

## Estudio de la atenuación en concreto para un haz de un acelerador a 6 MV

### *Study of attenuation in concrete of an accelerator beam at 6 MV*

Julián Orlando Páez<sup>1</sup>, Wilmar Rodríguez<sup>2</sup>, Daniel Cano<sup>2</sup>

**Citación:** J. O. Páez, W. Rodríguez y D. Cano, “Estudio de la atenuación en concreto para un haz de un acelerador a 6 MV”, *Revista de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 6, pp. 81-89, 2022.

<https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.6.2022.660>

Revista Investigaciones y Aplicaciones  
Nucleares, 6, 81-89, 2022

Recibido: 4 de marzo de 2022

Aceptado: 15 de junio de 2022

Publicado en línea: 17 de agosto de 2022

DOI: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.6.2022.660>



Esta obra está bajo licencia internacional  
Creative Commons Reconocimiento 4.0.

### Resumen

Se realizó un análisis mediante simulación computacional de la atenuación de un haz de acelerador de 6 MV que atraviesa una barrera de blindaje de grosor variable y construida en concreto Portland. Se ajustó la atenuación como función del grosor y la curva encontrada se comparó con los mecanismos de ajuste propuestos por la IAEA y por el NCRP, con lo que se pone en evidencia la naturaleza conservativa de esos mecanismos. Las diferencias encontradas en el grosor de blindaje en este trabajo respecto a lo publicado en los reportes de la IAEA y el NCRP llegan a valores de más de 20 cm, lo cual sugiere la necesidad de mejorar los valores que son actualmente utilizados en los cálculos de blindaje, pues se podrían reducir costos de construcción sin sacrificar la confianza que tenemos en las barreras y con ello en la seguridad radiológica de los diferentes servicios de radioterapia.

**Palabras clave:** blindaje, espesor de blindaje, rayos X de megavoltaje, Monte Carlo.

### Abstract

By means of numerical simulation, an attenuation analysis was performed on a beam of a 6 MV accelerator passing through a shielding barrier of variable thickness and built in Portland concrete. The attenuation as a function of the thickness was fit to a curve. The curve was compared to the adjustment mechanisms proposed by IAEA and NCRP. With these results, the conservative nature of these mechanisms emerged. The differences found in the shielding thickness reach values of up to more than 20 cm, suggesting the need to improve the values currently used to carry out the calculations of the shielding. It can be concluded

<sup>1</sup> Maestría en Física Médica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup> Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Bogotá, Colombia.

Autor de correspondencia: Wilmar Rodríguez, [wrodriguez88@gmail.com](mailto:wrodriguez88@gmail.com)

that the construction costs could be reduced without sacrificing confidence in the barriers by improving the accuracy of such calculations.

**Keywords:** shielding, tenth value layer, megavoltage X rays, Monte Carlo.

## 1. Introducción

Los diferentes servicios de radioterapia externa, braquiterapia, imagenología con TC, etc., deben ser construidos considerando para su diseño un búnker que garantice la atenuación suficiente de la radiación proveniente, ya sea de forma directa (radiación primaria) por fuentes de radiación como los aceleradores, fuentes o tubos de rayos X con que se cuenten; o de manera indirecta (radiación secundaria), por dispersión en cualquier objeto con que interactúe dicha radiación primaria. Si se tiene en cuenta, por ejemplo, en un servicio de radioterapia, el búnker requerido consiste en el uso conjunto de una serie de elementos fundamentales como el equipo de radioterapia externa (LINAC), barreras primarias y secundarias, pasillo de ingreso y puerta al final.

El objetivo de posicionar barreras primarias es atenuar el haz que llega directamente del cabezal del acelerador, para proteger las zonas detrás de estas. Las barreras secundarias, que generalmente tienen grosores menores, tienen como propósito proveer el blindaje necesario para la radiación dispersa y de fuga en zonas donde la radiación no llega directamente, sino que lo hace por dispersión [1-2]. El pasillo no siempre se utiliza, pero al hacer parte del diseño busca disminuir la cantidad de blindaje requerido en la puerta, para hacerla más ligera y de más simple instalación y uso.

En general, el grosor de las barreras, ya sean primarias o secundarias, dependen del haz utilizado, su energía y el material para el blindaje. Así mismo, existe una dependencia de este grosor con el tipo de personal que se encuentre al otro lado de la barrera, así como del tiempo promedio que permanezcan allí y que la máquina dure encendida para una calidad de haz particular. Todo esto se tiene en cuenta, pues existen límites en las tasas de dosis que el personal puede recibir y son establecidos según esto [3-6]. Una vez se tiene claridad de estos parámetros, se debe determinar la cantidad de radiación que incide sobre cada barrera.

