

Desarrollo de un modelo en el programa MCNP5 que determina la distribución de dosis absorbida por un insumo médico

Espín, M. B., Luna G.M., Gómez J. P., Santos R. A.

Laboratorio de Tecnología de Radiaciones, Departamento de Ciencias Nucleares, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador

RESUMEN

En el presente estudio se desarrolló un modelo digital en el programa MCNP5 para simular la irradiación de un insumo médico, guantes de látex, con la fuente de cobalto-60 de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), el mismo que permitió determinar la distribución de dosis absorbida máxima y mínima por el insumo médico y su tasa de uniformidad de dosis (DUR). Poseer un programa que determina la distribución de dosis es de suma importancia para garantizar los resultados del proceso de irradiación en un irradiador gamma. Los datos obtenidos en el modelo digital fueron validados al compararlos con datos experimentales de dosis absorbida, medidos con dosímetros perspex que fueron calibrados con el dosímetro químico de referencia sulfato cérico ceroso, preparado y calibrado en la misma instalación. El valor promedio de error obtenido entre los datos experimentales y simulados no superó el 15%.

1. INTRODUCCIÓN

Las radiaciones ionizantes se han convertido en una herramienta muy útil en diversos campos como la medicina, la agricultura, la industria de alimentos y materiales. Esto se debe a dos características importantes: su capacidad de penetración en la materia y su no dependencia de condiciones medioambientales. La penetración de las radiaciones en la materia excita e ioniza a los átomos de tal manera que las propiedades físicas, químicas y biológicas, se modifican sin importar las condiciones de presión y temperatura a los que la materia está expuesta [1] [2].

La obtención de la distribución de las dosis absorbidas, incluidas dosis máxima y mínima, especialmente cuando son alimentos o insumos médicos, es de suma importancia debido a que permite asegurar que la dosis se encuentre dentro del rango establecido convencionalmente para lograr el propósito deseado, como lo dicta la norma ASTM E51702 :2002. Además, la distribución de dosis permite el cálculo de la tasa de uniformidad de dosis (DUR por sus siglas en inglés) que es el cociente entre las dosis máxima y mínima absorbidas. La DUR proporciona una idea de la uniformidad de dosis que recibe un producto [3].

Un modelo digital es una herramienta que permite obtener una respuesta muy cercana a la realidad sin necesidad de realizar el proceso de manera práctica con lo que se ahorra tiempo y recursos. Así, el programa Monte Carlo N-Particle permite realizar modelos digitales que predicen las dosis máxima y mínima absorbidas por un producto, evalúan la diferencia de dosis absorbida debido al cambio de embalaje del producto, analizan los efectos de una recarga de la fuente antes de ser ejecutada y permiten diseñar plantas de irradiación que aseguren dosis uniformes y de óptima eficiencia [4].

Por lo mencionado anteriormente, este proyecto tiene como objetivo el diseño de un modelo digital que permita la obtención de la distribución de dosis absorbida, incluidas dosis máxima y mínima por guantes de látex descartables sometidos a esterilización por irradiación en la fuente

de cobalto-60 de la EPN, que es un irradiador categoría 4, que trabaja por lotes, es decir, se requiere de personal operativo para mover las cajas entre irradiaciones. De manera que este modelo digital se convertiría en una útil y rápida herramienta que permitirá predecir los resultados de un proceso de irradiación para esterilizar guantes de látex, sin irradiar los mismos, lo que se convierte en un ahorro de tiempo y dinero para la EPN.

2. Materiales y métodos

2.1. Medición de la dosis absorbida

La dosis absorbida por los guantes se obtuvo mediante el sistema dosimétrico polimetilmetacrilato, específicamente, el dosímetro red perspex Harwell. Para obtener datos de dosis estadísticamente confiables se calibró el dosímetro junto al dosímetro tipo I sulfato cérico ceroso para las condiciones de la fuente de cobalto-60 de la EPN, mediante el procedimiento que se especifica en la norma ASTM 51261:2013(E).

La preparación del dosímetro sulfato cérico ceroso se realizó con base en la norma ASTM E51205: 2009. Se preparó 1 L de solución sulfato cérico ceroso con una concentración de 0,015 M sulfato cérico y 0,015 M sulfato ceroso, para medidas de dosis altas de entre 5-50 kGy. Los reactivos y equipos utilizados para la preparación del dosímetro se detallan a continuación en la tabla 1 y tabla 2 respectivamente.

