

## INCIDENCIA OBLICUA: RADIACION DISPERSA

Ernesto R. CUSTIDIANO<sup>(1)</sup> y José L. DUMONT<sup>(2)</sup>

**RESUMEN:** Se estudiaron algunos efectos de la radiación dispersa cuando un haz de Co-60 incide oblicuamente sobre un blanco (fantoma), de composición similar a tejido biológico (agua). El proceso se simuló mediante el método Monte Carlo (MC) relacionándolo a variaciones del ángulo de incidencia del haz de radiaciones, respecto de la interfase aire-fantoma.

Para analizar el fenómeno de incidencia oblicua se consideró campos de 4x4 cm y realizando la separación de las contribuciones primaria y secundaria. En el se halló que la dosis en el eje central no se ve alterada al variar el ángulo de incidencia, aunque si lo hace la curva de rendimiento en profundidad (H), fundamentalmente como consecuencia del desplazamiento del pico de máxima ionización.

**ABSTRACT:** Some effects of the dispersed radiation were studied when a Co-60 beam impacts obliquely on a target (fantoma), of similar composition to biological tissue (water). The process of was simulated by means of the method Monte Carlo (MC) relating it to variations of the angle of incidence of the radiation beam, regarding the interface air-fantoma.

To analyze the phenomenon of oblique incidence it was considered fields of 4x4 cm and carrying out the separation of the primary and secondary contributions. The dose in the central axis is not altered as the incidence angles vary, although the percent depth dose curve (H) varies, fundamentally as consequence of the displacement of the pick of maximum ionization.

**Palabras claves:** Monte Carlo, Radiaciones, Dosis, Dosimetría

**Key words:** Monte Carlo, Radiations, Dose, Dosimetry

### INTRODUCCIÓN

La evolución de la terapia de radiaciones en los últimos años exige mejorar la exactitud de las determinaciones de dosis.

En la actualidad (de acuerdo a los protocolos) la dosis prescrita debe estar determinada con un error no mayor del 5% en total (García y Tovar, 1984).

Dentro de las incertezas atribuibles al cálculo de la dosis, se obtiene una gran ventaja si se puede mejorar el conocimiento cuali-cuantitativo del comportamiento de los campos de radiación dispersa, los cuales son complicados de estudiar teóricamente, y cuya medición experimental resulta muy complicada. Una situación en la cual la contribución de la radiación dispersa resulta importante en la dosis total es el caso de incidencia oblicua.

Es posible el estudio del fenómeno de incidencia oblicua experimentalmente con los equipos que se poseen en los centros de tratamiento. No obstante, no es posible separar las mediciones en su componente primaria y secundaria, a fin de evaluar las contribuciones por separado (Andreo, 1991; Khan, 1994).

---

(1) Dpto. de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, UNNE. Campus Libertad. (3400) Corrientes. cernesto@exa.unne.edu.ar

(2) Centro de Radioterapia. Crespo 953, (2000). Rosario.

Mediante el método MC es posible separar las componentes primarias y secundaria. En particular, podemos discriminar entre la energía depositada por radiación primaria o secundaria.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La simulación MC del proceso de irradiación de un blanco, consiste en el transporte acoplado electron-gamma de cada una de las partículas incidentes, así como de las partículas secundarias que se generen.

El EGS4 es básicamente un paquete de rutinas desarrolladas para llevar a cabo el transporte, en base a un código que debe ser desarrollado para cada aplicación particular (Nelson, Hirayama y Rogers, 1985).

Para el transporte de electrones y positrones, se utiliza un algoritmo de clase II (Rogers y Bielajew, 1990), en el cual la partícula se transporta en múltiples pasos finitos, dando lugar a la creación de rayos delta, así como radiación de frenado (Bremsstrahlung).

En este tipo de transporte, se consideran por separados los eventos que involucran alta transferencia de energía (creación de rayos delta y radiación de frenado, con energías por encima de un cierto umbral), y se agrupa a los eventos que involucran baja transferencia de energía para dar lugar a una pérdida continua de energía a lo largo de la trayectoria de la partícula cargada. Los eventos de alta transferencia se simulan independientemente, pudiendo generar a su vez sus propias cascadas electrón-gamma.

