

Características físicas y espectrales de una fuente argentina de braquiterapia ^{125}I

Rosana Pirchio¹, Margarita Saraví¹, David Banchik², Carlos Muñoz²

1. UAATyA, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina. Av. del Libertador 8250, (1429) Ciudad de Buenos Aires, Argentina. TEL/FAX: 54-011-6779-8228 - pirchio@cae.cnea.gov.ar

2. UAMyCN, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina. Av. del Libertador 8250, (1429) Ciudad de Buenos Aires, Argentina. TEL/FAX: 54-011-6779-8228

Resumen - Una semilla de ^{125}I conocida como BRAQUIBAC® ha sido desarrollada por BACON para tratamiento de braquiterapia intersticial. A partir de estudios radiográficos y metalográficos efectuados a las semillas se calculó una longitud física de 4.68 ± 0.06 mm, diámetro de 0.78 ± 0.13 mm, una longitud 3.07 ± 0.10 mm y diámetro 0.47 ± 0.05 mm para el tubo de plata y paredes y extremos de titanio con espesor 0.09 ± 0.03 mm y 0.39 ± 0.06 mm. El ^{125}I es adsorbido en el tubo de plata.

Análisis espectroscópicos mostraron que las intensidades relativas de fotones fueron 14.94 ± 0.45 para 22.1 keV, 3.58 ± 0.12 para 25.2 keV, 62.98 ± 0.48 para 27.4 keV, 14.67 ± 0.33 para 31.4 keV y 4.50 ± 0.14 para 35.5 keV.

Se analizó la dependencia angular de la intensidad de fotones alrededor de la semilla y la máxima variación fue 7.14 ± 4.39 % y en los extremos 31.14 ± 3.11 %.

Los resultados de los estudios hechos para las fuentes BRAQUIBAC® fueron satisfactorios.

Palabras clave: braquiterapia, Iodo 125, radiografía, espectro de fotones

On the physical, spectral, and dosimetric characteristics of a new ^{125}I brachytherapy source

Abstract - A ^{125}I seed known as BRAQUIBAC® has been developed by BACON for interstitial brachytherapy treatment.

From radiographic and metallographic studies done on seeds was calculated the physical length of 4.68 ± 0.06 mm, diameter of 0.78 ± 0.13 mm, length 3.07 ± 0.10 mm and diameter 0.47 ± 0.05 mm for silver rod and the walls and the ends of titanium with thickness of 0.09 ± 0.03 mm and 0.39 ± 0.06 mm. The ^{125}I is adsorbed on silver rod.

Spectroscopic showed the relative photon intensities were 14.94 ± 0.45 for 22.1 keV, 3.58 ± 0.12 for 25.2 keV, 62.98 ± 0.48 for 27.4 keV, 14.67 ± 0.33 for 31.4 keV and 4.50 ± 0.14 for 35.5 keV.

The angular dependence of the photon intensity was analyzed around the seed and the maximum variation was 7.14 ± 4.39 % and at the tips 31.14 ± 3.11 %.

The results of studies done for BRAQUIBAC® source were satisfactory.

Keywords: brachytherapy, iodine-125, radiograph, photon spectrum

INTRODUCCIÓN

Fuente de braquiterapia de ^{125}I está siendo usada para implantes intersticiales en varios sitios anatómicos especialmente debido a las emisiones de bajas energías que interactúan predominantemente con el tejido

por absorción fotoeléctrica produciendo una alta irradiación a la lesión y una baja irradiación al tejido normal (Pérez et al., 1997).

En Argentina un nuevo modelo de fuente de braquiterapia ^{125}I BRAQUIBAC® (Baró et al., 2005) ha sido desarrollado por la compañía de BACON en respuesta a la gran demanda que existe en el mercado en este momento (Baró et al., 2003). La AAPM (Asociación estadounidense de físicos en medicina) Task Group 43 (TG-43) recomienda que deben determinarse las características dosimétricas de una nueva semilla en forma teórica y experimental antes de su uso clínico (Nath et al., 1995, Rivard et al., 2004).

Siguiendo estas sugerencias, primero, el objetivo fue calcular los valores de parámetros dosimétricos autorizados por el método de simulación de Monte Carlo y para eso era necesario conocer el diseño de la fuente en detalle. Por esta razón en este trabajo se realizaron estudios radiográficos y metalográficos y las características físicas de soldaduras, paredes y marcador de plata de las semillas BRAQUIBAC® fueron determinadas. Espectros de fotones fueron obtenidos con detector planar HPGe y los más importantes picos fueron obtenidos. Desde ellos la anisotropía de la intensidad de fotones en aire y alrededor de la semilla producidas principalmente en los extremos y soldaduras fueron analizadas.