Siempre que un haz de fotones de alta energía, cualquiera sea su fuente, interactúa con un paciente o con las barreras

de blindaje puede hacerlo a través de varios mecanismos de interacción, como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton o la producción de pares [7-8]. Todos estos se dan con diferentes grados de probabilidad que están bien definidos, debido a la naturaleza de la misma interacción y que se pueden cuantificar mediante magnitudes como el coeficiente de absorción. Así mismo, si se asumen interacciones como la de efecto Compton, existirá una dispersión sobre el fotón incidente cuya probabilidad de aparición dependerá, además, del ángulo con que se disperse y se podrá determinar mediante expresiones como la propuesta por Oskar Klein y Yoshio Nishina [7-8].

Una vez comprendida la complejidad de los principios que rigen la física de los fenómenos de interacción radiación/materia, no es posible hacer cálculos exactos de manera manual y entonces se deben implementar aproximaciones conservativas para el proceso de cálculo manual de blindajes. Este, además de necesario en el diseño de áreas controladas, se realiza mediante el uso de un conjunto de expresiones matemáticas, resultado de aplicar una serie de aproximaciones conceptuales y numéricas. Dichas expresiones algebraicas involucran también una serie de parámetros que se pueden encontrar reportados en tablas que forman parte de algunos de los documentos desarrollados por las principales instituciones encargadas de regular y vigilar el correcto uso de radiaciones ionizantes. Algunos de esos conjuntos de expresiones, junto con los parámetros requeridos, se pueden encontrar en los reportes de la IAEA [1], el NCRP [2] y del IPEM [9].

Lo primero a considerar para el cálculo de blindajes consiste en determinar las cargas de trabajo a las que se someterá, así como la tasa de dosis a la que funcionará. Dado que el grosor de las barreras que se requieren depende de los límites de dosis que se quieren alcanzar, así como de las tasas de dosis instantáneas, se busca establecer las tasas de dosis en diferentes puntos de interés, fuera de las diferentes barreras primarias y secundarias. Esto se hace con el fin de contrastar los valores calculados con mediciones directas en estudios de dosimetría de área, una vez se haya llevado a cabo la instalación de la unidad de tratamiento.

En resumen, el trabajo consiste en determinar los factores de transmisión de barrera requeridos ( $B$ ), para con estos calcular el número de TVL (*tenth-value layer*: capa decarredutora, grosor o espesor de un material específico que atenúa a una décima parte la radiación incidente) necesarios del material elegido para construir el blindaje adecuado y así alcanzar los objetivos de diseño (ecuación 1). Es importante notar que el valor de TVL a usar dependerá del tipo de radiación a blindar: directa, dispersa o de fuga. Este trabajo se concentra en los TVL de radiación directa para barreras primarias.

$$\text{No. TVL} = \log_{10} \left( \frac{1}{B} \right) \quad (1)$$

Una vez se conoce el número de TVL requeridos para blindar de forma adecuada, se puede proceder a definir el material para su construcción. Así, mediante el uso de tablas como las propuestas por la IAEA en su reporte 47 [1], o el NCRP en su reporte 151 [2], se procede a determinar el grosor requerido (tabla 1). Por ejemplo, si se adopta lo propuesto por la IAEA y se determina que son requeridos 3 TVL para blindar la radiación primaria de un haz de 6 MV, entonces se concluiría que son necesarios 102,9 cm de concreto con densidad de  $2,35 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , o 29,4 cm de acero con densidad de  $7,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ .

Como se ilustra, se puede requerir más de una TVL para alcanzar el grado de atenuación suficiente para obtener niveles de radiación por debajo de los valores establecidos como límite, según el tipo de zona a proteger en las inmediaciones del búnker. La IAEA sugiere el uso de un único valor de gro-

sor, según el material del blindaje que se pretenda trabajar. Sin embargo, al respecto el NCRP realiza un análisis interesante en su reporte 151 [2], en el que muestra que el grosor de blindaje requerido puede expresarse mediante la ecuación 2:

$$t_{\text{barrier}} = TVL_1 + (n - 1)TVL_e \quad (2)$$

Donde  $TVL_1$  es la primera TVL que además corresponde a la de mayor tamaño respecto a las posteriores  $TVL_e$  ( $TVL_e$ ) también conocidas como TVL de equilibrio. La diferencia propuesta entre la  $TVL_1$  y la  $TVL_e$  se plantea debido a la existencia de cambios espectrales en la radiación, una vez ingresa en el material atenuador. Sin embargo, ahí está justamente el hecho que motiva el presente trabajo, pues intriga pensar si realmente ese  $TVL_e$  es único y, por tanto, a partir de la segunda TVL, no deberían existir diferencias entre una TVL y la posterior. En caso contrario, lo que se mostraría es que el NCRP propone un mecanismo de cálculo altamente conservativo que es susceptible a ser optimizado, aun cuando, a diferencia de la IAEA, realiza esta distinción entre TVL.