Tabla 1 Reactivos utilizados para la preparación del dosímetro sulfato cérico-ceroso

| Nombre | Fórmula | Casa Comercial | Grado de Pureza |
|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|
| Sulfato cérico tetrahidratado | $Ce(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$ | Merck | Reactivo |
| Sulfato ceroso octahidratado | $Ce_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ | Aldrich | Reactivo |
| Ácido Sulfúrico | H_2SO_4 | Mallinckrodt Chemical | Reactivo |

Tabla 2 Equipos utilizados en la preparación del dosímetro sulfato cérico-ceroso

| Equipo | Marca | Capacidad | Sensibilidad |
|---------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| Espectrofotómetro | Thermo Scientific | UV/Visble | 0,001(absorbancia) |
| Bidestilador | Ivymen System | 4L/h | 2L |
| Termómetro | Matheson | 40 °C | 2 °C |
| Balanza | Ea Adam | 250 g | 0,0001 g |
| Pipeta micrométrica | Labsystems | 200-1000 μ L | 0,000001 L |
| Baño ultrasónico | Branson | - | - |

Para la calibración, se irradiaron simultáneamente tres dosímetros sulfato cérico ceroso y tres dosímetros red perspex cubiertos por polietileno expandido en un punto dentro de la cámara del irradiador, el mismo que se ubicó a 20 cm de distancia desde el centro de la fuente y 20 cm

de altura desde el piso de la cámara. Se calculó el tiempo de irradiación para exponer los dosímetros a dosis de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 kGy. Este procedimiento se realizó por 3 ocasiones consecutivas para obtener repetibilidad y reproducibilidad en el proceso.

Se midieron las absorbancias de los dosímetros sulfato cérico ceroso y red perspex a una longitud de onda de 320 nm y 640 nm respectivamente. El valor de dosis absorbida se calculó con la ecuación (1) a partir de las absorbancias del dosímetro sulfato cérico ceroso. Los valores de dosis absorbidos por el sulfato cérico corresponden a los valores de dosis absorbidas por los red perspex ya que fueron irradiados simultáneamente.

$$D(\text{Gy}) = \frac{f \cdot \Delta A}{\rho \cdot G(\text{Ce}^{3+}) \cdot \varepsilon \cdot d} \quad (1)$$

donde,

f es el factor de dilución

ΔA es la diferencia de absorbancias

$G(\text{Ce}^{3+})$ es el rendimiento químico de radiación del ion ceroso

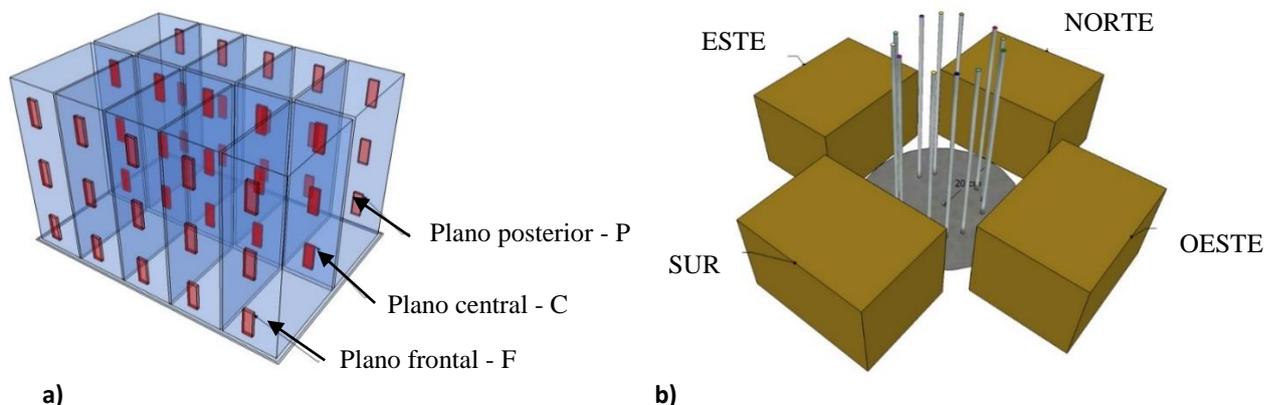
ε es el coeficiente de absorción molar lineal ($\text{m}^2 \text{x mol}^{-1}$)

ρ es la densidad de la solución dosimétrica (kg x mol^{-3})

d es la longitud del camino óptico (m).