La pureza de la fuente BRAQUIBAC® fue estimada desde estudios espectroscópicos usando detector coaxial HPGe y semillas modelo 6711.

METODOS Y MATERIALES

Estudios de imágenes

Estudios radiográficos

Estudios radiográficos fueron realizados para observar la estructura interna de la fuente BRAQUIBAC®. Para este propósito 10 semillas fueron radiografiadas y algunas de ellas fueron sacudidas para visualizar cambios producidos por los movimientos del tubo de plata.

El dibujo esquemático de la semilla BRAQUIBAC® se muestra en la Fig. 1.

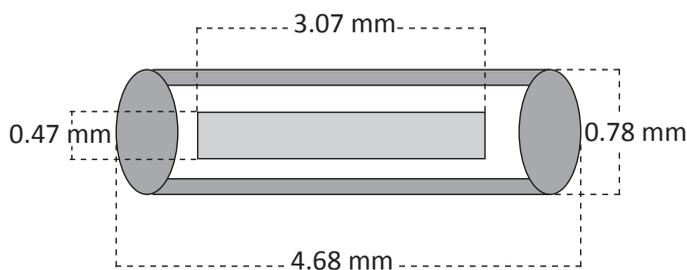


Figura 1 - Diseño esquemático de la semilla BRAQUIBAC® Iodo-125 mostrando las paredes y soldaduras de titanio, el tubo de plata y aire

Un equipo de rayos-x fue usado para tomar las radiografías de las semillas cuando ellas fueron introducidas en un fantoma de acrílico de $30 \times 30 \times 3 \text{ cm}^3$ sobre la camilla. En el momento de las mediciones las 10 semillas tuvieron intensidad de kerma en aire menor que 0.127 U ($1\text{U} = 1 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$) o actividades aparentes (Nath et al., 1995; Williamson et al., 1999) de 0.1 mCi ($1 \text{ U} = 1.27 \text{ mCi}$).

Las radiografías fueron tomadas en 38 kV, tiempo 0.04 s, foco 100 y tamaño de campo $23 \times 24 \text{ cm}^2$. Las radiografías fueron reveladas y escaneadas con equipo apropiado. Longitud física, diámetro físico, tubo de plata, soldaduras y pared de titanio de las semillas fueron determinadas desde las imágenes con un software gráfico.

Estudio Metalográfico

Estudios metalográficos de las semillas fueron hechos para analizar el aspecto general, forma y dimensiones de las paredes y soldaduras. El procedimiento, un método destructivo, consistió en la inclusión dentro de baquelita de 5 muestras en posición horizontal (cinco semillas inactivas) y su posterior tratamiento con un material abrasivo. Las muestras fueron reducidas en etapas y en cada una de ellas algunas fotografías fueron tomadas. Las imágenes fueron amplificadas más de 200 para ver los detalles. Cuando se supuso que se estaba en el plano transversal medio se detuvo el proceso. Eso sucedió en la quinta etapa.

Desde el control visual del menisco, la presencia de fisuras, deformaciones, poros y otros detalles fueron analizados.

Estudio espectroscópico Anisotropía del flujo de fotones

Las características del espectro de fotones de las fuentes BRAQUIBAC® fueron determinadas con un detector planar HPGe acoplado a un analizador multicanal.

Este detector tiene una delgada ventana de berilio con un área activa de 100 mm². Un especial dispositivo fue construido para hacer estas mediciones. Éste fue hecho de acrílico para minimizar la dispersión y además contenía un sistema para leer el ángulo de giro.

El objetivo fue estudiar la dependencia de la intensidad de fotones con la orientación de la fuente y en aire a través de los espectros (Rivard et al., 2004). Para la adquisición de espectros el tiempo vivo fue fijo para obtener una cantidad razonable de cuentas netas (más de 10 mil) en las áreas debajo los picos de fotones y rayos x de ¹²⁵I y rayos x característicos de la plata. 10 semillas BRAQUIBAC® y 2 semillas AMERSHAM 6711 con 0.5 U, aproximadamente, fueron usadas.

La distancia desde el detector al centro de la semilla fue fijada en 40 cm para tener un tiempo muerto menor a 2%.

El procedimiento seguido para hacer las mediciones consistió en colocar la semilla a lo largo del eje del detector (Z) y rotarla sobre el eje perpendicular al anterior.