Además de este proceso, el electrón primario sufrirá múltiples procesos de dispersión cuasi elástica (Scattering múltiple), los cuales no cambian significativamente la energía pero sí alteran la trayectoria. A fin de dar cuenta de esto, se corrigen los cosenos directores a partir de las distribuciones apropiadas, y se corrige la longitud de camino recorrida (Path Length Correction), a fin de evitar errores sistemáticos en la longitud real recorrida, lo cual afecta las probabilidades de interacción (Nelson, Hirayama y Rogers, 1985). De esta forma, se da cuenta de los procesos fundamentales relativos al transporte de partículas cargadas.

Se utilizó parámetros correspondientes al agua para simular el proceso, debido a la equivalencia con tejido biológico y ser el medio de referencia en los protocolos de dosimetría (ICRU 24, 1976).

Se simuló el espectro de rayos gamma provenientes de una fuente de Co-60, supuesta puntual y cuyas energías (equiprobables) eran  $E_1=1.17$  Mev y  $E_2=1.33$  Mev, (Cohen *et al.*, 1983), Fig.1.

La fuente se situó a una distancia de 80 cm de la superficie (SSD=80) y la energía depositada se registró en celdas de  $0.20 \times 0.20 \times 0.20$  cm.

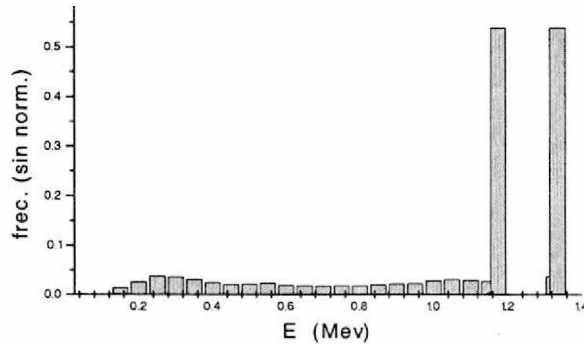
El porcentaje de dosis en profundidad (H), se registra para el eje central y puntos vecinos, referido al punto de dosis máxima, asumida a 0.5 cm. de profundidad.

Para estudiar la incidencia oblicua, se simuló la irradiación de un fantoma de agua, para un tamaño de campo de  $4 \times 4$  cm para ángulos de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$  del haz, respecto de la normal

Para este estudio se utilizó un haz detallado de una unidad de cobaltoterapia, incluyendo además de las líneas propias del cobalto, las energías de la radiación fotónica

secundaria proveniente de la cápsula y del colimador. El haz completo se consideró radiación primaria para el fantoma.

El espectro mencionado se observa en la Fig.1



**Fig. 1:** Espectro del haz de radiación de una unidad de Co-60. No incluye la contaminación electrónica, sólo fotones primarios y secundarios de cápsula y colimador.

## RESULTADOS

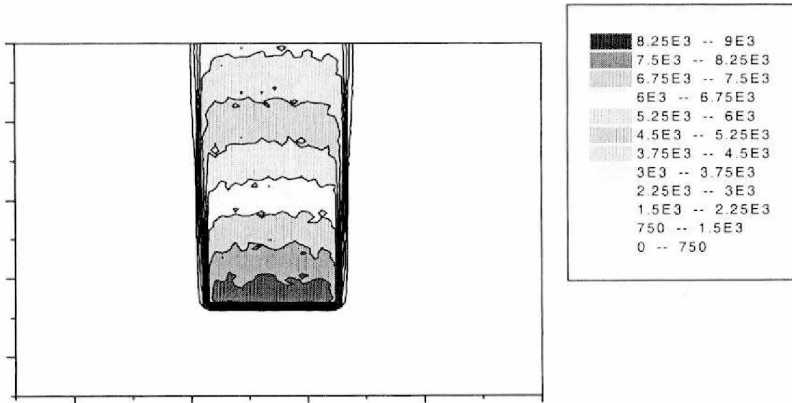
Se simularon del orden de 108 historias, para incidencias de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ , respecto de la normal respectivamente.

