<sup>1\*</sup> 0000-0003-1042-7369

Jorge Luis Domínguez Martínez<sup>2</sup> 0000-0003-0869-8725

Adlín López Díaz, DrC<sup>2</sup> 0000-0002-1020-8775

Ángel Águila Ruiz<sup>1</sup> 0000-0002-8166-5877

Consuelo Varela Corona<sup>3</sup> 0000-0002-0270-4082

<sup>1</sup> Departamento de Medicina Nuclear, Centro Internacional de Restauración Neurológica, La Habana, Cuba.

<sup>2</sup> Departamento de Medicina Nuclear, Hospital Hermanos Ameijeiras, La Habana, Cuba.

<sup>3</sup> Centro Estatal de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos, La Habana, Cuba.

\* Autor para la correspondencia: [karlabg@infomed.sld.cu](mailto:karlabg@infomed.sld.cu)

#### RESUMEN

Uno de los requerimientos indispensables en el diseño de las instalaciones donde se trabaja con radiación ionizante es la determinación del espesor adecuado de las paredes, pisos, techo y puertas de los locales, que garanticen dosis por debajo de las restricciones establecidas por la autoridad regulatoria. El objetivo del presente trabajo es desarrollar una herramienta interactiva, libre y de código abierto para calcular los blindajes requeridos en una instalación de Medicina Nuclear. En el código, desarrollado en Python utilizando el entorno interactivo Jupiter Notebook, se incluyó el análisis tanto para Tomografía por Emisión de Fotón Único como para Tomografía por Emisión de Positrones. La herramienta fue implementada para el cálculo de los blindajes de un departamento de Medicina Nuclear del Centro Internacional de Restauración Neurológica (CIREN). Esta herramienta libre y de código abierto facilita los cálculos de blindaje aumentando la velocidad, lo que contribuye a lograr una optimización de la protección radiológica, pero también puede usarse como herramienta pedagógica.

**Palabras clave:** Código libre y abierto; cálculo de blindaje; protección radiológica.

#### ABSTRACT

One of the indispensable requirements in the design of the facilities where ionizing radiation is used is the determination of the adequate thickness of the walls, floors, ceiling and doors of the premises, which guarantee doses below the restrictions established by the regulatory authority.. The goal of this work is to develop an interactive, free and open source tool to calculate the shields required in a Nuclear Medicine installation. Analysis for both Single Photon Emission Tomography

and Positron Emission Tomography was included in the code, developed in Python using the interactive Jupiter Notebook environment. The tool was implemented to calculate the shields of a Nuclear Medicine department of the International Center for Neurological Restoration (CIREN). This free and open source tool facilitates shielding calculations by increasing speed, which contributes to the optimization of radiation protection, but can also be used as a pedagogical tool.

**Keywords:** free and open source tool; shielding calculation; radiation protection.

## Introducción

La medicina nuclear (MN) es una especialidad médica terapéutica o de diagnóstico por imágenes de tipo funcional-molecular que emplea fuentes no selladas. En el caso de los procedimientos diagnósticos, un elemento radiactivo suele administrarse unido a una sustancia que será captada específicamente por algún tejido o sistema del organismo. Estos elementos radiactivos suelen ser isótopos de periodo de semidesintegración corto que emiten radiación gamma o positrones, de una vida media corta (horas o días) y de baja energía relativa (lo que da seguridad en su uso). El trazador radiactivo (radiofármaco) se administra al paciente por vía intravenosa, oral o por otras vías, según el órgano y la función del mismo a examinar. Por tanto, en MN se deben aplicar los principios generales de protección radiológica<sup>(1,2)</sup> y garantizar la seguridad desde el momento en que se recibe el radiofármaco, durante su preparación, fraccionamiento, administración al paciente y adquisición de imágenes. También se deben tener en cuenta el almacenamiento, transporte y manejo del gasto de material radiactivo.