Segundo, ubicando la semilla perpendicular al eje del detector y rotarla sobre su eje longitudinal (Rustgi, 1992). El setup para ambos casos se muestra en las Figs. 2 (a) y 2 (b).

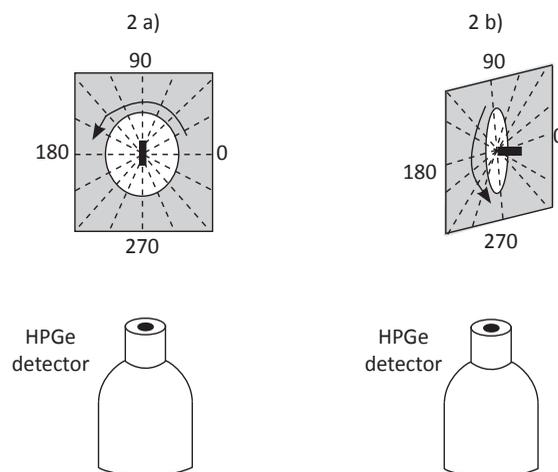


Figura 2 - Setup experimental para mediciones del espectro de fotones emitidos por la fuente BRAQUIBAC® usando un detector planar HPGe con su eje a) coincidente con el eje de la semilla b) perpendicular al eje de la semilla

En el primer caso el objetivo fue evaluar la anisotropía de la intensidad de fotones producida por la pared de titanio, distribuciones de Iodo-125, movimiento del tubo de plata y principalmente por las soldaduras y puntas.

El espaciamiento angular de giro depende de los cambios observados en las intensidades de fotones. Así, en la región donde los cambios más importantes ocurrieron, dentro de ± 10 grados centrados en la posición horizontal y vertical, la semilla fue girada cada grado. Fuera de esa región la semilla fue rotada cada 20 grados.

En las posiciones mencionadas se almacenaron los respectivos espectros.

La intensidad de los fotones fue calculada para cada ángulo y normalizada al máximo valor. El procedimiento fue repetido para cada semilla y un valor promedio con la desviación estandar fue calculado para cada ángulo. Esos resultados fueron comparados con los obtenidos para otro trabajo para la fuente modelo 6711 (Rustgi, 1992; Weaver, 1998).

Los cambios en las intensidades de fotones de cada pico emitido por la semilla fue analizado para cada ángulo.

En el segundo caso el objetivo fue evaluar la anisotropía de fotones debida a la variación del espesor de la pared de titanio, distribución de material radiactivo y movimientos del tubo de plata. Para eso la semilla fue rotada sobre su eje longitudinal cada 20 grados y en esas posiciones se almacenaron los espectros de fotones.

Las intensidades de fotones fueron determinadas para los picos en 22.10 keV, 24.94 keV, 25.45 keV, 27.20 keV, 27.47 keV, 31.0 keV, 31.7 keV y 35.5 keV, desde los espectros ya mencionados.

El procedimiento fue repetido para cada semilla y promedio de las intensidades de fotones fueron calculadas para cada ángulo y cada energía con su desviación standard. Esos valores fueron normalizados al máximo y una desviación fue calculada como el valor máximo menos el mínimo.

Los resultados y los espectros fueron comparados con la semilla 6711 desde otro trabajo (Rustgi, 1992).

RESULTADOS Y DISCUSION

1) En este trabajo radiografías fueron tomadas para las semillas BRAQUIBAC® cuando ellas fueron insertadas en un fantoma de acrílico de 3cm de espesor. La Fig. 3 muestra imágenes obtenidas desde radiografías.



Figura 3 - Radiografías de semillas de ^{125}I BRAQUIBAC® dentro de un fantoma de acrílico

Las soldaduras, el tubo de plata y las paredes de titanio fueron claramente observadas en las imágenes. Eso permitió calcular las dimensiones físicas y compararlas con los valores obtenidos desde estudios metalográficos y desde mediciones con un micrómetro. Las dimensiones físicas promedio de las semillas fueron 4.675 ± 0.060 mm longitud y 0.779 ± 0.013 mm diámetro.

Las incertidumbres calculadas son del tipo A y corresponden a una desviación standard.

La fuente BRAQUIBAC® tiene un tubo de plata de 3.07 ± 0.10 mm longitud y diámetro 0.47 ± 0.05 mm y está encapsulada por titanio de espesor 0.09 ± 0.03 mm y puntas soldadas de espesor 0.39 ± 0.06 mm. La fuente radiactiva es adsorbida sobre el tubo de plata. El diseño de las semillas BRAQUIBAC® es muy similar a las 6711.