Se elaboró la curva de calibración absorbancia versus dosis absorbida por el dosímetro red perspex. Además, se realizó el estudio estadístico con el cálculo del factor de Fisher (f). En donde se comparó el $f_{calculada}$ con el valor de f_{Tablas} , y según la regla de decisión si $f_{Tablas} > f_{calculada}$, se cumple la hipótesis nula, h_0 , es decir no existe diferencia estadística entre los datos. Finalmente, se calculó la incertidumbre de la medida de la dosis absorbida como lo especifica la norma ASTM 51261:2013(E).

Para la obtención de los datos experimentales, los guantes estaban contenidos en 10 cajas pequeñas individuales de 20 x 6 x 11 cm las mismas que se colocaron en una caja máster de cartón de 31,5 x 21 x 23,4 cm. Sobre las cajas pequeñas se dispuso las placas red perspex acorde a lo detallado en la norma ASTM 51702:2013(E), en planos paralelos y perpendiculares a la fuente de radiación, como lo indica la figura 1a.



Como se muestra en la figura 1b, se ubicaron cuatro cajas máster alrededor de la fuente de cobalto-60, con referencia a los puntos cardinales, a una distancia de 20 cm con respecto a la fuente. Las mismas fueron irradiadas a una dosis aproximada de 15,5 kGy, por el plano frontal y el plano posterior, para lograr un rango de dosis de entre 14,2 y 36,3 kGy, de acuerdo a la norma ISO 11137-2. Un día posterior a la irradiación se midieron las absorbancias de los dosímetros red perspex a una longitud de onda de 640 nm. Estos valores fueron utilizados en la curva calibración para determinar los valores de dosis absorbidas. Finalmente, se calculó la razón de uniformidad de dosis absorbida DUR.

2.2. Diseño del modelo digital en el programa MCNP5

El modelo digital se desarrolló en el programa Monte Carlo N-Particle (versión MCNP5), elaborado por "Los Alamos National Laboratory" de los Estados Unidos.

Para el desarrollo del modelo, se siguió el procedimiento que se detalla en la figura 2. Se tomó como base la caracterización de la fuente de cobalto-60 de la EPN realizada por Gómez (2013)[5].

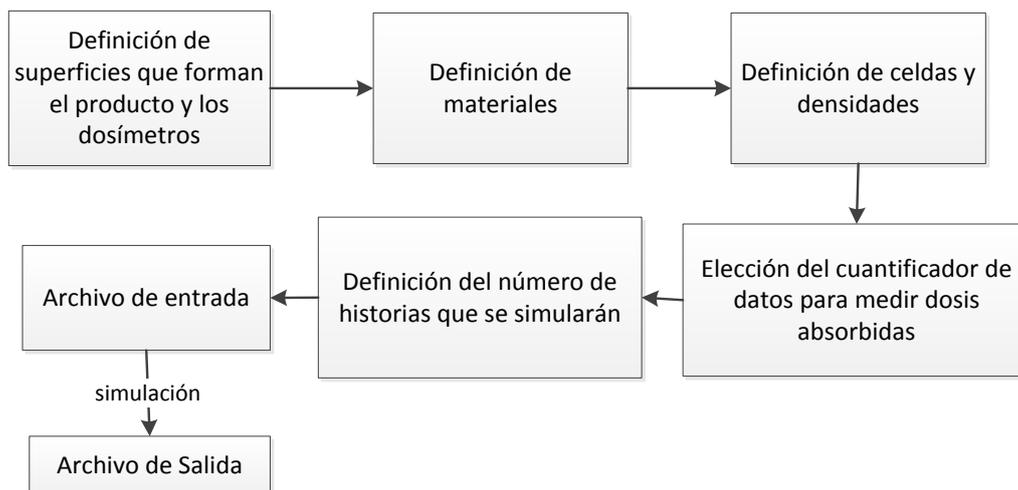


Figura 2 Procedimiento para el desarrollo del modelo digital en MCNP5

Se compararon los valores de dosis generados por el programa, con aquellos obtenidos en el proceso experimental de manera que el error obtenido entre estos dos valores no supere el 15%. Por la complejidad de las geometrías del producto, se realizaron modificaciones del modelo digital inicial donde se probaron distintos arreglos hasta llegar a un modelo cuyos valores de error no excedan el establecido. Una vez alcanzado el error señalado el modelo fue validado.