Durante el diseño de las instalaciones donde se trabaja con radiación ionizante uno de los requerimientos indispensable es la determinación del espesor adecuado de las paredes, pisos, techo y puerta de los locales tomando diferentes consideraciones para cada tipo de instalación, asegurando que las dosis y tasas de dosis se encuentren por debajo de las restricciones de dosis que establece la autoridad regulatoria para los trabajadores ocupacionalmente expuesto (TOE) y público<sup>(3)</sup>. En la exposición a la radiación y otros riesgos de salud ocupacional debe aplicarse el principio “tan bajo como razonablemente alcanzable” (ALARA del inglés *As Low As Reasonably Achievable*). Se han desarrollado algunos métodos para el cálculo de blindaje pero aún se requieren mejoras en la velocidad y eficiencia de la implementación de dichos métodos para lograr un diseño del blindaje rentable con una optimización del tiempo y costo.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una herramienta interactiva, libre y de código abierto para calcular los blindajes requeridos en una instalación de Medicina Nuclear. El código incluye el análisis tanto para Tomografía por Emisión de Fotón Único (SPECT del inglés *Single Photon Emission Computed Tomography*) como para Tomografía por Emisión de Positrones (PET del inglés *Photon Emission Tomography*) y se desarrolla en Python pero utilizando el entorno interactivo Jupyter Notebook (<http://jupyter.org>). Esto permite integrar toda la información sobre la metodología seguida para los cálculos de blindaje, incluyendo ecuaciones, figuras y gráficas. Además, permite introducir de forma interactiva las características de las fuentes y puntos a considerar, modificarlos o adicionar código para un análisis más profundo en caso de que se requiera. Constituye una herramienta libre y de código abierto que facilita los cálculos de blindaje aumentando la velocidad, pero también puede usarse como herramienta pedagógica. Todo esto contribuye a lograr una optimización de la protección radiológica.

La herramienta desarrollada se implementó en el cálculo de los blindajes de un nuevo departamento de Medicina Nuclear para el Centro Internacional de Restauración Neurológica (CIREN, Cuba). Durante el diseño de la instalación se consideraron los requisitos de seguridad, como demarcación de áreas controladas y no controladas y las restricciones de dosis<sup>(3-5)</sup>. Un área controlada es una zona de acceso limitado en la que la exposición laboral del personal a la radiación está bajo la supervisión de un individuo a cargo de la protección radiológica. Esto implica que el acceso, la ocupación y las condiciones de trabajo se controlan con fines de protección radiológica.

## Métodos

### Cálculo de blindaje

Un punto clave en el diseño de la instalación es asegurar que se limite las exposiciones a la radiación de los empleados y miembros del público a niveles aceptables. El blindaje es una barrera física con factor de transmisión B que absorbe parcialmente la radiación. Concretamente, B es el cociente entre el equivalente de dosis efectiva en un punto cuando no hay barrera interpuesta y el equivalente de dosis efectiva en ese mismo punto cuando existe una barrera de un cierto material y espesor x. Los cálculos de blindaje se basan en la aplicación de varios parámetros que incluyen la distancia (d), la carga de trabajo (W) y el factor de ocupación (T), así como la restricción de dosis en el área ocupada (P).<sup>(4,6,7)</sup> El objetivo de un cálculo de blindaje es determinar el grosor de la barrera que es suficiente para reducir la dosis en un área ocupada a un valor  $\leq P/T$ .

Sobre las bases expuestas anteriormente el esquema de cálculo consiste en:

1. Dada la carga de trabajo (W) y la distancia (d en metros), calcular la dosis ( $\mu\text{Sv/sem}$ ) sin blindaje en el área ocupada utilizando la siguiente ecuación:

$$D = W * F_d * R_t / d^2 = \Gamma * A_0 * N * t * F_d * R_t / d^2 \quad (1)$$

donde N es la cantidad máxima de pacientes por semana,  $A_0$  es la actividad administrada en MBq, t es tiempo de permanencia en horas,  $F_d$  es factor de decaimiento del radiofármaco y  $R_t$  es factor de reducción:

$$F_d = e^{\frac{-0.693t}{T_{1/2}}} \quad (2)$$

$$R_t = \frac{1.44 T_{1/2}}{t} (1 - e^{\frac{-0.693t}{T_{1/2}}}) \quad (3)$$

2. A partir de la dosis calculada sin blindaje y el factor de ocupación (T) y la restricción de dosis (P en  $\mu\text{Sv/sem}$ ) establecidos, calcular el factor de transmisión:

$$B = \frac{P}{D * T} \quad (4)$$

3. Una vez calculado el factor de transmisión B, determinar el grosor de la barrera utilizando uno de los siguientes métodos:

*Método 1 para calcular el espesor:*

El espesor del material de blindaje se puede determinar por medio de la expresión de la capa decireductora (TVL del inglés *Tenth-Value Layer*) (ecuación 5), o también

puede utilizarse los valores de la capa hemireductora (HVL del inglés *Half-Value Layer*) (ecuación 6):

$$X = \log_{10}\left(\frac{1}{B}\right) TVL \quad (5)$$

$$X = \log_2\left(\frac{1}{B}\right) HVL \quad (6)$$

#### *Método 2 para calcular el espesor:*

El espesor necesario también se puede obtener aplicando la ecuación de Acher<sup>(8)</sup>. Para una barrera de un material de parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  para la energía de la radiación el espesor  $X$  se calcula:

$$X = \frac{1}{\alpha^* \gamma} \ln\left(\frac{B^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}}\right) \quad (7)$$

Los valores de alfa, beta y gamma están tabulados para las diferentes energías y distintos materiales.<sup>(4,7)</sup> En la herramienta desarrollada se incluyen estos valores para el plomo y concreto. Para el cálculo de la dosis, la ecuación 1 representa la fórmula general. Pero en dependencia de la dosis que se esté calculando, fuente, local y momento, se debe multiplicar la ecuación por otro factor, por ejemplo, por ciento de la actividad administrada al paciente que se elimina por excreción urinaria antes de la exploración.

### **Desarrollo de un código en un shell interactivo**

Se desarrolló un código en Python utilizando Jupyter Notebook, que es una interfaz web interactiva de código abierto que facilita la explicación y reproducción de los cálculos. El código permite calcular los blindajes requeridos para una instalación de Medicina Nuclear utilizando las ecuaciones 1 a 7, implementando la metodología expuesta en la sección anterior y que está explícitamente incluida en el código para guiar al usuario en cada paso. Se incluyen los tiempos de vida media y gamma para los isótopos  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{67}\text{Ga}$  y  $^{123}\text{Yn}$ <sup>(9-11)</sup>. No obstante, el código es abierto y permite adicionar cualquier otro dato. Para su implementación, el usuario debe introducir los datos referidos a la instalación, puntos de interés y fuentes, por ejemplo distancia, actividad, tiempo, etc. Una vez introducida la información, se calcula la dosis y los blindajes necesarios y se imprime el resultado por pantalla, aunque puede ser exportado en distintos formatos. El código permite tanto calcular el blindaje necesario al construir o reformar una instalación, como realizar el cálculo de la dosis para la actividad prevista con los blindajes diseñados, con el objetivo de verificar que son adecuados.

### **Diseño de un departamento de Medicina Nuclear e implementación de la herramienta para el cálculo del blindaje**

El código se implementó para el cálculo de blindaje durante el diseño inicial del nuevo departamento de Medicina Nuclear del CIREN. Para la ubicación de los diferentes locales dentro de la instalación se tuvieron en cuenta las tareas que se realicen en orden lógico y adecuado a la secuencia operacional (Fig. 1).

Los puntos donde se estimaron las dosis, corresponden a los puntos con las dosis máximas esperadas teniendo en cuenta la ubicación de las fuentes dentro de la instalación. Estos puntos se muestran en la figura 2. Para el cálculo de blindaje es necesario conocer las características del servicio, en este caso:

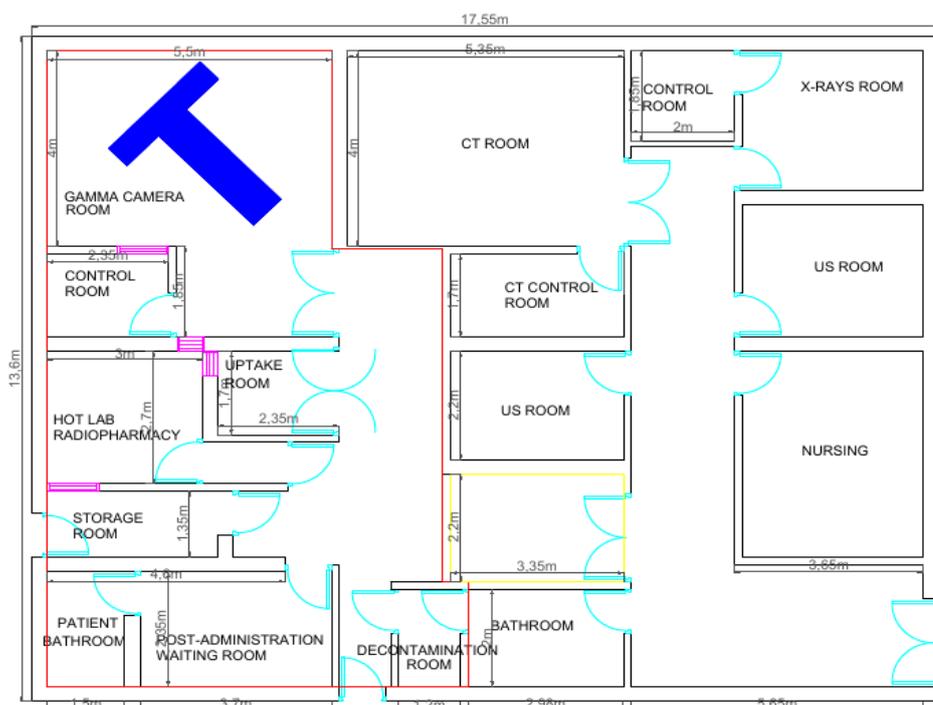
- El  $Tc^{99m}$  – MIBI y  $Tc^{99m}$  – ECD serán los radiofármacos que más se utilizarán. Se manejarán aproximadamente 40 pacientes semanales, con un máximo de 8 diarios, 5 días a la semana.
- Se recibirá un generador de 20 GBq por semana.
- Actividad máxima administrada por paciente: 30 mCi = 1110 MBq
- Tiempo máximo de espera en cuarto de espera: 120 min = 2 h
- Tiempo máximo de adquisición: 25 min = 0.34 h
- Para una fuente puntual de  $^{99m}Tc$ , la constante de tasa de dosis es  $\Gamma = 0.0197 \mu Sv m^2/MBq h$  (11). Sin embargo, el paciente presenta su propia atenuación y dispersión, que degradan la energía de los fotones que salen del mismo. Por tanto para el paciente se consideró  $\Gamma = 0.0075 \mu Sv m^2/MBq h$ .

Según lo establecido por regulaciones nacionales :

- Restricción de dosis TOE: 6 mSv/a = 0.12 mSv/sem = 120  $\mu Sv$ /sem
- Restricción de dosis público: 0.2 mSv/a = 0.004 mSv/sem = 4  $\mu Sv$ /sem
- Tiempo de trabajo: 50 sem/a = 5 días/sem = 8 h/día

## Resultados

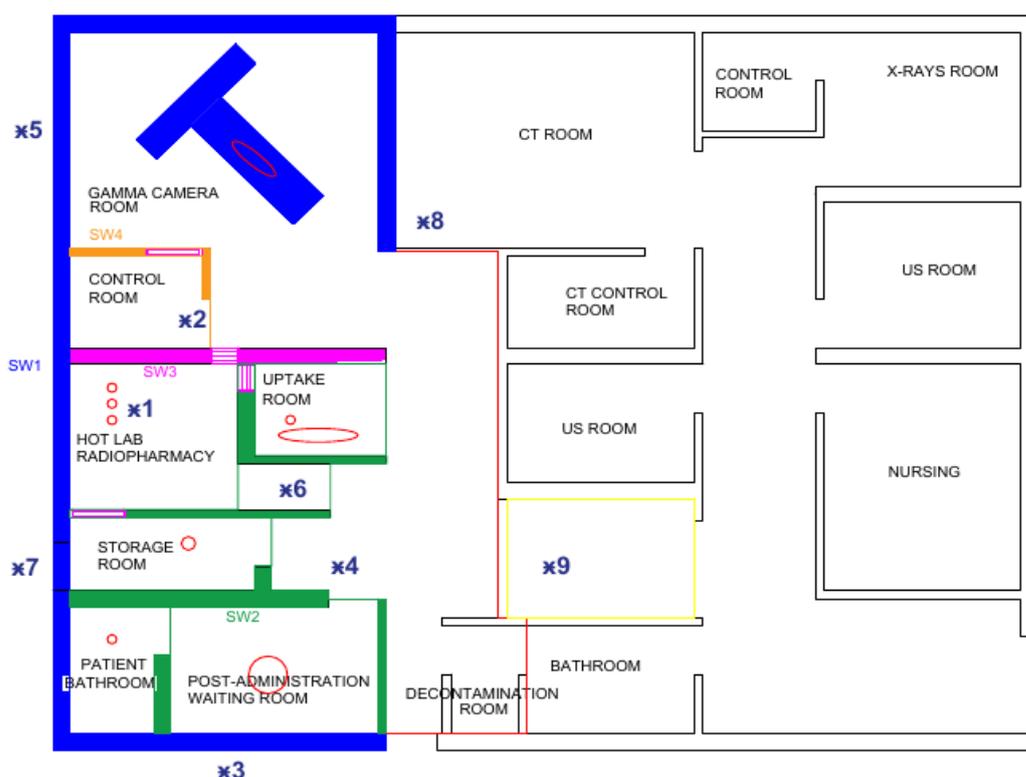
La Figura 1 muestra la ubicación de los diferentes locales del servicio de Medicina Nuclear teniendo en cuenta las consideraciones de diseño mencionadas. En la figura también se observa la limitación de la zona controlada (en rojo) y supervisada (en amarillo).