2) Desde los estudios metalográficos se analizaron las paredes y soldaduras y los espesores fueron obtenidos.

Una vista longitudinal de la soldadura para una típica semilla BRAQUIBAC® son mostrados en las Figs. 4 y 5, respectivamente.

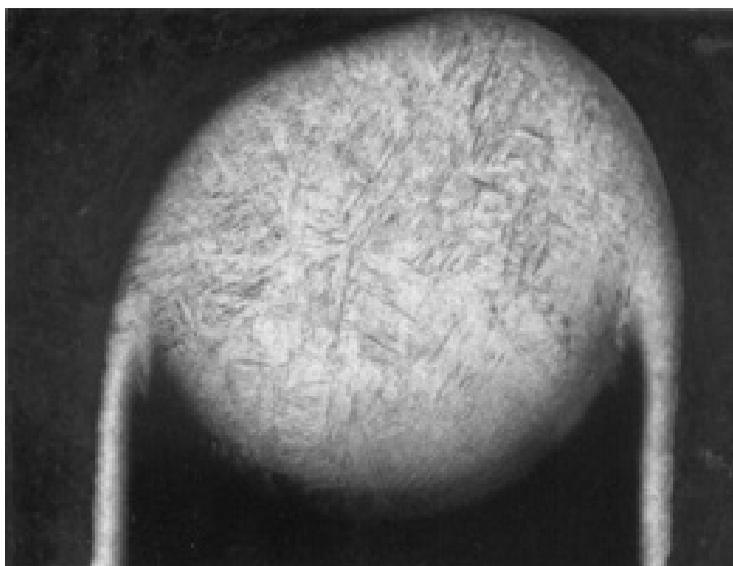


Figura 4 - Vista longitudinal de la soldadura para una típica semilla BRAQUIBAC®

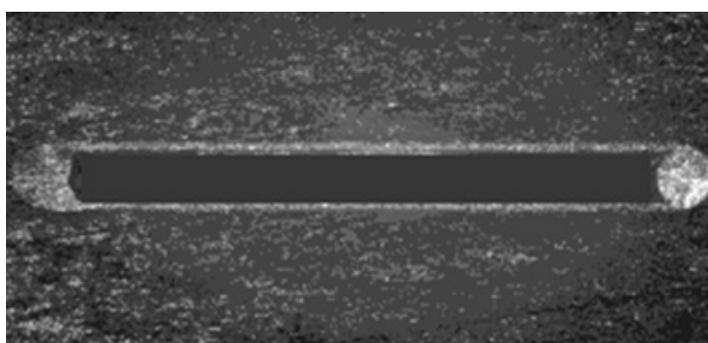


Figura 5 - Vista longitudinal para una típica semilla BRAQUIBAC®

3) Los espectros de fotones emitidos por 6711 y modelo BRAQUIBAC® se midieron con un detector HPGe planar en el plano transversal al eje de las semillas. Un típico espectro de fotones de estas semillas se muestran en las Figs. 6 A) y 6 (b) respectivamente. Todas ellas muestran la intensidad relativa de fotones de energías diferentes.