3. RESULTADOS

3.1. Curva de calibración

La curva de calibración del dosímetro red perspex obtenida a las condiciones de la fuente de cobalto-60 se presenta en la figura 3. Se realizó una regresión simple y se obtuvo la relación que existe entre la absorbancia de los dosímetros red perspex irradiados y la dosis absorbida, la

misma que se indica en la ecuación 2. El valor obtenido de coeficiente de correlación, expresado en la ecuación 3, garantiza que la relación descrita se ajustó correctamente a una curva polinómica de orden 3[6].

$$Abs_{esp} = 1,270 \times 10^{-14} D^3 - 1,665 \times 10^{-9} D^2 + 1,299 \times 10^{-4} D + 0,437 \quad (2)$$

$$R^2 = 0,99964 \quad (3)$$

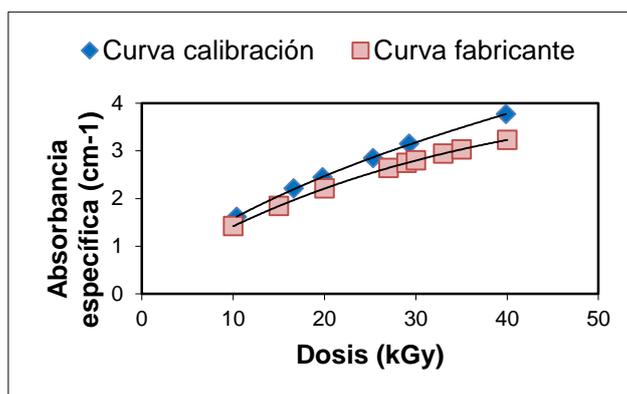


Figura 3 Comparación de la curva de calibración del sistema dosimétrico red perspex enviada por el fabricante con la curva construida en la planta de irradiación de la EPN

Además, en la figura 3 se comparó la curva de calibración obtenida con la curva de calibración enviada por el fabricante. Se puede notar que las curvas presentan la misma tendencia sin embargo, la curva de calibración obtenida a condiciones de la fuente está por encima de la otra curva debido a que la actividad de la fuente de cobalto-60 de la EPN, a la que se realizó la calibración, es relativamente baja, la misma que fue de 1767 Ci [6]. De aquí la importancia de calibrar los dosímetros perspex a las condiciones de trabajo en la planta de producción.

En la tabla 3 se indica el estudio estadístico realizado donde se muestra el factor de Fischer f calculado y f tablas para cada dosis irradiada. Se puede observar que casi todos los puntos cumplen con la hipótesis nula, es decir, no presentan diferencias estadísticamente significativas entre réplicas y repeticiones por lo tanto hay repetibilidad y reproducibilidad de los datos. Sin embargo, en el punto 1 no se cumple con la hipótesis nula, esto se debe a que el valor de dosis obtenido es menor al esperado y se encuentra fuera del rango en el que se emplean los dosímetros red perspex, que va entre 5-50 kGy, por lo tanto, este punto fue descartado.

Tabla 3 Comparación de $f_{calculado}$ con el f_{tablas}

| Dosis esperada | Dosis medida | $f_{calculado}$ | f_{tablas} |
|----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 5,0 | 4,9 | 8,81 | 5,14 |
| 10,0 | 10,4 | 4,21 | 5,14 |
| 15,0 | 16,6 | 0,86 | 5,14 |

Tabla 4 Comparación de $f_{calculado}$ con el f_{tablas} (continuación)

| | | | |
|------|------|------|------|
| 20,0 | 19,8 | 0,63 | 5,14 |
| 25,0 | 25,3 | 4,29 | 5,14 |
| 30,0 | 29,2 | 1,54 | 5,14 |
| 40,0 | 39,8 | 0,02 | 5,14 |

Se alcanzó un porcentaje de incertidumbre igual a 8%. Este valor es superior al establecido por la norma ASTM 51276:2012(E), que indica que el valor esperado no supere el 6%. A pesar de esto, se toma como aceptable el valor de incertidumbre y se sugiere un estudio más detallado para disminuir las incertidumbres en la construcción de la curva de calibración.

