

Distribución de la tasa de dosis alrededor de la semilla de ^{125}I modelo 6711, en función de la longitud de su cilindro de plata

Ubaldo Nerio¹, Luis G. Chica Giraldo^{1,*} y Didier Paul³

¹ Instituto Nacional de Cancerología, Universidad de Córdoba, Colombia

² Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³ Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN), France.

Resumen

Se aplica el método de Monte Carlo para encontrar las distribuciones de tasas de dosis alrededor de semillas de ^{125}I modelo 6711 cuyos cilindros de plata tienen las siguientes longitudes: 0.276 cm, 0.288 cm, 0.300 cm, 0.312 cm y 0.324 cm. Con respecto a la tasa de dosis producida por la semilla estándar, la mayor diferencia relativa se presenta para L_{cp} igual a 0.033 cm, a la distancia de 5.518 cm y su valor es del 8 %. La tasa de dosis en el tejido dentro de la esfera de 6.0 cm de radio disminuye al aumentar L_{cp} . La diferencia relativa de tasas de dosis en la esfera, con respecto a la producida por la semilla de L_{cp} estándar, es menor que el 5 % para los valores de L_{cp} trabajados.

Palabras claves: ^{125}I , método de Monte Carlo

Abstract

The Monte Carlo method is applied to find the doses rate distributions around ^{125}I seeds model 6711 for which, the argent cylinder length, L_{sc} , take the following values: 0.017 cm, 0.021 cm, 0.025 cm, 0.029 cm and 0.033 cm. The dose rate in any point of tissue around the seed decreases when the argent cylinder rod increases. The dose rata to 4.522 cm of distance over the transversal axis lineally decreases,. The great relative difference respect dose rate by the standard seed is to the distance of 5.518 cm for L_{sc} equal to 0.033 cm and their value is 8 %. The doses rate into tissue of 6.0 cm rod sphere decreases when L_{sc} increases. The relative difference of doses rate into the sphere respect to the doses rate by seed with L_{sc} standard, is lower than 5 %, for all worked value L_{sc} .

*: lgchica@ciencias.unal.edu.co

1. Introducción

La semilla de ^{125}I modelo 6711 (ver figura 1) [1] creada en 1983, tiene en la parte externa un tubo de titanio hueco de longitud y diámetro externos 4.5 mm y 0.8 mm, respectivamente, mientras que su longitud y diámetro internos son 3.3 mm y 0.68 mm respectivamente. En el interior del tubo de titanio hay un cilindro macizo de plata de longitud 3.0 mm y diámetro 0.50 mm. El ^{125}I se distribuye sobre su superficie formando una película de $0.5\ \mu\text{m}$, sobre ella hay otra película de AgCl y AgBr, por partes iguales, y de espesor $1\ \mu\text{m}$. La región entre el tubo de titanio del cilindro de plata está llena de aire.

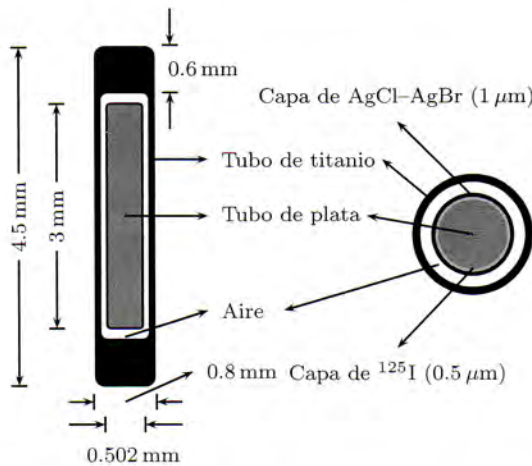


Figura 1. Semilla de ^{125}I modelo 6711 Las dimensiones se dan en mm. La región que separa el tubo de titanio del cilindro de plata está llena de aire. Vista longitudinal y transversal de la semilla.