De las matrices de dosis totales, se obtuvo las curvas de rendimiento en profundidad (H), normalizadas a 0.5 cm de profundidad medidos en el eje central.

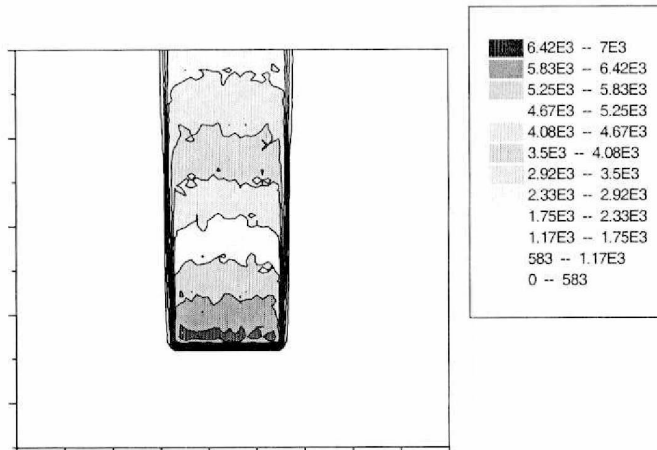
Las curvas de H muestran un aumento del rendimiento a medida que se incrementa el ángulo de incidencia, del orden del 2-3 % promedio de la dosis máxima.

Se realizó el análisis de la contribución a la dosis total de la componente primaria y la de la componente dispersa. Esta posibilidad es casi exclusiva de las simulaciones Monte Carlo, al menos en una forma cuasi "realista".

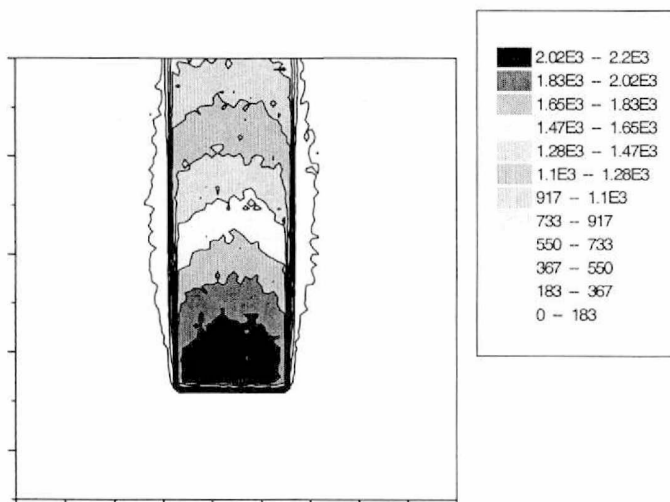
En las Figs.2 a 4 se observan las curvas de nivel de la dosis total y de las componentes por separado, para el campo 4x4 y para incidencia normal.



**Fig. 2:** Dosis Absorbida total simulada para el campo de 4x4.

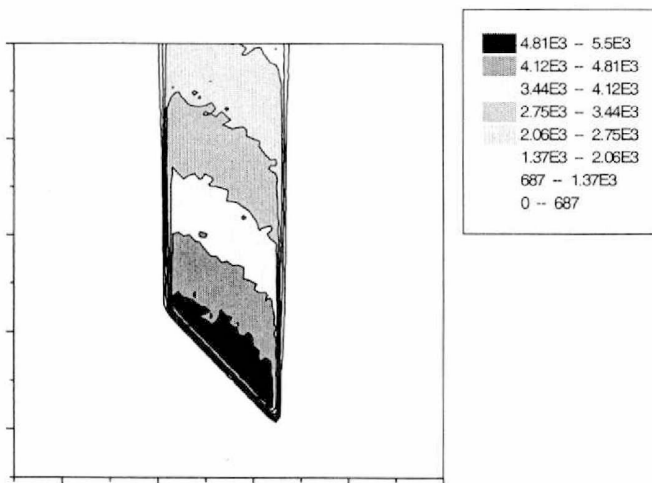


**Fig. 3:** Componente primaria de la dosis Absorbida para Incidencia Normal.



**Fig. 4:** Componente secundaria de la dosis Absorbida para Incidencia Normal.

Las Figs. 5 a 7 muestran lo propio para el caso de incidencia a  $45^\circ$ , en tanto las Figs. 8 a 10 corresponden a incidencia a  $60^\circ$ , respecto de la normal.