3.2. Determinación de la distribución de dosis absorbida por el producto medida con el dosímetro red perspex

Se determinaron los valores de dosis máxima y mínima en las cajas máster, las dosis se ubican en el mismo lugar en las cuatro cajas. La ubicación de las dosis máximas y mínimas en las cajas máster se puede observar en la figura 4.

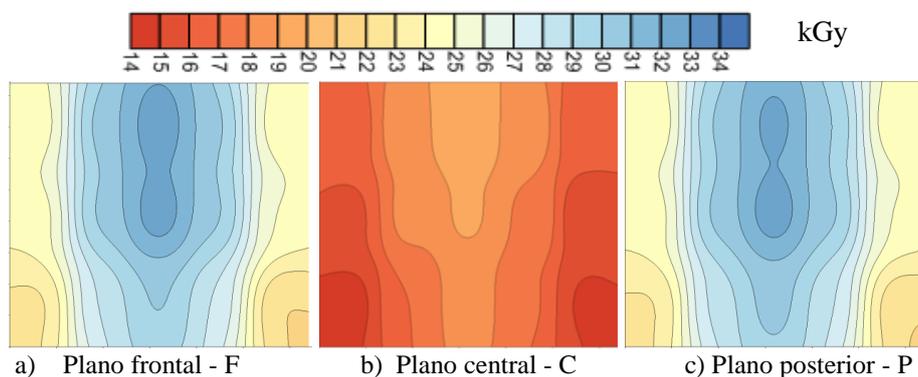


Figura 4 Distribución de dosis absorbida en los planos frontal, central y posterior de las cajas

La figura 4 muestra el desglose de las cajas máster en los planos F, C y P mostrados anteriormente en el esquema de la figura 1a, para una mejor observación de la distribución de dosis. Así, en la figura 4, se puede observar que las dosis máximas (color azul intenso), se ubican en los planos frontal y posterior en el centro y arriba. La dosis absorbida tiende a disminuir hacia los extremos, debido a que por ser una fuente de forma circular, la parte más cercana a la fuente es el centro del plano frontal y posterior de la caja en cada irradiación. Por otro lado, las dosis mínimas se encuentran ubicadas en el plano central, en los extremos inferiores del plano (color rojo intenso), que son los puntos de la parte inferior que permanecen más lejanos a la fuente durante todo el proceso de irradiación. También se observa en todos los planos que la dosis tiende a aumentar de abajo hacia arriba.

En promedio se obtuvieron los valores de dosis máxima y mínima que se indican en la tabla 4. Los mismos que se encuentran dentro del rango para esterilización de guantes quirúrgicos especificado por la norma ISO 11137-2, además del cálculo de la DUR.

Tabla 5 Valores de dosis máxima y mínima para cada caja

| Dosis (kGy) | Norte | Sur | Este | Oeste |
|-------------|-------|------|------|-------|
| Dmáx | 33,6 | 33,0 | 29,4 | 35,8 |
| Dmín | 15,0 | 14,4 | 14,1 | 15,7 |
| DUR | 2,2 | 2,3 | 2,1 | 2,3 |

Se puede apreciar que a pesar de que las dosis máximas y mínimas absorbidas se encuentran ubicadas en el mismo lugar en todas las cajas, se midió menor dosis absorbida en la caja ubicada en el lado este de la cámara. Esto demuestra que la fuente de cobalto-60 de la EPN no es una fuente isotrópica. Además sugiere un mayor desgaste de los lápices ubicados al este de la fuente.

Los valores de DUR son altos porque se ubicaron las cajas en la parte más cercana a la fuente de cobalto-60, entre los diámetros de 20 y 40 cm con respecto a la fuente. En este rango la dosis absorbida decae altamente de manera potencial, lo que hace que incremente el rango de dosis absorbida [5]. Se trabajó a esta distancia para disminuir el tiempo de irradiación, debido a la baja actividad de la fuente, y con ello el error producido por el decaimiento continuo de la fuente. A pesar de trabajar a la menor distancia la irradiación de cada lote demoró 5 días.

3.3. Diseño del modelo digital en el programa MCNP5

Se partió de un modelo Mo en el cual se realizaron cambios en la geometría del producto y en diferentes parámetros en los materiales hasta obtener el modelo final que cumple con un porcentaje de error promedio menor a 15%, al comparar los datos experimentales con los datos obtenidos por el modelo.