## 2. Metodología

Todos los cálculos se llevaron a cabo mediante la implementación de código tipo Monte Carlo en *Geant4* que se desarrolló para este propósito particular. *Geant4* es un *software* de simulación que, por métodos numéricos tipo Montecarlo, puede simular procesos físicos. A través de librerías diseñadas para describir dichos procesos físicos, es posible definir diferentes elementos químicos o compuestos de manera realista para así simular correctamente los fenómenos de in-

**Tabla 1.** Capas decarredutoras (TVL) para  $^{60}\text{Co}$  y otras energías de rayos X

a									b			
	Co-60 <sup>a</sup>	4MV <sup>b</sup>	6MV <sup>b</sup>	10MV <sup>b</sup>	15MV <sup>b</sup>	18MV <sup>b</sup>	20MV <sup>b</sup>	24MV <sup>b</sup>	Energía máxima (MeV) <sup>b</sup>	Material	TVL <sub>1</sub> (cm)	TVL <sub>e</sub> (cm)
TVL para concreto (densidad 2350 kg × m <sup>-3</sup> ) (en mm)												
Haz primario. Rayos gamma/rayos X	218	290	343	389	432	445	457	470	4	Concreto	35	30
Fuga de rayos gamma y X (90°)	218	254	279	305	330	330	343	356		Acero	9,9	9,9
										Plomo	5,7	5,7
TVL para acero (densidad 7800 kg × m <sup>-3</sup> ) (en mm)												
Haz primario. Rayos gamma/rayos X	71	91	98	105	108	111	111	107	6	Concreto	37	33
Fuga de rayos gamma y X (90°)	69	79	80	85	87	87	88	89		Acero	10	10
										Plomo	5,7	5,7
TVL para plomo (densidad 11 360 kg × m <sup>-3</sup> ) (en mm)												
Haz primario. Rayos gamma/rayos X	41	53	55	56	57	56	55	52				
Fuga de rayos gamma y X (90°)	40	47	45	46	47	47	49	51				

a) Datos de cobalto-60 de [2]; b) adaptado de Varian Associates. El TVL de los rayos X de fuga se basa en los cálculos de Nelson y LaRiviere [22].

Fuente: a) tomado de reporte 47 IAEA [1]; b) tomado de reporte 151 del NCRP [2].

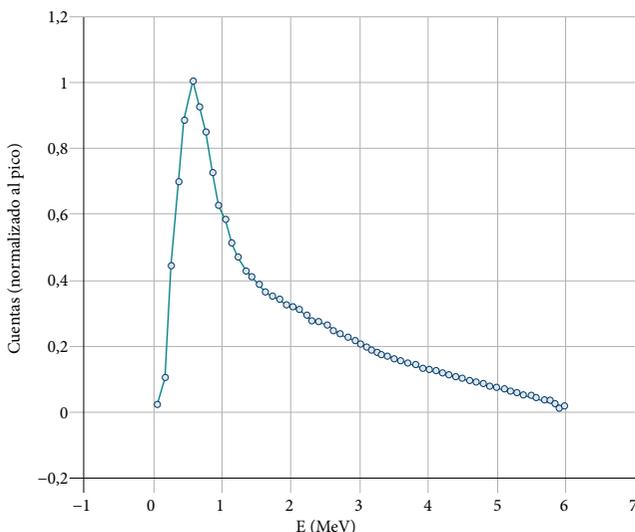
teracción radiación/materia. Dicho código fue ejecutado en una unidad de trabajo con ocho núcleos de procesamiento mediante un servidor.

Los parámetros de simulación utilizados pueden ser observados en la tabla 2. Estos fueron elegidos con el fin de proveer datos que fuesen confiables al buscar minimizar al máximo la incertidumbre de los mismos.

Se construyó y utilizó la simulación de un haz de fuente puntual divergente y cuyo espectro de energía corresponde al de un acelerador VarianClinac 21EX que se reporta en la bibliografía [9]. La construcción del código de simulación del haz mencionado fue posible mediante el uso de la clase G4GeneralParticleSource (GPS) de *Geant4* que permite especificar la distribución espectral, espacial y angular de partículas provenientes de una fuente primaria de radiación. En la figura 1 se observa el espectro energético del haz de acelerador para esta simulación que, como ya se mencionó, se obtuvo de lo reportado en la literatura [10].

**Tabla 2.** Parámetros de simulación empleados en cada corrida de la simulación construida

Parámetro de simulación	Valor/Forma de operación
Energía de corte	Una partícula secundaria es producida únicamente si su rango esperado es mayor a un milímetro
Número eventos	$1 \times 10^3$
Incertidumbre estadística	< 3%
Tiempo de cómputo por corrida	6 - 8h



**Figura 1.** Espectro de acelerador Varian Clinac21EX utilizado para los cálculos realizados [10]

Una vez se contaba con la parte del código que simulaba el haz de acelerador y que contenía la información del espectro, se procedió a construir la simulación completa que el experimento de atenuación requería. Es de resaltar que esto fue posible gracias a que *Geant4* utiliza como lenguaje de programación C++, el cual está orientado a objetos que pueden darse en bloques; por tanto, facilita una construcción por partes.