Sloboda et.al. [2] le encontraron a este modelo la función de anisotropía y el factor de anisotropía, Heintz et.al. [3] crearon una ecuación que permite convertir las magnitudes dosimétricas de la fuente 6711 a la magnitud equivalente de una nueva fuente. Karaiskos y Sakliou [4] buscaron los factores geométricos de fuentes distribuidas sobre la superficie de un cilindro de longitud (L) 3 mm y diámetro 0.3 mm y también para otro cilindro con el mismo L y diámetro 0.1 mm. Encontraron que el factor geométrico depende, entre otros factores, del radio del cilindro. De la comparación de estos factores geométricos a lo largo del eje transversal con de una fuente lineal se concluye que éste supera a aquellos en menos del 1 %, o lo que es lo mismo el efecto del radio del cilindro de plata a lo largo del eje transversal es menor que dicho porcentaje.

En este trabajo se busca como se afecta la distribución de tasas de dosis en el tejido alrededor de la semilla de ^{125}I modelo 6711 debido al cambio de dimensiones de la longitud del cilindro de plata, L_{cp} . También se busca la longitud del cilindro de plata, para la cual, la tasa de dosis dentro de una esfera de 6.0 cm de radio es el 5%.

2. Descripción del sistema

Los cálculos de la distribución de la tasa de dosis alrededor de la semilla de ^{125}I modelo 6711, se hacen en tejido. Se utiliza el código Penélope [5], el cual, coloca un sistema de coordenadas cilíndricas en el centro de la semilla. El espacio que rodea a la semilla se divide en voxels y a cada uno de ellos se le calcula la tasa de dosis, la cual se considera absorbida por el punto central del voxel cuyas coordenadas son: R , distancia a lo largo del eje transversal y Z , a lo largo de la semilla. Cada voxel es un segmento de cilindro de altura Δz , de radio mayor $R + \Delta R/2$ y radio menor $R - \Delta R/2$.

Se usa la emisión del ^{125}I dada por Dillman y Von Der Lage [6], en la cual la energía E , de cada fotón y su rendimiento, W , son.

Energía E (keV)	Rendimiento W
27.4	1 15
31.4	2.5×10^{-1}
35.5	6.7×10^{-2}

3. Método de monte carlo aplicado al transporte de fotones en el código penélope

El código Penélope [5] aplica el método de Monte Carlo para el transporte de fotones descrito por Jenkins et.al. [7]. Los coeficientes de atenuación se calculan mediante expresiones analíticas [5], obtenidas al hacer el ajuste a los valores tabulados.

En la interacción coherente (efecto Rayleigh), el código Penélope encuentra el ángulo de dispersión utilizando la sección transversal diferencial de dispersión coherente para un fotón, $d\sigma_{\text{coherente}}/d\theta$ [8], la cual es

$$\frac{d\sigma_{\text{coherente}}}{d\theta} = \frac{d\sigma_T}{d\Omega} |F(q, Z)|^2 \quad (1)$$

donde $d\sigma_T/d\Omega$ es la sección transversal diferencial de dispersión Thomson y $|F(q, Z)|^2$ es el factor de forma atómico elevado al cuadrado. Penélope calcula

$F(q, Z)$, mediante las expresiones analíticas obtenidas por Baró [9] al ajustar los factores de forma tabulados por Hubbell et.al. [10].

En la interacción incoherente (efecto Compton), el código Penélope encuentra el ángulo de dispersión utilizando la sección transversal de dispersión incoherente para un fotón, [11], la cual es

$$\frac{d\sigma_{\text{coherente}}}{d\theta} = \frac{d\sigma_{\text{in}}^{KN}}{d\theta} S(E, \theta) \quad (2)$$

donde $d\sigma_{\text{in}}^{KN}/d\theta$ es la sección transversal diferencial de dispersión Kein-Nishina y $S(E, \theta)$ es la función de dispersión incoherente, la cual es

$$S(E, \theta) = \sum_i Z_i \Theta_i(E - U_i) n_i(p_{i,\text{máx}}) \quad (3)$$

donde Z_i es el número de electrones en la capa i -ésima, $\Theta_i(E - U_i)$ (igual a 1 si $E > U_i$ o igual a 0 en caso contrario) es la función de peso Heaviside y $n_i(p_{i,\text{máx}})$ representa la fracción de electrones en la capa i -ésima que efectivamente pueden ser excitados en una interacción Compton, $n_i(p_z)$ es

$$n_i(p_z) = \int_{-\infty}^{p_z} J_i p'_z dp'_z \quad (4)$$

y $p_{i,\text{máx}}$ es el mayor valor de p_z (proyección del momento inicial \mathbf{p} del electrón en la dirección del vector dispersión $-\mathbf{q}$, el cual es igual a $\mathbf{k}' - \mathbf{k}$, siendo \mathbf{k}' y \mathbf{k} los momentos de los fotones dispersados e incidentes, respectivamente), para el cual un electrón en la capa i -ésima puede ser excitado, se obtiene de

$$p_{i,\text{máx}}(E, \theta) = \frac{E(E - U_i)(1 - \cos \theta)mc^2 U_i}{c \sqrt{2E(E - U_i)(1 - \cos \theta) + U_i^2}} \quad (5)$$