En la tabla 5 se pueden observar las características modificadas para cada modelo y el porcentaje de error para cada uno y si cumple con la distribución de dosis absorbida medida experimentalmente.

Tabla 6 Características de los modelos digitales desarrollados

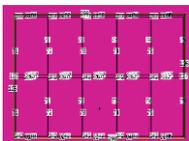
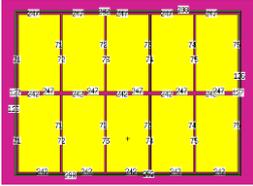
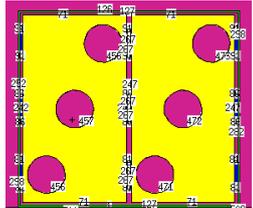
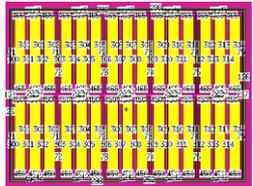
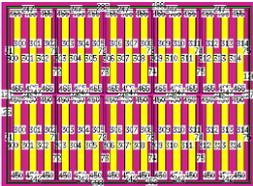
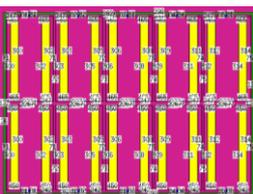
| Modelo | Características | Esquema del producto* vista superior | Porcentaje de error | Cumple con distribución de dosis |
|--------|---|---|---------------------|----------------------------------|
| Mo | Se definió la geometría del embalaje. Las cajas pequeñas se encuentran vacías. 100% aire. |  | 7,44 | NO |

Tabla 5 Características de los modelos digitales desarrollados (...continuación)

| | | | | |
|----|--|---|-------|----|
| M1 | A partir del Mo se rellenó las cajas pequeñas completamente de látex. |  | 17,07 | NO |
| M2 | En el modelo M1 se incrementó aire dentro de las cajas del látex en forma de 3 burbujas por caja. |  | 14,19 | NO |
| M3 | En el modelo M1 se incrementó aire, en forma de planos quedando una composición de 75% látex y 25% aire en cada caja pequeña. |  | 12,75 | SI |
| M4 | En el modelo M3 se retiró aire de tal manera que 50 % de las cajas sea látex, este porcentaje se midió experimentalmente mediante una compresión de la caja. |  | 9,85 | SI |
| M5 | Del modelo M3 se elimina el bloque central de látex en todas las cajas, quedando una composición de 30% látex y 70% aire. |  | 6,94 | NO |

*Esquema del producto realizado en MCNP5 y visualizado por Xming. El color amarillo y rosado representan los materiales látex y aire respectivamente.

Como se puede apreciar en las tablas 5 los modelos Mo, M2, M3, M4, y M5 cumplen con un porcentaje de error promedio menor al 15% pero la distribución de dosis no se acerca a la realidad a excepción del modelo M3. A partir del M3 se incrementó la cantidad de aire en las cajas como se muestra en el modelo M4 y M5. Se observa que a mayor cantidad de aire disminuye el error, sin embargo, solo el modelo M4 a más de disminuir el error mantiene una distribución de dosis que mejor se ajusta a la distribución de dosis absorbida obtenida experimentalmente. La distribución de dosis del M4 se muestra en la figura 5.

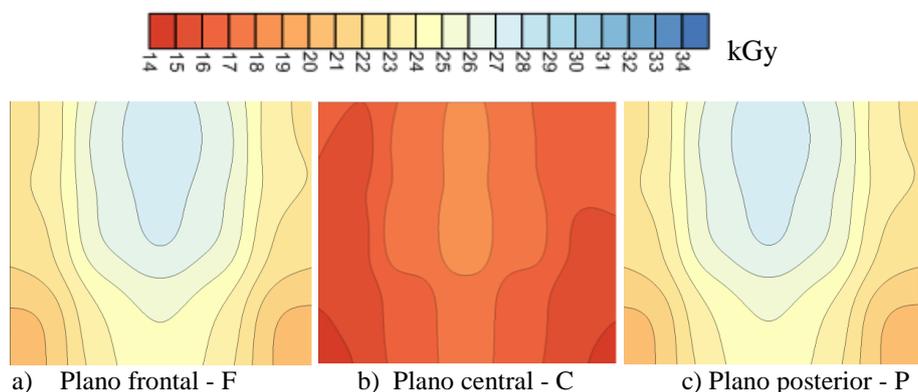


Figura 5 Distribución de dosis absorbida obtenida por el modelo digital M4 desarrollado en MCNP5

A continuación se muestran las características del modelo digital final M4 en la tabla 6.