La configuración geométrica asociada a la simulación consistió en la fuente puntual divergente ya descrita, orientada en la dirección *z* que generaba un campo circular de tamaño equivalente a un campo cuadrado de 20 cm<sup>2</sup> a un metro de distancia (posición equivalente al isocentro de un acelerador). En dicha dirección se ubicaba una barrera (pared) en concreto Portland [11] (con densidad de  $2,2 \frac{g}{cm^3}$ ) y justo detrás de esta se posicionó un volumen detector. Se eligió el concreto Portland como material de atenuación debido a que es ampliamente usado en la construcción (y es fácil de conseguir) y debido a que fue posible conseguir su composición en una fuente de confianza como el NIST [11]. La densidad elegida da cuenta de una de las posibles densidades encontradas para este material.

El volumen detector tenía el objetivo de determinar la cantidad de dosis que podía entregar la radiación transmitida por la pared y se encontraba a una distancia de 6,3 m de la fuente puntual. El volumen detector consistía en un cilindro elíptico que simulaba la geometría usual de tórax, tal como lo hacen algunos fantomas matemáticos o físicos como el maniquí MIRD o el CIRS 002LFC con que se cuenta en la práctica clínica real. Las dimensiones elegidas para dicho volumen fueron de 20 cm × 40 cm × 60 cm. Si bien en el diseño de blindajes se establecen puntos de control en los que se determina dosis equivalente mediante cámaras de ionización que poseen dimensiones considerablemente más pequeñas, se eligieron las dimensiones del volumen detector con el fin de obtener una estadística apropiada de la cantidad de eventos que llegan a este, sin necesidad de aumentar la cantidad de eventos y con ello los requerimientos computacionales para ese fin. Adicionalmente, con el objetivo de obtener de manera directa la dosis sobre una persona al otro lado de la barrera el torso del fantoma MIRD resulta en una buena aproximación. Finalmente, considerando que el porcentaje de transmisión en una barrera se obtiene de la razón entre las medidas obtenidas con y sin barrera, se entiende

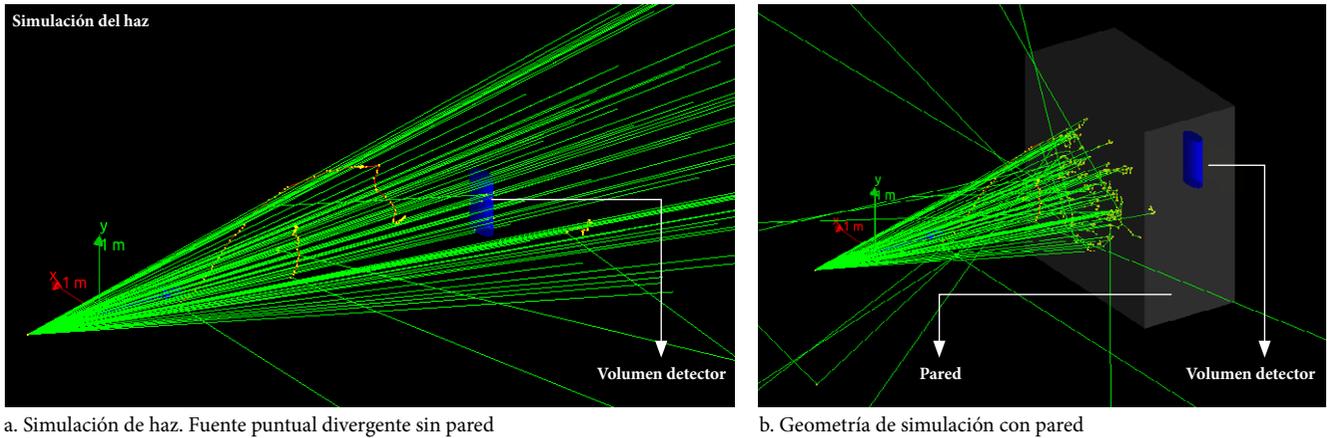


Figura 2. Geometría de simulación utilizada para la obtención de las curvas de atenuación

que el volumen del detector pasa a tener un efecto limitado que se compensa al conseguir una buena estadística en las medidas realizadas.

Gracias a la divergencia inherente al haz y la distancia al detector (cantidades cuya magnitud se eligió para que reprodujera coherentemente lo encontrado en la práctica clínica, pues reproduce un campo equivalente de  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  a un metro de la fuente) se obtuvo un cubrimiento total del detector incluso en ausencia de la barrera de blindaje (pared). Dicha configuración experimental puede observarse en la figura 2.