**Fig. 1-** Diagrama del departamento de Medicina Nuclear. La línea roja delimita el área controlada y la amarilla el área supervisada

En la Figura 1, los rectángulos rosados dibujados sobre las paredes representan los transfer (cajas de vidrio plomado). Esto permite que el operador almacene el radiotrazador en esta caja y sea recogido por la persona encargada de administrar el radiotrazador al paciente en los cuartos de captación, evitando que el operador tenga que ser transportado por los pasillos.

En la Figura 2 se ubican los puntos para el análisis junto con una representación esquemática de las fuentes. También se representan las paredes (en azul SW1, verde SW2 y rosado SW3) para las cuales es necesario calcular el espesor.



**Fig. 2-** Representación de las paredes necesarias a calcular sus espesores. Los círculos rojos constituyen una representación esquemática de la ubicación de las fuentes de actividad en los distintos locales. Los puntos para el análisis del cálculo de blindaje están representados por los números.

La tabla 1 muestra los resultados de los cálculos de la tasa de dosis semanal y la comprobación de la misma con los blindajes obtenidos en los diferentes puntos de interés representados en la figura 2.

**Tabla 1-** Tasa de dosis semanal, blindaje y verificación para diseño preliminar 1

Punto	Local	Factor de ocupación	Límite dosis (μSv/sem)	Dosis sin blindaje (μSv/sem)	Blindaje propuesto		Dosis con blindaje (μSv/sem)
					Campana	mm/cm	
1	Cuarto caliente	1/2	120	63981.67	Campana	20 mm	2.4
					SW2	15 cm	
					SW3	20 cm	
2	Local control	1	120	7300.57	Campana	20 mm	0.656
					SW2	15 cm	

					SW3	20 cm	
					BC4	2 mm	
3	Área exterior	1/4	4	663.54	Campana	20 mm	0.08
					SW1	20 cm	
					SW2	15 cm	
					SW3	20 cm	
4	Pasillo interior	1/5	120	1321.93	SW2	15 cm	7.06
5	Área exterior	1/4	4	2252.15	Campana	20 mm	0.01
					SW1	20 cm	
					SW3	20 cm	
6	Área exterior	1/4	4	3004.42	SW1	20 cm	2.8
7	Local TC	1/4	4	41.63	SW1	20 cm	0.04

Nota: Los valores en mm se refieren a plomo equivalente y en cm a concreto.

## Discusión

En el presente trabajo se propone una herramienta para el análisis y cálculo de blindaje para las instalaciones de Medicina Nuclear. Constituye un código libre y abierto lo que facilita que pueda ser utilizado y adaptado para cualquier nuevo diseño. La implementación del código en Jupyter Notebook permite aprovechar las ventajas de esta interfaz web que permite combinar código fuente, textos, fórmulas, figuras y multimedia en un solo documento. En el código desarrollado se integran diversos tipos de información (ecuaciones, conceptos, datos y código) y se proporcionan explicaciones sobre los cálculos para el blindaje. También el código incorpora las características de distintos isótopos y la metodología de cálculo tanto para PET como para SPECT. Adicionalmente, se implementaron dos métodos para el cálculo específico del espesor, uno basado en el TVL o HVL y el otro utilizando la ecuación de Archer <sup>(8)</sup>. Es opcional utilizar uno u otro método, o ambos pudiéndose comparar los resultados. Una vez calculado el espesor de blindaje requerido, en el código se incluye la función para comprobar la dosis con blindaje. Todos estos elementos junto con la ventaja de que constituye una herramienta interactiva le confieren también un valor pedagógico.