Tabla 6 Características del modelo digital M4

| Componentes | | Detalles |
|--------------------------------------|-----------------|---|
| Fuente | Material | Aire |
| | Geometría | 12 cilindros |
| | Características | Distribución real de la ubicación y actividad |
| Dosímetros | Material | Red perspex |
| | Geometría | Paralelepípedos (3 x 1,1 x 0,03) cm |
| | Características | Ubicación: como se muestra en la Figura 1a. Se determinaron como Tally F6 para contabilizar energía depositada. |
| Cámara de irradiación | Material | Hormigón |
| | Geometría | Paralelepípedos |
| | Características | Bloques de plomo Placa de acero inoxidable Agua de piscina debajo del piso Capa de pasivación en el recubrimiento de los lápices |
| Producto (cajas guantes de látex) | Material | Látex y aire |
| | Geometría | Paralelepípedos Cajas máster (32 x 23 x 21) cm Cajas pequeñas (11 x 6 x 21) cm |
| | Características | Cajas pequeñas contiene 50% látex y 50% aire. |
| NHS | | 10 000 000 |

4. CONCLUSIONES

1. El modelo digital validado M4, cuyas cajas tienen una composición: 50 % aire y 50% látex, cumple con un error promedio menor al 15% y presenta la misma distribución de dosis máxima y mínima obtenida experimentalmente con los dosímetros red perspex.
2. Los datos obtenidos no presentan diferencia estadísticamente significativa por lo que son repetibles y reproducibles.
3. La curva de calibración dosis absorbida vs absorbancia presenta una tendencia polinómica de orden 3 con un factor de correlación igual a 0,99964.
4. La dosis máxima se encuentra en dos áreas, una en el plano frontal y otra en el plano posterior de las cajas. Mientras que la dosis mínima se encuentra en los dos extremos plano intermedio de las cajas.
5. El modelo digital desarrollado en este proyecto permite planificar los procesos de irradiación y ofrecer un diagnóstico aproximado de distribución de dosis en el producto irradiado, en la fuente de cobalto-60 de la EPN.

5. REFERENCIAS

1. Rabin, C. y González, G. *Para entender las Radiaciones: Energía Nuclear, Medicina, Industria*. Montevideo, Uruguay: DIRAC, p. 25 (2011)
2. Bomben A., Gomez I., Larcher A., Perez M., Arias C., Hernandez D., Kay J., Sajaroff P., Spano F., Feld D., Saraví M. y Moll R. *Guía en Radioprotección, dirigida a profesionales y técnicos que trabajan en las aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes*, CADIME, ARN, CNEA, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de: http://www.bioingenieria.edu.ar/academica/catedras/radiodiagnostico_radioterapia/archivos/guias2012/radioproteccion%20-%20autoridadregulatorianuclear.pdf (2000)
3. IAEA. *Gamma Irradiators for radiation processing*, IAEA, Vienna, Austria. Recuperado de: <http://www-naweb.iaea.org/naweb/Brochure%20on%20gamma%20irradiators.pdf> (2005).
4. Irradiation Panel, *Review of Monte Carlo Modeling Codes*, UK Panel on Gamma & Electron Irradiation, Reino Unido. Recuperado de [http://www.irradiationpanel.org/documents/1298891113-MonteCarloCode Review_ 2010 Publication. pdf](http://www.irradiationpanel.org/documents/1298891113-MonteCarloCode%20Review_2010%20Publication.pdf) (2010).
5. Gómez, J., "Diseño de un modelo digital en el programa MCNP5 para la simulación de la dosimetría de la fuente de cobalto-60 de la EPN y validación del modelo mediante dosimetría Fricke." Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. (2013)
6. Prieto, F. "Efecto de Algunos Parámetros en la Respuesta de los Dosímetros Ambar Perspex 3042, Lote L," *Memorias CIC México*, Cancún, 11-14 Julio 2004, pp. 4-5 (2004).
7. Prieto, E. *Curso Nacional de Dosimetría de Altas Dosis para el Control de la Calidad en Instalaciones de Irradiación*. EPN. Quito. Ecuador, p. 26 (2011)