Con esta disposición experimental se procedió a realizar corridas de simulación que contaban con un total de  $1 \times 10^9$  eventos. En cada una se evaluaba la dosis depositada en el volumen detector para diferentes grosores de la barrera que variaban desde ausencia total de barrera hasta 150 cm de grosor de concreto. La composición del concreto Portland está reportada en la página del NIST [11].

Una vez se contaba con los valores de dosis depositados en el volumen para cada valor de grosor estudiado, se calcularon los porcentajes de transmisión en barrera mediante el uso de la ecuación 3:

$$\% \text{ transmisión} = \frac{\text{Dosis con barrera}}{\text{Dosis sin barrera}} \times 100 \quad (3)$$

Tras obtener los valores de porcentaje de transmisión como función del grosor de la barrera, se estableció la ecuación de ajuste que sería de la forma de la ecuación 4:

$$\% \text{ transmisión} = a + b^{-x/c} \quad (4)$$

A partir de esta es posible hallar el grosor de barrera requerido para obtener un porcentaje de transmisión específico mediante la ecuación 5, a partir de despeje simple de la ecuación 4:

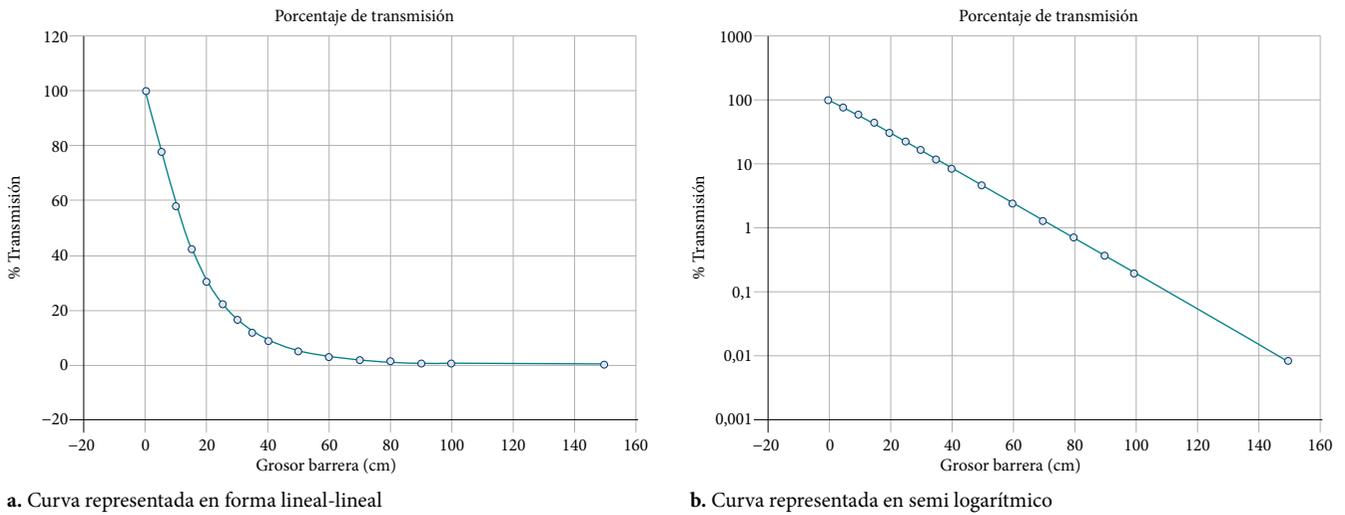
$$x = c \cdot \ln \left( \frac{b}{\% \text{ transmisión} - a} \right) \quad (5)$$

A estas medidas se les puede determinar la incertidumbre asociada mediante la ecuación 6 que corresponde con una propagación de errores expresada en forma general para una función  $z(x, y, \dots)$  [12]:

$$\Delta z = \sqrt{\left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 \Delta x^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \Delta y^2 + \dots} \quad (6)$$

### 3. Resultados y análisis

El desarrollo de este trabajo representó una serie de desafíos entre los cuales estuvo la construcción misma del haz de radiación y con ello la posibilidad de otorgarle las características de un haz real de acelerador. Esto como, ya se describió, fue posible solucionarlo gracias al conocimiento y uso de la clase G4GeneralParticleSource (GPS) de *Geant4*. Así mismo, con el fin de dar pertinencia y de generar una buena representación de la realidad práctica a simular, fue necesaria una búsqueda tanto bibliográfica como de trabajo de campo,



a. Curva representada en forma lineal-lineal

b. Curva representada en semi logarítmico

**Figura 3.** Curva de porcentaje de transmisión en función del grosor de la barrera (concreto de densidad de  $2,2 \frac{g}{cm^3}$ ) para acelerador Varian Clinac 21EX

para así identificar y utilizar el tipo y densidad de concreto más común por estar disponible comercialmente.