**Fig. 5:** Dosis Absorbida simulada total para el campo de 4x4, (sin procesar). Incidencia a  $45^\circ$ .

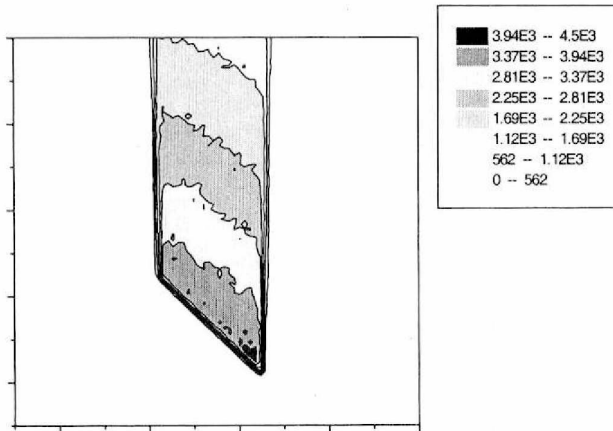


Fig. 6: Componente primaria de la dosis Absorbida. Incidencia 45°.

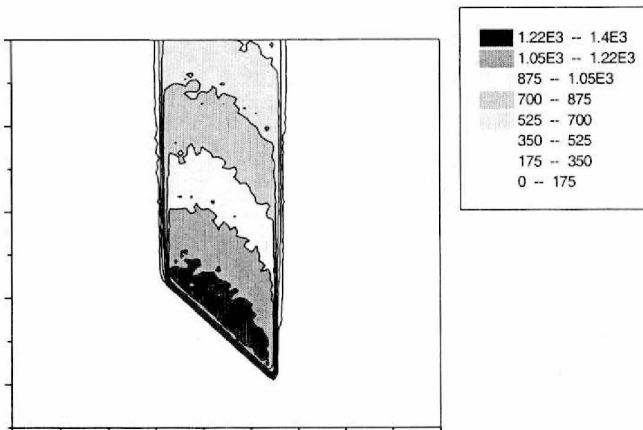
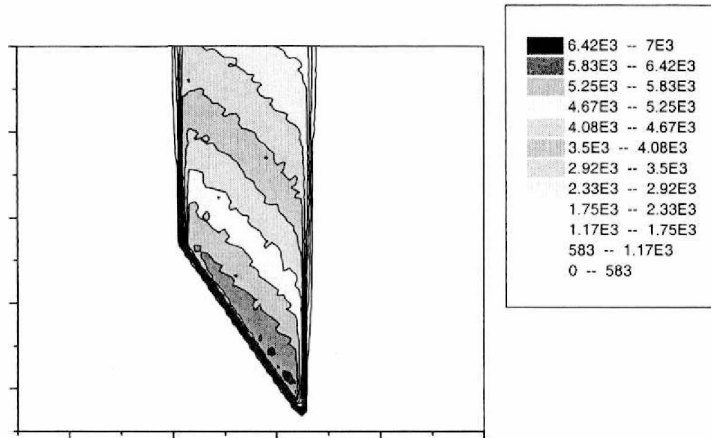
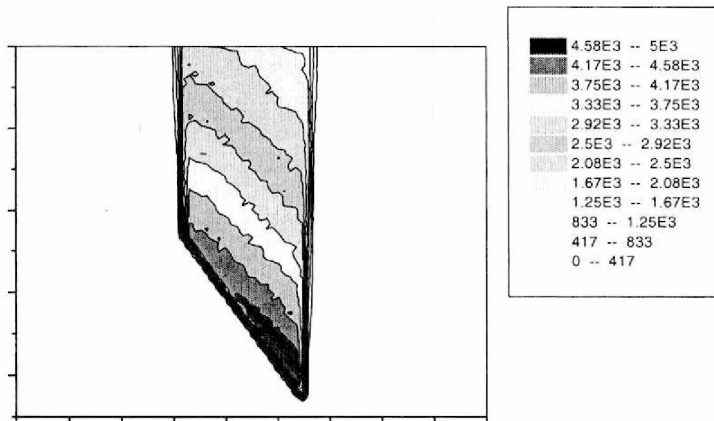


