

Caracterización de la película radiocrómica EBT2 con diferentes sistemas ópticos

Elsa Yazmín León-Marroquín^{1,2}, Olivia Amanda García-Garduño¹, Miguel Ángel Camacho-López²

RESUMEN

Con el advenimiento de nuevas técnicas de tratamiento en radiocirugía los requerimientos de comisionamiento y caracterización representan un reto dosimétrico de alto impacto clínico. Al respecto, las películas radiocrómicas (PR) han tomado mayor relevancia debido a que poseen una alta resolución espacial y equivalencia a tejido¹⁻⁷. Sin embargo, es necesario un sistema óptico (SO) para medir la densidad óptica (DO) relacionada directamente con la dosis. *Objetivo:* caracterizar las PR-EBT2 utilizando tres SO: escáner, espectrofotómetro y láser. *Material y métodos:* se utilizarán PR-EBT2 irradiadas en un acelerador lineal de 6 MV y los SO de lectura ya mencionados, la caracterización de las películas consistirán en obtener las curvas de calibración, los espectros de absorción y polarización. *Resultados:* durante el análisis en el espectro de absorción se encontraron dos picos centrados en 585 nm y en 636nm, la posición de estos picos se conserva después se observa un aumento en la intensidad a medida que se incrementa la dosis. Respecto a la polarización, se observa que a medida que aumenta la dosis, el grado de polarización disminuye. Por último, para las curvas de calibración cada uno de estos SO presenta diferente sensibilidad siendo el espectrofotómetro el que posee la mayor. *Conclusiones:* es posible utilizar láser y espectrofotómetro como SO alternativos para analizar las PR EBT2, con ello, se puede evitar el efecto de la polarización, así como aumentar la sensibilidad en la respuesta, ya que estos factores

influyen en la incertidumbre total en la determinación de la dosis.

Palabras clave: películas radiocrómicas, escáner, espectrofotómetro, láser.

CHARACTERIZATION OF RADIOCHROMIC FILM EBT2 WITH DIFFERENT OPTICAL SYSTEMS

ABSTRACT

Objective: characterization of radiochromic film EBT2 (RF-EBT2) with three different optical systems (OS): scanner, spectrophotometer and laser. *Material and methods:* the RF-EBT2 films were irradiated at different dose levels with a linear accelerator of a nominal energy of 6 MV and analyzed with three different OS. The film characterization consists of calibration curves, absorption and polarization spectrum. *Results:* in the analysis of absorption spectrum, it was found two absorptions peaks centered at 585 nm and 636nm, their positions are not dose dependent within the dose range studied. The optical density increases as the dose level increases. However, the increment depends on the wavelength at which it is measured. The polarization effect shows that change in optical density decreases as the dose increases. Finally, the calibration curve shows different sensitivity levels with each OS, nevertheless the spectrophotometer presents higher film response. *Conclusion:* it is possible to use a spectrophotometer and a laser to analyze the response of RF-EBT2 with the advantage that the response of the film is orientation independent for these OS compared with a commercial flatbed scanner.

Key words: radiochromic film, scanner, spectrophotometer, laser.

¹Laboratorio de Física Médica y Unidad de Radioneurocirugía, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía. ²Laboratorio de Fotomedicina, Biofotónica y Espectroscopía Láser de Pulso Ultracortos, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma del Estado de México. Correspondencia: Olivia Amanda García Garduño. Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía, Laboratorio de Física Médica. Insurgentes Sur # 3877, Col. La Fama. 14269 México, D.F. Email: oagarcia@innn.edu.mx

El principio de la radiocirugía y radioterapia estereotáctica es la entrega de una alta dosis de radiación ionizante a un blanco muy específico protegiendo a su vez los órganos de riesgo circundantes que pueden ser afectados por este depósito de dosis. Un mecanismo del control de calidad en tratamientos de este tipo se lleva a cabo mediante el empleo de detectores de radiación para verificar que el depósito de dosis se lleve de una forma precisa y exacta, entre los cuales destaca el uso de películas radiocrómicas (PR) por su alta resolución espacial y su fácil manejo en la clínica.

Aunado a ello, con el advenimiento de nuevas técnicas de radiocirugía, las cuales requieren de un comisionamiento y caracterización arduos; sobre todo si se trata de campos no convencionales de radiación; las PR han tomado mayor relevancia debido que poseen una alta resolución espacial y son equivalente a tejido¹⁻⁷.