Una vez se contaba con los elementos necesarios para la construcción del código de simulación, se procedió a ejecutarlo, y con él realizar el cálculo de los diferentes % *transmisión* que se encontraban para diferentes valores del grosor de la barrera de concreto Portland construida [11]. Dicha barrera de concreto tenía asociada una densidad de  $2,2 \frac{g}{cm^3}$  y estaba dispuesta según la configuración experimental mostrada en la figura 2.

Gracias al hecho de utilizar una gran cantidad de eventos, se obtuvo incertidumbre de los datos que no superaban en ningún caso el 5 % (en todos los datos, salvo el del grosor

de 150 cm no se superó ni el 1 %). Los valores de incertidumbre más altos fueron para los de grosor de la barrera más grandes. Esto tiene sentido, ya que el número de partículas que logran llegar al detector tras superar ese blindaje es bastante reducido, debido a que se da una importante atenuación que lleva a obtener una estadística escasa en esos casos. Cada una de las corridas, que arrojaban como resultado un punto en nuestras curvas de atenuación, tardó entre 6,5 h y 8 h. Los resultados se pueden observar en la figura 3.

Para este resultado se realiza un ajuste que tiene la forma de la ecuación 4, para el cual se obtiene un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,999$  asociado.

$$\%transmisión = (-0,0020 \pm 0,0002) + (104,92 \pm 0,03) e^{-\frac{x}{15,87340 \pm 0,00001}} \quad (7)$$

Por tanto, para un porcentaje de transmisión particular, es posible obtener el valor del grosor de barrera requerido mediante la ecuación 5, reemplazando los respectivos coeficientes encontrados, así:

$$x = 15,8734 \cdot \ln\left(\frac{104,92}{\%transmisión + 0,0020}\right) cm$$

Y de allí, como ejemplo, para una TVL que tiene asociado un 10 % de transmisión se encuentra:

$$x = 15,8734 \cdot \ln\left(\frac{104,9173}{10 + 0,0020}\right) cm = 37,309 cm$$

Cuya incertidumbre asociada se determina mediante una propagación de errores de los diferentes coeficientes involucrados en la ecuación 6:

$$x = 0,005 cm$$

**Tabla 3.** Valores de grosor requeridos para obtener los diferentes porcentajes de transmisión usando para su ajuste la ecuación 4

% de transmisión	Grosor (cm)	Aumento en el grosor (cm)
10	37,309 ± 0,005	37,309 ± 0,005
1	73,831 ± 0,005	36,52 ± 0,1
0,1	110,102 ± 0,005	36,27 ± 0,01
0,01	144,110 ± 0,008	34,01 ± 0,01
0,001	166,24 ± 0,02	22,13 ± 0,03

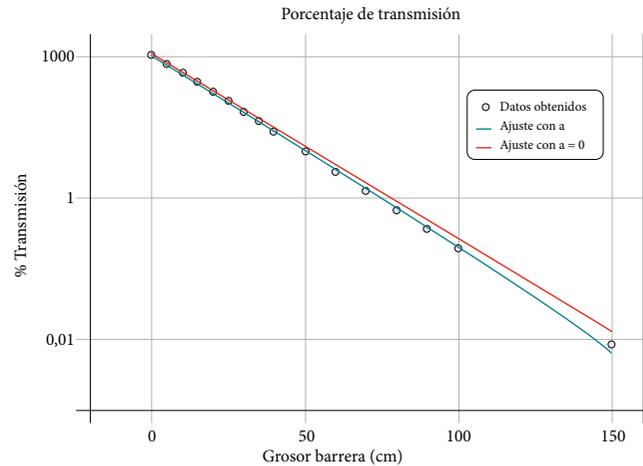
Siguiendo un análisis similar al anterior, se encuentra que para los siguientes porcentajes de transmisión requeridos es necesario construir barreras con los grosores que se detallan en la tabla 3.

Nótese que la tendencia en estos valores es congruente con lo afirmado por el NCRP [2], esto es, que existe un primer valor de TVL ( $TVL_1$ ) más que los posteriores TVL. Sin embargo, según el NCRP, a partir de la segunda TVL se encuentran las que se denominan *TVL de equilibrio*, debido a que su valor no varía y esto no se observa en los valores encontrados (comparar la tabla 3 con la tabla 1b). Esto puede deberse a que a diferencia de lo hecho en el presente trabajo, en el que se trabaja la ecuación de ajuste 4, para el NCRP la curva a la que se debe ajustar es de la forma:

$$\% \text{ transmisión} = be^{-x/c} \tag{8}$$

Como puede observarse, este corresponde a un caso particular de la ecuación 4, tomando el coeficiente  $a = 0$ . Para verificar cuál de los ajustes describe de forma más precisa lo encontrado de forma experimental (de tipo computacional en este caso), se procedió a graficar los datos obtenidos junto con lo encontrado tras aplicar los dos tipos ajustes. El resultado se ilustra en la figura 4.