$J_i p'_z$ en la ecuación (4), es el perfil Compton para un electrón en la capa i -ésima.

Para determinar la función de dispersión incoherente, el código Penélope usa para los perfiles Compton expresiones analíticas [5], encontradas al hacer el ajuste a los orbitales Hartree-Fock obtenidos por Biggs [12]

Las ecuaciones utilizadas por el código Penélope difieren de los datos tabulados en menos del 5 %.

4. Resultados

Se producen 3×10^7 desintegraciones. A cada fotón se le hace una "historia", la cual termina cuando el fotón sale del tejido dentro de un cilindro de 10 cm de radio y 14 cm de longitud, con su centro ubicado en el centro de la semilla, o cuando su energía es inferior a 5.0 keV. Por lo tanto se tiene en cuenta la emisión característica de la plata pero no la del titanio.

La distribución de tasas de dosis en el tejido se determina para la semilla de ^{125}I modelo 6711, manteniendo todas las dimensiones de la semilla con los valores estándares, con excepción de la longitud del cilindro de plata, L_{cp} , a la cual se le dan los siguientes valores: 0.76, 0.88, 0.30 (estándar), 0.312 y 0.324 cm, sucesivamente. Las distribuciones de tasas de dosis y sus coeficientes de variación, cv , se presentan en tablas en la tesis de Nerio [13].

5. Discusión

5.1. Comparación de las distribuciones de tasas de dosis en agua y en tejido

La figura 2 muestra los valores de tasas de dosis a lo largo del eje transversal de la semilla de ^{125}I con dimensiones estándares, obtenidas en agua por Burns y Raeside [1], por el código Penélope en tejido y las obtenidas en agua por Williamson [14]. Para que éstos últimos tengan las unidades indicadas en la figura 2, se usa el factor de conversión intensidad Kerma dado por el TG-43 de la AAPM [15] cuyo valor expresado en Becquerel es $5,86 \times 10^{-8} \text{ U.Bq}^{-1}$.

El TG-43 de la AAPM [15] adopta para la semilla de ^{125}I modelo 6711, la tasa de dosis en agua reportada por Williamson. La figura 2 muestra, que la tasa de dosis a lo largo del eje transversal en tejido se ajusta mejor a los de Williamson, que los de Burns y Raeside, a pesar de que estos también fueron en agua. Esta comparación permite inferir que el código Penélope es adecuado para el estudio de la distribución de tasas de dosis alrededor de la semilla de ^{125}I .

5.2. Distribución de tasas de dosis a lo largo del eje transversal en función de L_{cp}

La figura 3 relaciona los valores de tasa dosis en función de L_{cp} en cada una de las posiciones R a lo largo del eje transversal.

La figura 3 muestra que en cada punto, con excepción de lo que ocurre en el punto R igual a 0.538 cm, se produce un aumento de la tasa de dosis al au-

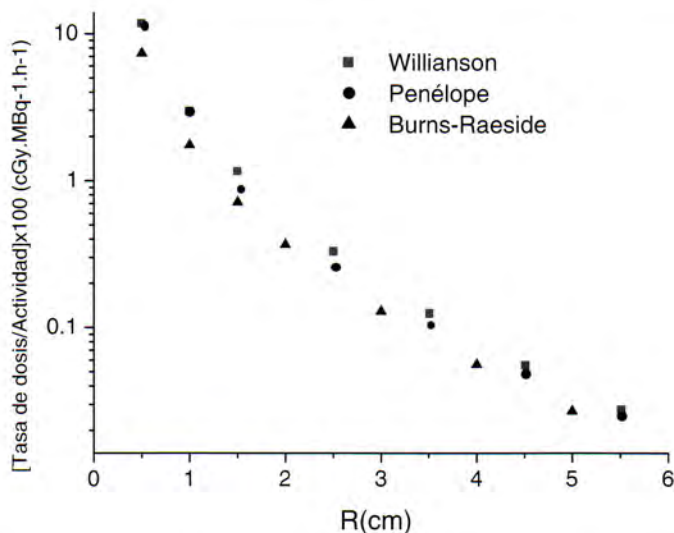


Figura 2. Tasas de dosis a lo largo del eje transversal de la semilla de ^{125}I modelo 6711 con las dimensiones estándares.