Al momento de ser analizados, este tipo de detectores requieren algún sistema óptico para medir la densidad óptica (DO) que se relaciona directamente con la dosis depositada durante el control de calidad o simulación de un tratamiento, que por lo general en la clínica, es un escáner comercial en modo de transmisión. El conjunto PR-escáner permite realizar dosimetría bidimensional con alta resolución espacial en un intervalo dosimétrico amplio de uso clínico. Sin embargo, existen diversos aspectos fundamentales que deben considerarse al emplear un escáner; tales como, dependencia de la respuesta con la orientación relativa de la película-escáner, falta de homogeneidad en el área útil de escaneo, parámetros de escaneo, estabilidad del escáner, incertidumbre del escáner y curva de calibración⁸⁻¹⁵. Estos factores deben tomarse en cuenta para minimizar la incertidumbre total aceptable en la determinación de la dosis.

Además del escáner, existen otros sistemas ópticos, como láser y espectrofotómetros, que pueden ser empleados para el análisis de las PR ya que ambos poseen cualidades que se pueden aprovechar para caracterizar las películas obteniendo una mayor sensibilidad en la respuesta (DO) para el empleo de este tipo de detectores en la clínica.

La luz láser presenta tres características que la hacen interesante para utilizarla como sistema de lectura de las PR, estas son: *monocromatidad, coherencia y direccionalidad*. Por lo tanto, no hay necesidad de utilizar filtros pasabanda y su escasa divergencia permite determinar la DO en forma puntual (del orden de micras).

Por su parte, los espectrofotómetros son sistemas ópticos con los que se puede obtener el espectro de absorción de las PR. El espectro de absorción muestra la respuesta de la película (DO) como función de la

longitud de onda, para cada una de las PR irradiadas a diferentes dosis. Asimismo, se puede observar, de manera cualitativa, la dependencia de la sensibilidad en la respuesta de las películas con la dosis absorbida.

OBJETIVO

Se pretende caracterizar las PR EBT2 utilizando tres sistemas ópticos: un escáner EpsonPerfection V750, un espectrofotómetro UV/VIS de doble haz y un láser de He-Ne centrado en 633 nm (rojo) para un intervalo de dosis de 0 a 10 Gy para ver pos-teriormente su posible uso en la clínica. Para la caracterización óptica se obtuvo el espectro de absorción neta de las PR. El efecto de la polarización inducida en las películas por la radiación se analizó con un láser de He-Ne linealmente polarizado. La depen-dencia con la orientación se caracterizó con el espectrofotómetro colocando las PR a 0 y 90°. Por último, las curvas de calibración se obtuvieron para los tres sistemas ópticos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Irradiación de las películas radiocrómicas

Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron PR EBT2 (Gafchromic®, International Specialty Products) con número de lote A12171003B, de las cuales se tomaron muestras de tamaño 3 x 3 cm². Estas se irradiaron con un acelerador lineal Novalis®BrainLAB de energía nominal de 6 MV en modo de fotones perpendicularmente al haz de irradiación. Para la irradiación, las películas se colocaron dentro de un maniquí de agua sólida PlasticWater® CIRS-PCW500 a una profundidad de 5 cm, una distancia fuente-detector (SAD por sus siglas en inglés) de 95 cm y un tamaño de campo de 10 x 10 cm². Las películas se irradiaron en un intervalo de 0 a 10 Gy, tomando las siguientes dosis 0, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 Gy. Para cada valor de dosis se irradiaron tres muestras de película con el objeto de reducir la incertidumbre estadística¹⁶. El análisis de la PR se realizó 72 hs después de la irradiación, con la finalidad de que se estabilizará el proceso de polimerización desencadenado por la irradiación¹⁷.

Caracterización de las películas

Espectro de absorción

El espectro de absorción de las PR EBT2 se obtuvo utilizando un espectrofotómetro UVNIS de doble haz marca Perkin Elmer modelo Lambda 650. El espectro se corrió de 400 a 800 nm. Para realizar el análisis de los posibles efectos de orientación relativa,

las PR se colocaron en dos orientaciones relativas película-espectrofotómetro 0 y 90°.

Efecto de la polarización

Para realizar la caracterización de la polarización de las PR, se utilizó un láser de He-Ne de emisión continua (CW) centrado en 633 nm (rojo) y un fotodiodo de silicio EOT modelo ET-2040. Las películas se colocaron sobre una mesa de rotación y se midió la transmitancia cada 5°, en un intervalo angular de 0 a 360°.