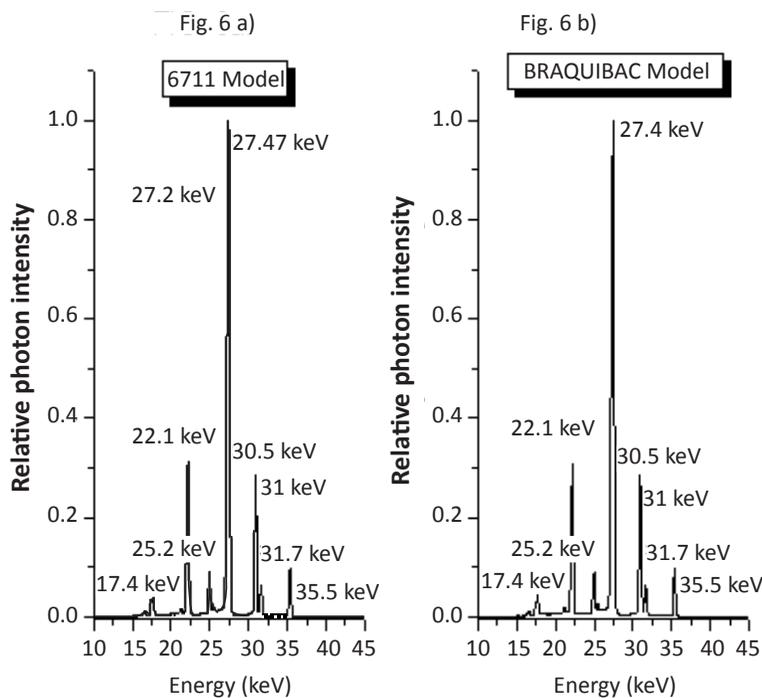


Figura 6 - Típico espectro medido con detector planar HPGe y en aire a) emitido por la fuente modelo 6711 b) emitido por la fuente BRAQUIBAC® cuando fueron rotadas sobre un eje perpendicular al que pasa por su centro

En el espectro de fotones de la fuente BRAQUIBAC® fue posible observar los rayos x característicos de ¹²⁵I en energías 27.4 keV rayos x K α (27.20 K α_2 , 27.47 keV K α_1), 31.0 keV rayo x K β (31.0 keV K β_1 , 30.49 K β_3) y 31.7 rayo x K β_2 , fotones gamma de ¹²⁵I en 35.5 keV. Rayos x fluorescentes desde el tubo de plata fueron observados, K α en 22.1keV (21.99 K α_2 , 22.16 K α_1) y K β en 25.2keV (24.94 K β_1 y 25.45 K β_2).

Los picos de escape en 17.4 keV y 21.2 keV fueron observados en ambos espectros como un resultado de la incompleta absorción de energía debida al escape de los fotones de germanio K α desde el detector de germanio (Nath, 1995).

Los principales picos fueron ajustados por una función Gaussiana y las áreas, alturas y ancho fueron calculados para ambas semillas. Diferencias relativas en altura, ancho y área de los picos resultaron inferiores a 4 %.

El espectro de fotones fue calculado desde las mediciones de área para la fuente de ¹²⁵I BRAQUIBAC® y los resultados fueron comparados a los de la semilla modelo 6711. La Tabla 1 muestra los resultados y los valores de la fuente AMERSHAM fueron tomados desde otro estudio (Rustgi, 1992). Los resultados para la fuente BRAQUIBAC® están en acuerdo con los obtenidos desde otro trabajo (Ling et al., 1983).

Otro punto analizado fue la intensidad total de fotones cuando las semillas fueron rotadas sobre su eje longitudinal y el valor máximo de anisotropía fue calculado como 7.14±4.39 %. El mismo valor fue obtenido para diferentes picos y el valor máximo de anisotropía o variación encontrada fue 12%.

La dependencia angular de la intensidad de fotones para la fuente BRAQUIBAC® fue analizada por una rotación de la semilla sobre un plano paralelo a su eje. La intensidad de fotones para cada ángulo cuando fue normalizada al valor máximo es mostrada en la Fig. 7 con una curva idealizada. En esa figura se muestra un gráfico en coordenadas polares y otro en cartesianas. El último fue hecho de acuerdo a los datos obtenidos desde los valores promedios de los 4 cuadrantes. Desde esos gráficos se observa que los valores aumentan suavemente desde 0.31 para 0° a 0.65 para 20°, 0.88 para 40°, 0.96 para 60° y desde 80° a 90° fue 1.

Energía (keV)	Fotones relativos por decaimiento Modelo BRAQUIBAC®	Fotones relativos por decaimiento Modelo 6711 ^a
22.1	14.94±0.45	15.35
25.2	3.58±0.12	4.27
27.4	62.98±0.48	61.34
31.4	14.67±0.33	15.34
35.5	4.50±0.14	3.68