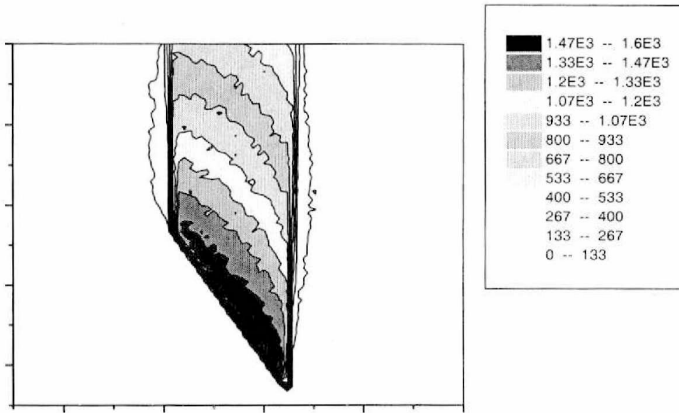
Fig. 7: Componente secundaria de la dosis Absorbida Incidencia 45°.



**Fig. 8:** Dosis Absorbida simulada total para el campo de 4x4. Incidencia a 60°.



**Fig. 9:** Componente primaria de la dosis Absorbida. Incidencia 60°.



**Fig. 10:** Componente secundaria de la dosis Absorbida. Incidencia 60°.

En incidencia oblicua, al haber una ruptura de simetría en un eje transversal, no se pueden realizar promedios de los datos de ese eje, mas allá de unos pocos mm del eje central, y aun así las diferencias pueden ser significativas según uno considere un muestreo hasta 2, 4 ó 6 mm desde el eje central.

Esto puede tener implicaciones desde el punto de vista experimental, pues un detector de cámara de ionización, tiene al menos 5 ó 7mm de diámetro.

Se observa al igual que para el campo de 4x4, un aumento del rendimiento en profundidad y una constancia de la tasa de dosis a lo largo del eje central luego del primer centímetro, según se verifico para un ángulo de 45°.

## DISCUSIÓN

Del análisis de los resultados se infiere que el rendimiento en profundidad aumenta con el ángulo de incidencia del haz respecto de la normal.

No obstante, también se observa una disminución de la dosis absorbida a 0.5 cm de profundidad, medidos a lo largo del eje del haz. Esto puede deberse al hecho de que la profundidad medida a lo largo del eje del haz no es la profundidad efectiva en el medio.

Aparentemente estas dos diferencias respecto de la situación de incidencia normal tienden a cancelarse, por lo que el efecto combinado es la cancelación mutua en el eje del haz al variar el ángulo de incidencia.

Para verificar esto, se dividieron los datos de dosis absorbida por el número de historias de la simulación, y dado que el número de fotones es proporcional al tiempo, se obtiene un valor que difiere de la tasa de dosis en una constante, que obviaamos.

A la luz de esto, una conclusión a verificar experimentalmente es que, al menos para este tamaño de campo (4 x 4), la incidencia oblicua no cambia la tasa de dosis



medida en el eje central hasta un ángulo de incidencia de 60° inclusive, y no hay indicios de que fuera a cambiar a incidencia mayor. Por lo tanto, los cálculos usuales, con el factor de calibración en superficie a incidencia normal y la tabla de H a incidencia normal, son validos para la incidencia oblicua en el eje, sin error detectable por este método.