Curvas de calibración

Para los diferentes sistemas ópticos se tomaron las siguientes consideraciones:

a. Escáner

Las PR EBT2 fueron leídas utilizando un escáner de cama plana Epson Perfection v750, antes y después de ser irradiadas. Todas las películas fueron leídas en modo transmisión, en formato RGB, con una resolución de 72 puntos por pulgada, con 48 bits de profundidad de color, con todas las opciones de procesamiento de imágenes desactivadas, las cuales se guardaron en formato TIFF y los datos se procesaron con el software *ImageJ*, extrayendo la información de componente roja¹⁷⁻¹⁹. Después, se delimitaron regiones de interés de 2 x 2 cm². Puesto que se tenían tres películas correspondientes a cada valor de la dosis, se realizó un promedio de intensidades y se calculó la DO utilizando la ley de Lambert-Beer²⁰, expresada por la siguiente ecuación:

$$DO(\lambda) = \log_{10} T(\lambda) = \log_{10} \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \quad (1)$$

La propagación de la desviación estándar se realizó con la ecuación

$$\sigma_{DO} = \frac{1}{\ln 10} \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_0}}{I_0}\right)^2} \quad (2)$$

Para construir la curva de calibración se grafico la DO neta como función de la dosis.

b. Espectrofotómetro

La DO neta de las películas se obtuvo de los espectros de absorción neta. La curva de calibración se construyó tomando los valores de la DO neta correspondientes a la longitud de onda de 636 nm de cada uno de los espectros de las PR.

c. Láser

Una vez obtenida la transmitancia de las películas, se utilizó la ecuación 1 para determinar la DO neta de las películas. La curva de calibración se construyó graficando la dosis en función de la DO neta.

RESULTADOS

Espectro de absorción

En la figura 1 se muestra el espectro de absorción neta de las PR EBT2 irradiadas con rayos X de 6 MV y para un intervalo de dosis absorbida de 0 a 10 Gy, tomando como 0 Gy la película sin irradiar. Las películas se analizaron en un intervalo de longitudes de onda de 400 a 800 nm, que corresponde a la región de luz visible del espectro electromagnético.

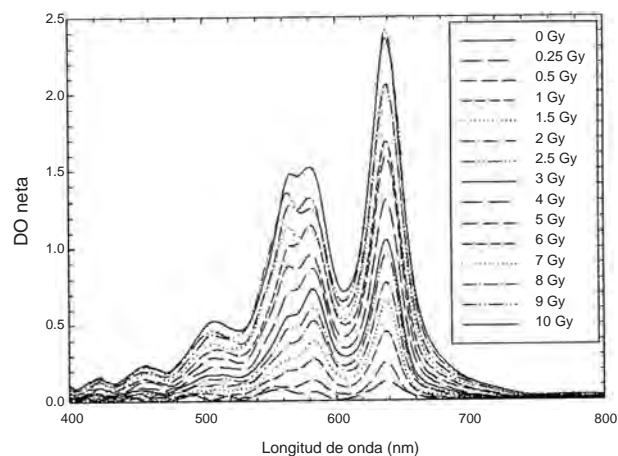


Figura 1. Espectro de absorción neta de las PR EBT2 irradiadas con rayos-X de 6 MV en el intervalo de dosis absorbida de 0 a 10 Gy.

El espectro de las PR EBT2 presenta dos picos de absorción centrados en 585 nm y en 636 nm. La posición de estos picos se conserva dentro del intervalo de dosis estudiado (0 - 10 Gy), observándose un aumento en la intensidad de ambos picos (DO neta) a medida que se incrementa la dosis. El espectro de absorción muestra cualitativamente, la sensibilidad de las películas. Se observa que las PR EBT2 presentan mayor sensibilidad a 636 nm. Esta longitud de onda corresponde a la luz roja, razón por la cual el fabricante recomienda que las películas irradiadas a estas dosis se lean en el canal rojo.

Efecto de la polarización

Un aspecto importante a considerar cuando se realiza dosimetría con PR es el efecto de la polarización inducida por la radiación ionizante. Este efecto produce

una variación en la respuesta (DO neta) como función del ángulo de rotación cuando las películas se analizan con una fuente de luz polarizada. El efecto de polarización ya ha sido estudiado en los modelos anteriores a la PR EBT2, atribuyendo este efecto a la orientación preferencial de las cadenas de polímeros inducida por la radiación^{21,22}.

La figura 2 muestra la respuesta angular de la transmitancia como función del ángulo de rotación de las PR EBT2 analizadas con un láser de He-Ne linealmente polarizado. Se puede observar el efecto de la dosis sobre el grado de polarización que se induce en la película. A medida que aumenta la dosis, el grado de polarización disminuye. Este comportamiento se debe a que al aumentar la dosis aumenta la polimerización de la película hasta llegar una dosis de saturación, donde no quedan más monómeros que reaccionen a la radiación.