^aLing et al., 1983

Tabla 1 - Espectro de fotones para fuentes de ¹²⁵I modelo BRAQUIBAC® y 6711

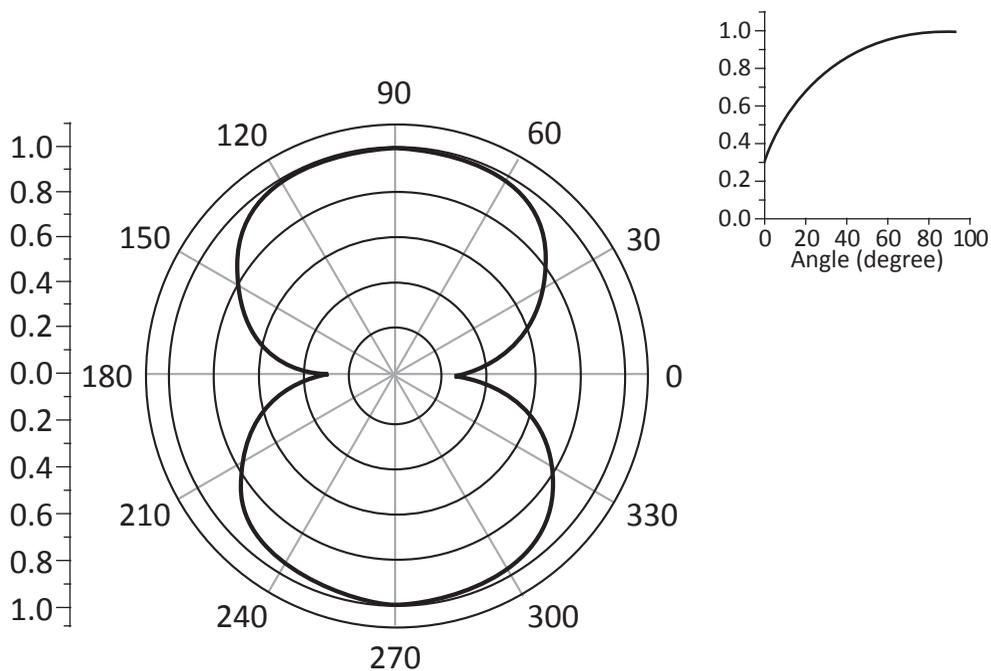


Figura 7 - Intensidad de fotones en aire para la fuente BRAQUIBAC® en coordenadas polares y cartesianas cuando una fuente es rotada sobre un plano transversal a su eje

Finalmente, la mínima intensidad de fotones para la fuente BRAQUIBAC® fue 31.14±3.11% y para la otra fuente fue 21% de la intensidad transversal (Rustgi, 1992; Weaver, 1998).

Los espectros de fotones fueron medidos con un detector planar HPGe siendo la fuente paralela al detector. Un típico espectro de fotones emitidos por la nueva fuente se muestra en la Fig. 8.