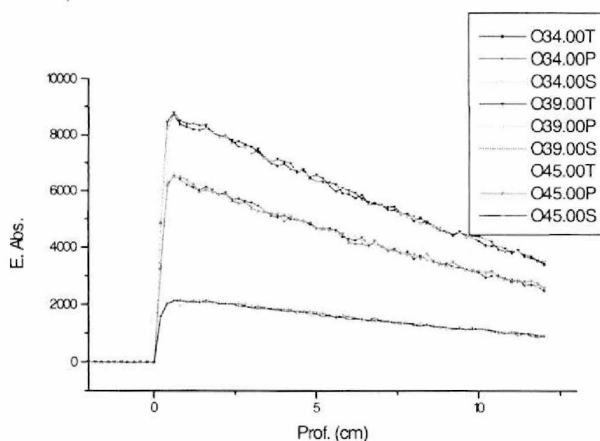
En realidad, los métodos de corrección de isodosis usuales asumen que el eje central permanece inalterado, dado que a ambos lados del mismo las correcciones tienen distinto signo (11).

Nuestro estudio indica que si hay una variación de la curva de H (creciente con el ángulo), pero que esta se compensa con una disminución de la tasa de dosis en superficie.

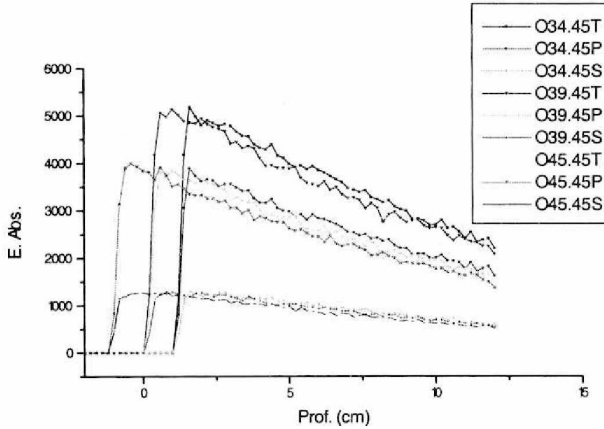
Si solo estuviéramos interesados en la curva de PDD, debíamos estudiar esto con mas detalle, pero la realidad es que lo que nos interesa es el cálculo de la dosis en base a los factores de calibración que se tienen, los cuales no se corrigen por incidencia oblicua.

El error introducido por omitir la corrección en el PDD parece compensarse así con el error del factor de calibración, no haciendo necesarias las correcciones en el eje central.

Esto se observa en las Figs. 11 y 12, donde se muestra, para el campo de 4x4, las componentes total, primaria y secundaria para el eje central y a izquierda y derecha del mismo, para incidencia normal y a 45o.



**Fig. 11:** Energía absorbida (unidades arbitrarias) total, primaria y secundaria para campo de 4x4 e incidencia normal. Eje central y  $\pm 1$  cm.

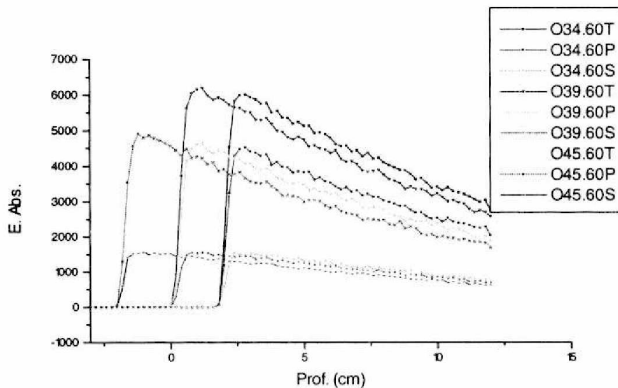


**Fig. 12:** Energía absorbida (unidades arbitrarias) total, primaria y secundaria para campo de  $4 \times 4$  e incidencia a  $45^\circ$ . Eje central y  $\pm 1$  cm.

En incidencia normal, tanto las componentes primarias como las secundarias son prácticamente iguales para el eje central y puntos a  $\pm 1$  cm del eje, Fig.11.

Se observa que para el caso de incidencia a  $45^\circ$ , la variación de la componente secundaria es muy pequeña, siendo la variación de la primaria la contribuyente fundamental a la variación total al movernos transversalmente, Fig.12.