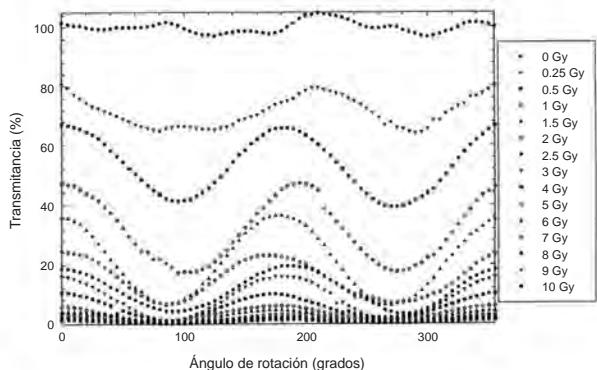


Figura 2. Respuesta angular de la transmitancia de las PR EBT2 analizadas con una fuente de luz polarizada (láser He-Ne) para el intervalo de dosis de 0 a 10 Gy.

Dependencia con la orientación

Otro aspecto importante que se debe tener en cuenta al utilizar PR es la dependencia de la respuesta con la orientación relativa película-sistema óptico. Esta se presenta como un cambio en la DO neta como función de la dirección de escaneo, y dependiendo del sistema óptico, dicho efecto será de diferente magnitud.

La figura 3 muestra el efecto de la orientación en el cambio de la densidad óptica neta ($\Delta OD_{90^\circ - 0^\circ}$) como función de la dosis. Los cambios en la DO neta son de hasta un 32.3% (entre 0 y 90°) para las películas irradiadas a 0.5 Gy. Como se puede observar esta diferencia disminuye con la dosis, obteniéndose un cambio de 5.2% (entre 0 y 90°) para la película irradiada a 10 Gy.

Curvas de calibración

La figura 4 muestra las curvas de calibración de las PR EBT2 analizadas con los tres sistemas de lectura para el intervalo de dosis de 0 a 10 Gy. Como puede

observarse, cada uno de estos sistemas ópticos presenta diferente sensibilidad dependiendo de la longitud de onda o intervalo de longitudes de onda que utilizan para el análisis de la película. El escáner utiliza la componente roja (600-700 nm)⁸, el láser la línea de emisión a 633 nm y para el espectrofotómetro se tomó la DO neta a 636 nm. Con el láser y espectrofotómetro se obtienen valores para la DO de 1.901 y 2.123, respectivamente, para una dosis de 10 Gy. Para el caso del escáner se tiene un valor de la DO de 0.504 correspondiente a la dosis de 10 Gy, obteniendo una diferencia del 73% con respecto a la respuesta con el láser y un 76% comparada con la respuesta del espectrofotómetro.

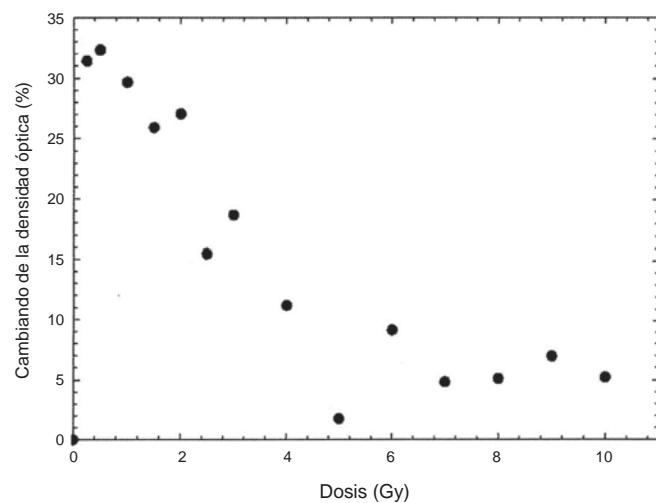


Figura 3. Efecto de la orientación de las PR EBT2 en el cambio de la DO neta entre 0 y 90° como función de la dosis ($\lambda=636$ nm).

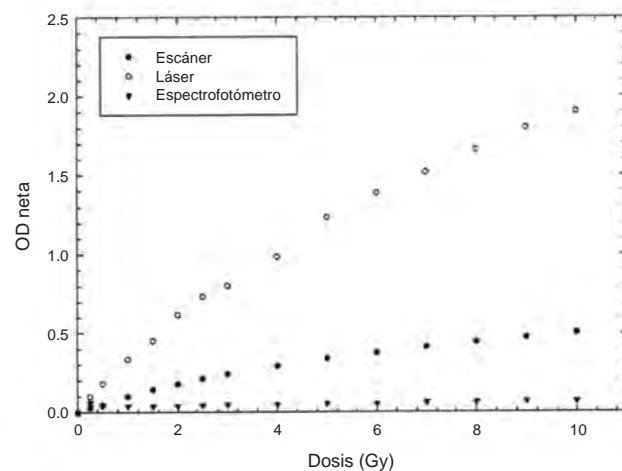


Figura 4. Curvas de calibración de las PR EBT2 analizadas con los tres sistemas ópticos para el intervalo de dosis de 0 a 10 Gy.