En esta figura se obtiene un mejor ajuste al trabajar la ecuación de ajuste 4 que mantiene el coeficiente  $a \neq 0$ . Este hecho se corrobora, además, mediante el coeficiente de correlación  $R^2$ , cuyo valor es  $R^2 = 0,9991$  para la propuesta de ajuste aquí planteada; mientras que según el modelo propuesto por el NCRP (ecuación 8) se obtiene un  $R^2 = 0,9988$ . Incluso, las diferencias en los valores de los coeficientes de correlación  $R^2$  se dan hasta la tercera cifra y por tanto se pueden considerar no significativos. Como se verá más adelante, esto puede implicar diferencias de hasta 25 cm en



**Figura 4.** Datos obtenidos de porcentaje de transmisión junto a curvas de ajuste para espectro de acelerador Varian Clinac 21EX

los grosores de barrera calculados; por consiguiente, no se puede descartar este resultado sin realizar un análisis más profundo de sus consecuencias.

Además, es importante tener en cuenta que, si bien parece que ambos ajustes son adecuados para describir lo encontrado, estas cantidades son utilizadas en cálculos que involucran otras magnitudes con sus propias incertidumbres, y que por propagación de errores estos efectos acumulados pueden crecer rápidamente. Por ello, cualquier optimización sobre esas cantidades podría representar mejoras significativas en el cálculo global. Si bien la propuesta planteada en este trabajo provee un mejor ajuste, no invalida la propuesta del NCRP, ya que brinda una herramienta apropiada y ampliamente validada, pero que está basada en una lógica conservativa para el diseño y construcción de blindajes para áreas controladas.

Sin embargo, se debe verificar qué tan importante puede llegar a ser este efecto, por ello la curva de ajuste que surge de aplicar la ecuación 8 es la expresada a través de la ecuación 9:

$$\% \text{ transmisión} = (102 \pm 1)e^{-x/(16,6 \pm 0,2)} \tag{9}$$

De esta es posible obtener los grosores de este concreto que se requerirían para alcanzar un porcentaje de transmisión particular. En la tabla 4 se detallan los valores de grosor de barrera asociados a diferentes porcentajes de transmisión requeridos.

**Tabla 4.** Valores de grosor requeridos para obtener los diferentes porcentajes de transmisión, usando para su ajuste la forma propuesta por el NCRP (ecuación 8)

% de transmisión	Grosor(cm)	Aumento en el grosor(cm)
10	38,6±0,6	38,6±0,6
1	77±1	38±2
0,1	115±1	38±2
0,01	153±2	38±3
0,001	191±2	38±4

Densidad del concreto Portland de 2,2 g/cm<sup>3</sup>.

Según la tabla 4, los resultados se ajustan mejor al comportamiento descrito por el NCRP y muestra en efecto la existencia de dos valores diferentes para la TVL (una  $TVL_1$  inicial y otra de equilibrio,  $TVL_e$ ). Ahora bien, con la intención de conocer cuáles serían los distintos grosores de las barreras si se aplicaran los diferentes modelos (el del IAEA con una única TVL, el del NCRP con  $TVL_1$  y  $TVL_e$  o la aquí propuesta), se elaboró la tabla 5 para su cálculo.

Si se analizan los resultados reportados en la tabla 5, se hallan dos hechos de importancia. Por un lado, si se sigue la metodología del NCRP, donde se podía distinguir dos valores de TVL diferentes ( $TVL_1$  y  $TVL_e$ ), hay variaciones de más de 20 cm para porcentajes de atenuación requeridos bajos respecto a los valores publicados en la actualidad en el reporte 151 del NCRP (comparar columnas 2 y 4 de tabla 5). Esto puede deberse a variaciones en el haz utilizado, específicamente por su espectro, lo que obligaría a contar valores de TVL diferenciados según el espectro de haz empleado y con ello el acelerador en cada servicio.

Este hecho no puede descartarse sin realizar una revisión cuidadosa, pues implica, como se mostró en el caso particular de lo aquí descrito, que habría subestimaciones en el cálculo de blindajes tras emplear el modelo de cálculo sugerido por el NCRP.

Por otro lado, si bien las variaciones que se hallarían con los valores reportados en la actualidad por el NCRP y lo ob-

tenido en el presente trabajo no superan el 10 % (comparar columnas 2 y 5 de tabla 5), pueden implicar variaciones de hasta 7 cm para el caso particular del acelerador VarianClinac 21EX. Si se considera este aporte en suma con los aportes que pueden realizar los demás parámetros involucrados en el cálculo de blindajes, todos ellos también conservativos, parece razonable lo afirmado por el IPEM según el cual se pueden encontrar errores acumulados, por sobrestimación, que llevan a diferencias de hasta un orden de magnitud respecto a los resultados obtenidos en estudios de radiación en alrededores de la instalación [9].