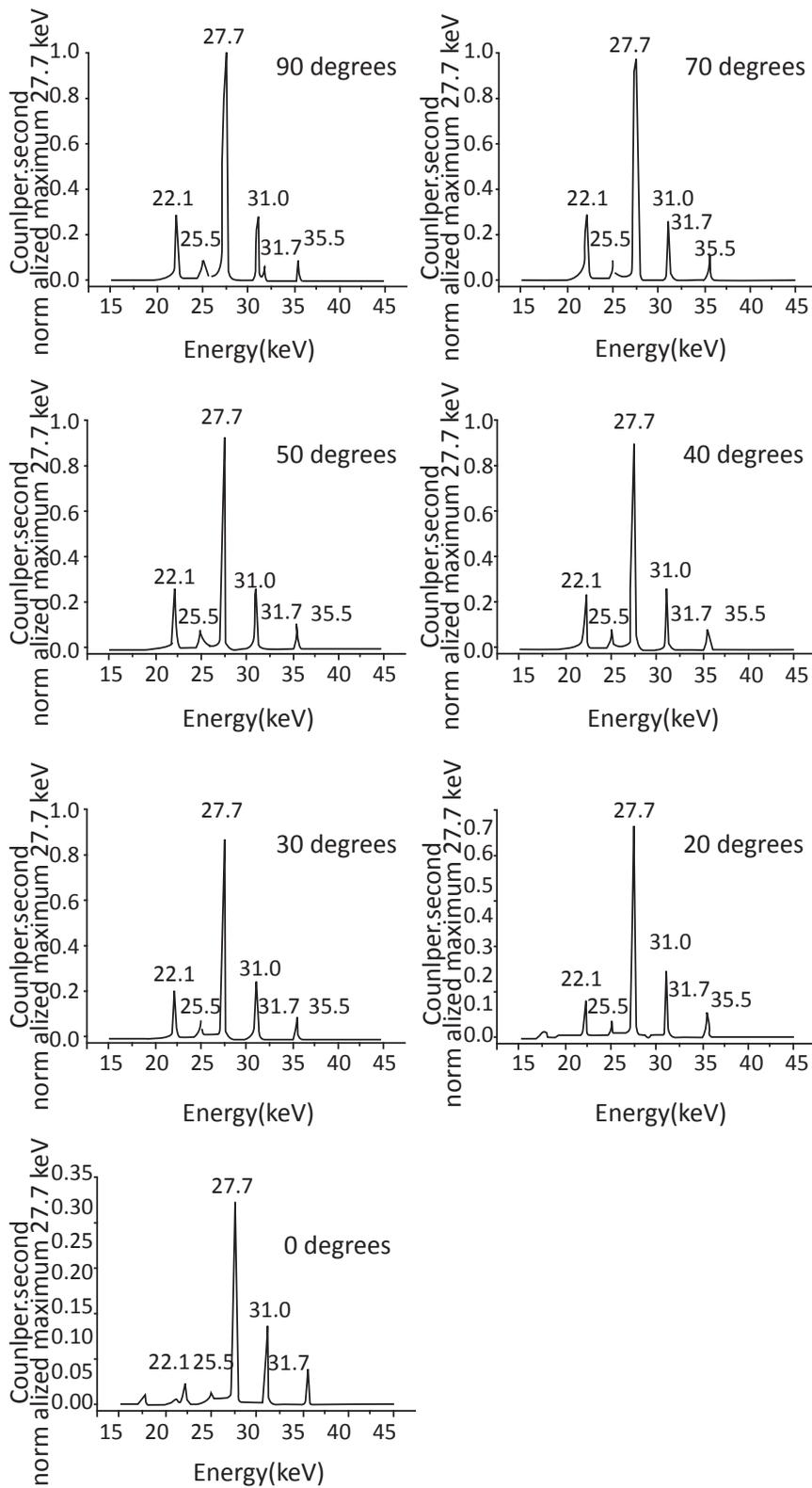


Figura 8 - Típico espectro de fotones para la fuente BRAQUIBAC® mostrando los cambios en las intensidades de fotones cuando la semilla es paralela al detector. Las intensidades se normalizaron al valor máximo en 90° para el pico en 27.74 keV

Otro punto analizado fue la variación angular en la intensidad de fotones para los picos en 22.10 keV, 24.94 keV, 25.45 keV, 27.20 keV, 27.47 keV, 31.0 keV, 31.7 keV y 35.5 keV. Esos valores se normalizaron al valor máximo en 90° y se muestran en la Fig. 9.

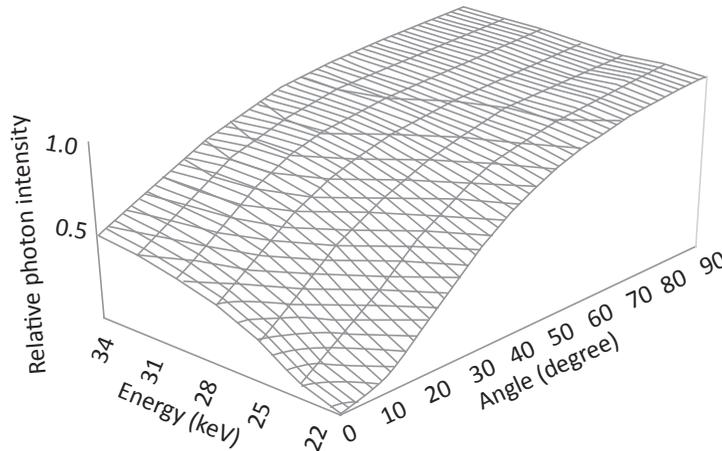


Figura 9 - Intensidad de fotones en aire para la fuente BRAQUIBAC® para diferentes ángulos y los picos en 22.10 keV, 24.94 keV, 25.45 keV, 27.20 keV, 27.47 keV, 31.0 keV, 31.7 keV y 35.5 keV cuando la fuente fue rotada sobre un plano transversal a su eje

Los picos producidos por los fotones de yodo, los rayos x de yodo y los rayos x originados desde el tubo de plata mostraron un aumento en sus intensidades desde 0° a 90°. Eso fue debido principalmente a que la mayor cantidad de material radiactivo fue adsorbida en las paredes laterales del tubo de plata. Otra importante razón fue que los fotones fueron menos atenuados porque el espesor de las paredes fue menor que el espesor de las soldaduras. En la Fig. 8 se muestra que los fotones de baja energía fueron más atenuados por las soldaduras y por el tubo de plata.

También la intensidad de fotones originada desde el tubo de plata fue obtenida desde los espectros. Eso es $18.52 \pm 0.47\%$ de la intensidad total de fotones emitidos para un promedio de 10 semillas BRAQUIBAC® en la dirección transversal de la fuente. Desde otro trabajo (Rustgi, 1992) ese valor fue 20%, aproximadamente, para la semilla modelo 6711.