El diseño de la instalación de Medicina Nuclear para el CIREN se realizó teniendo en cuenta los requerimientos funcionales y de seguridad radiológica establecidos <sup>(2,12,13)</sup>. Estos cálculos de blindaje para el diseño preliminar fueron hechos a partir de suposiciones conservadoras, por ejemplo, para la estimación de la distancia entre las fuentes y los puntos de cálculo se ha asumido incidencia perpendicular de la radiación. También, algunos de los factores de ocupación fueron considerados más altos de los que posiblemente serán en la práctica. En caso de requerirse alguna modificación arquitectónica la herramienta permite actualizar todos los cálculos una vez realizado el cambio en el dato que corresponda. Los resultados mostrados en la Tabla 1 indican que la dosis recibida con el blindaje propuesto estaría por debajo de los límites establecidos por la entidad reguladora.

## Conclusiones

En el presente trabajo se propone una herramienta interactiva para el cálculo de blindaje de los servicios de Medicina Nuclear basado en un código libre y abierto. La intención es distribuir la aplicación de forma libre entre la comunidad nacional e internacional de radio-físicos, con lo que se espera pueda tener un impacto positivo, al ayudar a otros servicios en nuevas instalaciones de equipos, o como ayuda pedagógica, o en la comprobación de blindajes preexistentes a la hora de realizar una reforma.

## Referencias

1. Serencsits B, Quinn BM, Dauer LT. An Introduction to Radiation Protection. In: Radiopharmaceutical Chemistry. Springer; 2019. p. 515–29.
2. IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards [Internet]. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; 2014. (General Safety Requirements). Available from: <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>
3. ICRP. Publication 105. Radiation protection in medicine. Ann ICRP. 2007;37(6):1–63.
4. NCRP. Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities. Bethesda, Maryland: National Council on Radiation Protection and Measurements; 2004. Report No.: 147.
5. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Ann ICRP. 2007;37(2–4):1–332.
6. NCRP. Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities. Bethesda, Maryland: National Council on Radiation Protection and Measurements; 2005. Report No.: 151.
7. Madsen MT, Anderson JA, Halama JR, Kleck J, Simpkin DJ, Votaw JR, et al. AAPM Task Group 108: PET and PET/CT shielding requirements. Med Phys. 2006 Jan;33(1):4–15.
8. Archer BR, Fewell TR, Conway BJ, Quinn PW. Attenuation properties of diagnostic x-ray shielding materials. Med Phys. 1994;21(9):1499–507.
9. ICRU. Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry (Report 51). Washington D.C., USA: International Commission on Radiation Units & Measurements; 1993. Report No.: 51.
10. Eckerman K, Endo A. ICRP Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations. Ann ICRP. 2008;38(3):7–96.
11. Martin CJ, Sutton DG. Practical radiation protection in healthcare. Oxford University Press, USA; 2015.
12. CNSN. Guía de seguridad para la práctica de la medicina nuclear. Centro Nacional de Seguridad Nuclear, Cuba; 2011.
13. EPA. Radiation Guideline 7 Radiation shielding design assessment and verification requirements [Internet]. Sydney: The NSW Environment Protection Authority; 2015. Available from: [www.epa.nsw.gov.au/radiation](http://www.epa.nsw.gov.au/radiation).

### **Conflicto de interés**

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### **Declaración de Autoría**

K.B.GR escribió el código, participó en diseño de la instalación y redactó el artículo; J.L.D.M participó en la recopilación de los datos, revisión del código y redacción del artículo; A.L.D participó en el diseño de la instalación y redacción del artículo; A.A.R participó en el diseño de la instalación y redacción del artículo; C.V.C participó en la recopilación de los datos y redacción del artículo.