mentar L_{cp} . La línea continua corresponde al ajuste efectuado con la siguiente ecuación

$$\dot{D}(L_{cp}) = C_0 + C_1 L_{cp} + C_2 L_{cp}^2 + C_3 L_{cp}^3 \quad (6)$$

Los valores de los coeficientes, C_0 , C_1 , C_2 y C_3 se presentan en la tabla 1

Cuadro 1. Valores de coeficientes, que permiten ajustar la ecuación (6) a los puntos de la gráfica 3.

$R(\text{cm})$	C_0	C_1	C_2	C_3
0,538	170,67193	1876,49163	-6407,36026	7246,14694
1,534	40,852	-398,09524	1316,96429	-1446,75926
2,530	9,5268	-92,5496	306,79563	-337,57716
3,526	0,1688	-0,5119	0,99206	0,00
4,522	0,1696	-0,85119	1,4881	$-1,13687 \times 10^{-13}$
5,518	1,2676	-12,6746	42,90675	-48,22531

Para la distancia R de 0.538 cm, los valores de C_0 y de C_2 son negativos y

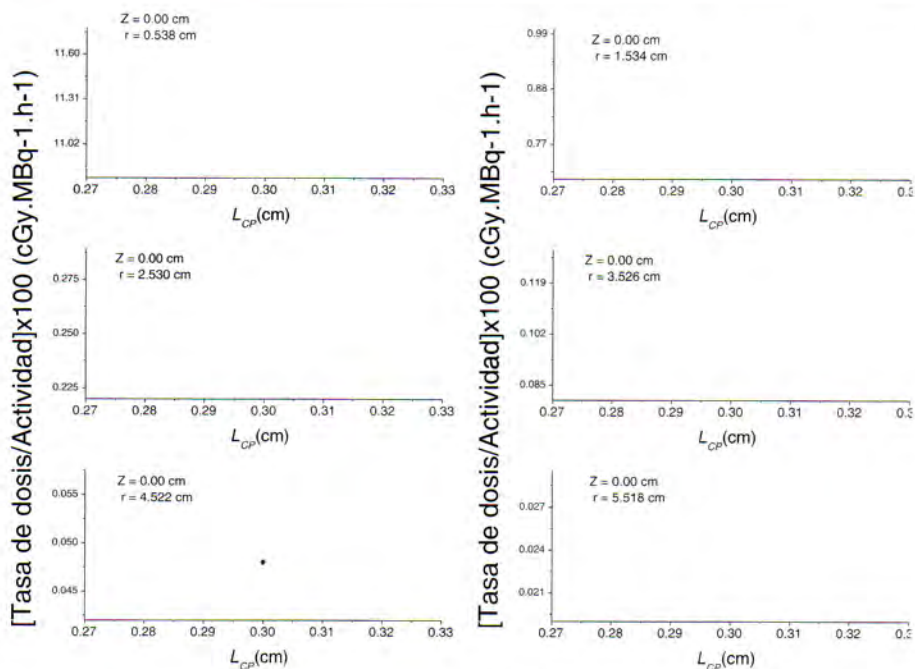


Figura 3. Tasas de dosis, $\dot{D}(r, \Theta)$ y su cv en puntos del tejido que están a lo largo del eje transversal de la semilla de ^{125}I , en función de L_{CP} . las distancias, R , son: 0.538, 1.534, 2.530, 3.526, 4.522 y 5.518 cm, respectivamente. Las líneas continuas corresponden al ajuste de la ecuación (6).

los valores de C_1 y de C_3 son positivos. Para las otras distancias de R , los signos de estos coeficientes se inviertan. Esto se debe a que en el primer caso, es una función decreciente de L_{CP} mientras que en los otros casos es una función creciente.