#### 4. Conclusiones

Si se comparan los datos hallados y reportados en la tabla 5, nos encontramos con el hecho de que los valores hallados por el método del NCRP y el de la IAEA son altamente conservativos y podrían implicar sobreestimación en el grosor de barreras de concreto de más de 20 cm extra. Esto podría sugerir la necesidad de cambiar de una lógica de cálculo en la que se establece una cantidad discreta de TVL para lograr un blindaje, a una en la que se realice esta labor mediante curvas continuas de atenuación que estén acordes a las condiciones de radiación reales que dependen tanto de la energía del haz como de la distribución espectral de este.

Si bien la historia ha mostrado que estas aproximaciones funcionan de manera adecuada, dado su carácter conservativo, es necesario reevaluarlas; pues si se analiza el mecanismo de cálculo de blindajes en su totalidad, se encuentra que este ya es lo suficientemente conservativo, y continuar siéndolo en el grosor de barrera, además de innecesario, llevar a incurrir en sobrecostos en la construcción de barreras de blindaje por requerir más material para su construcción, además de implicar un uso inadecuado de los espacios disponibles.

**Tabla 5.** Valores de grosor requeridos para obtener los diferentes porcentajes de transmisión, siguiendo para su cálculo los modelos del IAEA, el NCRP y el aquí propuesto

% Transmisión	Reportado en NCRP 151 (cm)	Modelo utilizado para el cálculo			
		Modelo matemático IAEA con grosor cte (cm)	Modelo matemático NCRP con a=0 (cm)	Propuesto en este trabajo	
				Valor hallado (cm)	Desviación porcentual respecto a lo reportado en el NCRP 151
10	37	38,6±0,7	38,6±0,6	37,309±0,005	1 %
1	70	77,2±1	77±1	73,831±0,005	5 %
0,1	103	115,8±2	115±1	110,102±0,005	7 %
0,01	136	154,4±3	153±2	144,110±0,008	6 %
0,001	169	193±4	191±2	166,24±0,02	2 %

## Referencias

- [1] International Atomic Energy Agency, “*Radiation protection in the design of radiotherapy facilities*”, Safety Reports Series n.º 47, Viena, 2006. <https://www.iaea.org/publications/7197/radiation-protection-in-the-design-of-radiotherapy-facilities>
- [2] National Council on Radiation Protection y Measurements, “Structural shielding design and evaluation for megavoltage X and gamma-ray radiotherapy facilities: Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP report n.º 151”, Bethesda, MD, 2005. <https://ncrponline.org/shop/reports/report-no-151-structural-shielding-design-and-evaluation-for-megavoltage-x-and-gamma-ray-radiotherapy-facilities-2005/>
- [3] Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA), “Directive 2013/59 Euratom Protection against ionising radiation”, Bilbao, 2019. <https://osha.europa.eu/es/legislation/directives/directive-2013-59-euratom-protection-against-ionising-radiation>
- [4] International Commission on Radiological Protection (ICRP), “Recommendations of the international Commission on Radiological Protection”, Ontario, 2005.
- [5] International Atomic Energy Agency (IAEA), “IAEA safety standards for protecting people and the environment, radiation protection of the public and the environment, General Safety Guide n.º GSG-8”, Viena, 2018. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1781\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1781_web.pdf)
- [6] International Atomic Energy Agency (IAEA), “IAEA safety standards for protecting people and the environment, occupational radiation protection, General Safety Guide n.º GSG-7”, Viena, 2018. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1785\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1785_web.pdf)
- [7] J. E. Turner, *Atoms, radiation, and radiation protection*, 3.ª ed., Nueva York: Wiley, 2007. <https://doi.org/10.1002/9783527616978>
- [8] P. Andreo, D. Burns, A. Nahum *et al.*, *Fundamentals of ionizing radiation dosimetry*, 1.ª ed. Nueva York: Wiley, 2017.
- [9] P. Horton y D. Eaton, “Design and shielding of radiotherapy treatment facilities: IPEM Report 75”, 2.ª ed., Bristol: IOP Publishing, 2017. <https://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1440-4>
- [10] W. Culberson, S. Taneja, L. J. Bartol *et al.*, “Measurement of the energy spectrum of a 6 MV Linear Accelerator Using Compton Scattering Spectroscopy and Monte Carlo-Generated Corrections”, *International Journal of Medical Physics*, vol. 9, pp. 186-200, nov. 2020. <https://doi.org/10.4236/ijmpcero.2020.94017>
- [11] NIST, “Composition of Concrete, Portland”. [Internet]. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?matno=144>
- [12] A. M. Ardila-Vargas, *Física experimental. Colección notas de clase*, 2.ª ed., Bogotá: Unibiblos, 2007. [http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/Facultad\\_de\\_Ciencias/Publicaciones/Imagenes/Portadas\\_Libros/Fisica/Fisica\\_experimental\\_I/FisicaExperimental.pdf](http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/Facultad_de_Ciencias/Publicaciones/Imagenes/Portadas_Libros/Fisica/Fisica_experimental_I/FisicaExperimental.pdf)