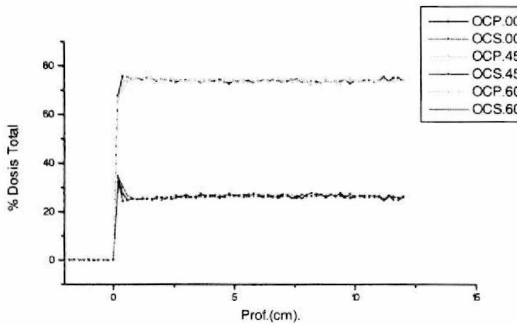
Si se aumenta aún más la oblicuidad ( $60^\circ$ ), se aprecia que ambas componentes varían, pero la secundaria en mucho menor medida, Fig.13.



**Fig. 13:** Energía absorbida (unidades arbitrarias) total, primaria y secundaria para campo de  $4 \times 4$  e incidencia a  $60^\circ$ . Eje central y  $\pm 1$  cm.

Finalmente, se analizaron las fracciones de la dosis total en el eje central correspondiente a radiación primaria y secundaria, para incidencia normal,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ .

Se halló que la contribución relativa de la radiación secundaria permanece constante al variar la incidencia, Fig.14. Esto podría significar que la contribución de las zonas de menor cantidad de materia (menor ella), se ve compensada por la contribución proveniente de las zonas adyacentes, con mayor cantidad de material irradiado, y por lo tanto generando mayor cantidad de radiación dispersa. Como ambos campos son del mismo orden, su variación también lo será, aunque de signo contrario, por lo que al sumarlas se cancelan, dando lugar a una contribución neta constante de la radiación secundaria en la zona.



**Fig. 14:** Contribución a la dosis total de la radiación primaria y secundaria, para Incidencias de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ , y para el eje central.

## CONCLUSIONES

Al estudiar la incidencia oblicua, se halló que las dosis en el eje central no sufrían alteración al variar el ángulo de incidencia dentro de amplios márgenes, desde  $0^\circ$  a  $60^\circ$  inclusive. Se infiere que esto se debe a la constancia de la componente primaria al variar el ángulo de incidencia, y a la cancelación de las variaciones de las contribuciones secundarias provenientes de los flancos del eje.

Analizadas por separado las contribuciones de la radiación primaria y la radiación secundaria, se halló que las variaciones de la dosis por incidencia oblicua en puntos fuera del eje central se debían fundamentalmente a la variación de la fluencia primaria y que los puntos "calientes" se deben a la radiación primaria.

## REFERENCIAS

AAPM, Protocolo.

ANDREO, P., 1991. Monte Carlo Techniques in Medical Radiation Physics. *Phys. Med. Biol.*, Vol. 36, N<sup>o</sup> 7, 861-920.

COHEN M., GODDEN T.J. *et al.*, 1983. Central Axis Depth Dose Data For Use in Radiotherapy, Section 4, Gamma Radiation from Cobalt 60 Teletherapy Units. *British Journal of Radiology*, Sup 17, pag.53

GARCÍA, E. y V.M. TOVAR, 1984. En: *Manual para el Uso de Aceleradores Lineales de Electrones en Radioterapia*. Ap. F. Ed. Edilibros S.A., México

ICRU 24, 1976. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures. *International Commission on Radiation Units*, Report N<sup>o</sup> 24, Washington.

JOHNS and CUNNINGHAM, 1983. *The Physics of Radiology*. Charles Thomas Publisher. Springfield, Illinois, EUA.

Khan, F.M., 1994. *The Physics of Radiation Therapy*. Williams & Wilkins.

NELSON W.R.; H. HIRAYAMA and D.W.O. ROGERS, 1985. The EGS4 Code System. Stanford Linear Accelerator Center, SLAC Report 265.

ROGERS, D.W.O. and A. BIELAJEW, 1990. In: Monte Carlo Techniques of Electron and Photon Transport for Radiation Dosimetry, Chap. 5, Vol III of: *The Dosimetry of Ionizing Radiation*, edit. por R. Kase B. Bajrangard y F. Attix, Academic Press.

*Recibido/Received/: Oct-99*  
*Aceptado/Accepted/: May-00*