La tasa de dosis relativa, a lo largo del eje transversal, producida por cada semilla de longitud L_{CP} , con respecto a la tasa de dosis producida por la semilla de longitud estándar se da en la tabla 2. Se observa que a la distancia de 0.538, la tasa de dosis relativa es menor que la unidad para las semillas con L_{CP} mayor que la longitud estándar. A las otras distancias la tasa de dosis relativa es mayor o igual a la unidad.

El comportamiento anterior se debe a que al aumentar L_{CP} se producen dos factores opuestos. El primero es que al aumentar L_{CP} la fracción de ^{125}I de la superficie plana del cilindro disminuye por lo tanto aumenta la fracción en la superficie circular. Esto significa que algunos fotones no tendrán que pasar por

Cuadro 2. Tasa de dosis relativa de las semillas de ^{125}I Modelo 6711 con longitud del cilindro de plata L_{cp} respecto a la semilla con L_{cp} estándar, para las distancias R .

L_{cp} (cm)	R (cm)					
	0.538	1.534	2.530	3.526	4.522	5.518
0.276	1.021	1.000	1.008	1.009	1.000	1.042
0.288	1.01.2	1.000	1.008	1.000	1.000	1.040
0.300	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.312	0.990	1.034	1.023	1.019	1.021	1.000
0.324	0.990	1.03.4	1.027	1.029	1.04.2	1.000

el cilindro de plata para llegar a algún punto sobre el eje transversal. Entonces, por este factor, la tasa de dosis en el citado eje aumenta. El segundo es que al aumentar L_{cp} se aumenta la longitud recorrida por el fotón dentro del tubo de titanio, lo que hace que la tasa de dosis en el citado eje disminuya.

La figura 3 muestra que a distancias pequeñas ($R < 2L$) predomina el segundo factor, mientras que a distancias grandes ($R > 2L$) predomina el primero.

5.3. Tasa de dosis promedio en una esfera de 6.0 cm de radio

La tasa de dosis promedio, \dot{D} , en una masa compuesta por elementos i , es

$$\dot{D} = \frac{\sum_i \dot{D} dm_i}{\sum_i dm_i} \quad (7)$$

donde \dot{D}_i es la tasa de dosis en elemento i de masa dm_i .

La tabla III presenta la tasa de dosis promedio en el tejido dentro de una esfera de 6.0 cm de radio alrededor de cada semilla y la respectiva diferencia relativa con respecto a la tasa de dosis producida en la esfera por la semilla que tiene L_{cp} estándar.

En la tabla 3 se observa que en la esfera de 6.0 cm de radio, la diferencia relativa de tasa de dosis es menor o igual al 5%. Siendo 0.324 cm la máxima longitud que se le puede dar al cilindro de plata y a la vez, es un valor cercano al límite superior de L_{cp} para que la diferencia de tasa de dosis no supere el 5%.

Cuadro 3. Tasa de dosis [$100 \times (\text{cGy}/\text{MB.h})$] en el tejido dentro de una esfera de 6.0 cm de radio y diferencia relativa (%) con respecto a la producida por la semilla de R_{cp} estándar, en función de L_{cp} .

L_{cp} (cm)	0.276	0.288	0.300	0.312	0.324
TASA DE DOSIS	0.988	0.987	0.987	1.013	1.020
DIFERENCIA RELATIVA (%)	-0.10	0.00	0.00	2.60	3.34

En la figura 4 se ve que la tasa de dosis dentro de la esfera de 6.0 cm de radio tiene un valor mínimo para L_{cp} estándar.