La intensidad fue $6.15 \pm 0.28\%$ de la intensidad total de fotones en la semilla en la dirección longitudinal para la fuente BRAQUIBAC®.

El flujo total de fotones alcanzó un mínimo en la dirección longitudinal de la semilla y el valor promedio fue $31.14 \pm 3.11\%$ normalizado al flujo máximo alcanzado en la dirección transversal de la fuente.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un detallado estudio radiográfico, metalográfico y espectrométrico de la semilla BRAQUIBAC®. El objetivo fue estudiar la nueva semilla y compararla con la semilla 6711.

La nueva semilla fue caracterizada por una buena visualización radiográfica y metalográfica. En general los resultados metalográficos mostraron que las semillas cumplían los requerimientos para ser seguras y confiables. Desde los resultados de los estudios espectrométricos, se confirmó que la deposición de ^{125}I sobre el tubo de plata era uniforme.

Algunas conclusiones fueron obtenidas desde estudios comparativos entre ambos modelos de semillas.

Primero, desde radiografías se observó que la estructura interna de las semillas BRAQUIBAC® es simi-

lar a la 6711 y el tubo de plata tomó diferentes posiciones para ambas semillas (Rustgi, 1992).

Segundo, los espectros de la Fig. 5 obtenidos con el detector planar HPGe para ambas fuentes son idénticos.

En tercer lugar, los resultados de estudios de intensidades de radiaciones para fuentes BRAQUIBAC® en aire acuerdan dentro del 10 % con los resultados de las fuentes 6711 (Rustgi, 1992; Weaver, 1998) y están en mejor acuerdo con otros trabajos (Bustos et al., 2000).

Finalmente, cuando se compararon los espectros de fotones de ambas semillas se concluyó (Tabla 1) que la mayor diferencia relativa fue aproximadamente 16 %.

Desde todos esos estudios se concluye que la semilla BRAQUIBAC® es similar a 6711 y puede ser usada en pacientes sin riesgos.

AGRADECIMIENTOS

A la Lic. Diana Feld, al personal de la Autoridad Nacional Regulatoria, Hospital Roffo y Laboratorio Bacon.

REFERENCIAS

Pérez, Grigsby, Williamson, "Clinical applications of brachytherapy. I. Low dose-rate," in *Principles and Practice of Radiation Oncology*, 3rd. Ed., edited by Pérez and Brady (Lippincott-Raven, Philadelphia), pp. 405-467, (1997).

Baró, Kiefer, Gutiérrez, Ughetti and Nicolini, "Argentine production of ^{125}I seeds for tumor brachytherapy," in *Proceedings of the Fifth International Conference on Isotopes (Brusselas, Belgium)*, (2005).

Baró, Kiefer, Gutiérrez, Niccolini, Ughetti, Banchik, "Producción en Argentina de semillas radiactivas de yodo 125," *Revista de la Sociedad Argentina de Radioprotección* 22, 32-33, (2003).

Nath, Anderson, Luxton, Weaver, Williamson, Meigooni, "Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43," *Med. Phys.* 22, 209-234, (1995).

Rivard, Coursey, DeWerd, Hanson, Huq, Ibbot, Mitch, Nath and Williamson, "Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations," *Med. Phys.* 31, 633-674, (2004).

Williamson et al., "On the use of apparent activity - A_{app} - for treatment planning of ^{125}I and ^{103}Pd interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy Committee Subcommittee on Low-Energy Brachytherapy Source Dosimetry," *Med. Phys.* 26, 2529-2530, (1999).

Rustgi, "Radiation spectral characteristics of a new double-walled Iodine-125 source", *Med. Phys.* 19, 927-931, (1992).

Weaver, "Anisotropy functions for ^{125}I and ^{103}Pd sources," *Med. Phys.* 25, 2271-2278, (1998).

Ling, Yorke, Spiro, Kubiawicz, Bennett, "Physical dosimetry of ^{125}I seeds of a new design for interstitial implant," *Int. J. Radiat. Oncol., Biol. Phys.* 9, 1747-1752, (1983).

Weaver, "Anisotropy functions for ^{125}I and ^{103}Pd sources," *Med. Phys.* 25, 2271-2278, (1998).

Bustos, Brunetto, Bonzi, Germanier, Rubio, "Trabajo presentado en la 87ª Reunión Anual de la Asociación Física Argentina, "Espectros de energías de semillas de I-125 utilizadas en Braquiterapia: mediciones experimentales y simulación Monte Carlo," 16 al 19 de Septiembre de 2002, Huerta Grande, Córdoba, Argentina, (2000).