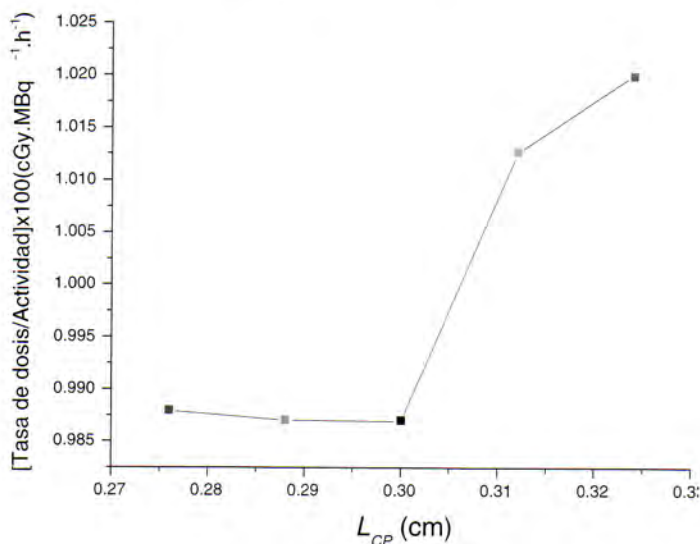


Figura 4. Tasa de dosis promedio en el tejido dentro de una esfera de 6.0 cm de radio en función de L_{cp} .

En las aplicaciones médicas se aceptan errores hasta del 5 %, por lo tanto, las semillas que tienen L_{cp} entre 0.276 cm y el valor L_{cp} , 0.324 cm, se pueden tratar como si tuvieran L_{cp} estándar y el error introducido corresponde a las diferencias relativas de la tabla 3.

6. Conclusiones

El código Penélope es un instrumento adecuado para estudiar las tasas de dosis alrededor de la semillas de ^{125}I .

A las distancias R menores que $2L_{cp}$ sobre el eje transversal, las semillas de ^{125}I modelo 6711 con L_{cp} mayor que la estándar producen una tasa de dosis menor que la producida por semilla con longitud estándar. En los demás puntos sobre el eje transversal la tasa de dosis se incrementa al aumentar L_{cp} .

La tasa de dosis dentro de la esfera de 6.0 cm de radio presenta un mínimo para L_{cp} igual al valor estándar.

Las semillas que tienen L_{cp} entre 0.276 cm y 0.324 cm se pueden considerar como semillas de ^{125}I Modelo 6711 estándar, con un error igual a la diferencia relativa expresada en la tabla 3.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los autores del código Penélope (Salvat and co) por habernos permitido el uso de su código para la realización de este trabajo. También agradecemos al comité ECOS Nord por su apoyo financiero.

Referencias

- [1] G S Burns y D.E. Raeside *Med. Phys.* **15** 56-60 (1988)
- [2] R.S Sloboda y G V Menon *Med. Phys* **27** 1789-1799 (2000)
- [3] B Heintz, R. Wallace y J Hevezi *Med. Phys.* **28** 671-682 (2001)
- [4] P Karaiskos y L. Sakelliou *Med. Phys.* **27** 124-128 (2000)
- [5] F. Salvat, J M. Fernández-Vares, J Baro y J Sempau *PENÉLOPE, an algorithm and computer code for Monte Carlo simulation of electron-photon showers* CIEMAT, Madrid, España (1995)
- [6] L. T Dillman y F.C. Von Der Lage *Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation* NM/MIRD Pamphlet 10, Society of Nuclear Medicine, New York (1975)
- [7] T.M. Jenkins, W R. Nelson and A. Rindi, eds. *Monte Carlo transport of electrons and photons* Plenum, New York (1988)

- [8] M. Born *Atomic Physics* Blacki and Son, London (1969)
- [9] J Baró, J Sempau, J M. Fernández-Varea y F. Salvat *Radiat. Phys. Chem.* **44** 531 (1994)
- [10] J H. Hubbell, Wm. J Veigele, E. A. Briggs, R. T Brown, D. T Cromer y R. J Howerton *J. Phys. Chem. Ref. Data* **4** 471 (1975), Erratum: *ibid.* **6** 615 (1977)
- [11] D. Brusa, G. Stutz, J A. Riveros, J M. Fernández-Varea y F. Salvat *Nucl. Instr. and Meth. A* (1996)
- [12] F. Biggs, L. B. Mendelsolin y J B. Mann *At. Data and Nucl. Data Tables* **16** 201 (1975)
- [13] U Neiro *Simulación por el método de Monte Carlo del efecto de las dimensiones del cilindro de plata de la semilla de ^{125}I modelo 6711 sobre la distribución de dosis a su alrededor* Tesis de maestría en Física, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. (2003)
- [14] J F. Williamson *Med. Phys.* **15** 686-694 (1988)
- [15] R. Nath, L.L. Anderson, G. Luxton, K. A. Weaver, J F. Williamson y A. S. Meigooni *Med. Phys.* **22** 209-234 (1995)