Por otra parte, aunque el espectrofotómetro y el láser utilizan una fuente con una sola longitud de onda, el espectrofotómetro presenta mayor sensibilidad debido a que los valores de la DO neta para cada nivel de

irradiación se tomaron a 636 nm, correspondiendo al pico de absorción y el láser tiene su línea de emisión a 633 nm, razón por la cual presenta un 10.5% menos sensibilidad respecto al espectrofotómetro. Como el escáner utiliza un ancho de banda de 100 nm, ocasiona que la saturación ocurra más rápido, por lo tanto, la sensibilidad sea menor.

DISCUSIÓN

El espectro de absorción de las PR EBT2 muestra dos picos de absorción centrados en 585 nm y 636 nm manteniéndose esta posición en el intervalo de dosis estudiado (0 a 10 Gy), mostrando un aumento en la intensidad cuando aumenta la dosis. De manera cualitativa, en el espectro de absorción se observa la sensibilidad en la respuesta (DO neta) de la película como función de la dosis. Para las PR EBT2 la mayor sensibilidad se presenta a 636 nm (correspondiente al rojo).

Al analizar las PR EBT2 con una fuente de luz linealmente polarizada (láser de He-Ne) se encontró una variación en la DO neta como función del ángulo de rotación. Asimismo, se observa una disminución en el grado de polarización a medida que la dosis aumenta.

Debido a que las PR EBT2 responden a la polarización, debe considerarse el efecto de la orientación relativa película-sistema óptico, esta propiedad es básica para obtener un control de calidad óptima cuando se emplea para la simulación de un tratamiento debido a que una mala colocación en orientación proporcionaría datos erróneos de la dosis depositada durante la simulación. En este estudio, se observan cambios en la DO neta de hasta un 32.3% (entre 0 y 90°) para las películas irradiadas a 0.5 Gy, mientras que las irradiadas a 50 Gy presentan un cambio en la densidad óptica de 29.9% (entre 0 y 90°), al ser analizadas con un espectrofotómetro.

Las curvas de calibración de las PR EBT2 presentan diferentes sensibilidades dependiendo del sistema óptico utilizado para su análisis. Esta variación en la sensibilidad se debe a que la respuesta de la película (DO neta) depende de la longitud de onda a la cual se está midiendo, de acuerdo con la Ley de Lambert-Beer (ecuación 1). Esto implica que, al utilizar una fuente de luz con un ancho de banda, como el escáner, la saturación ocurría más rápido que cuando se utiliza una fuente de luz monocromática, como es el caso del láser y el espectrofotómetro.

Para el intervalo de dosis estudiado, se encontró que en la película analizada con el láser su sensibilidad de respuesta aumenta un 73% si la comparamos con la respuesta de la película analizada con el escáner. Por otra parte, el espectrofotómetro presenta un 10.5% más

sensibilidad en la respuesta que el láser, esto es porque el láser utiliza su línea de emisión a 633 nm mientras que el espectrofotómetro nos da la DO neta en el pico de absorción (636 nm).

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de este trabajo, en el cual se caracterizó la PR EBT2 con diferentes sistemas ópticos, se concluye que es posible utilizar el láser y el espectrofotómetro como sistemas ópticos alternativos para analizar las PR EBT2, con ello, se puede evitar el efecto de la polarización y la dependencia de la orientación relativa película - escáner, así como aumentar la sensibilidad en la respuesta de la película, ya que estos factores influyen en la incertidumbre total en la determinación de la dosis. Como trabajo a futuro, se pretenden realizar medidas de control de calidad de radiocirugía estableciendo ahora el sistema óptico película-láser para simular tratamientos de radiocirugía y radioterapia estereotáctica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto CONACYT-SALUD-2012-01-181822.

REFERENCIAS

1. Wilcox E, Daskalov G. Accuracy of dose measurements and calculations within and beyond heterogeneous tissues for 6MV photon fields smaller than 4 cm produced by cyberknife. *Med Phys* 2008; 35:2259-66.
2. Mack A, Mack G, Weltz D, Scheib S, Böttcher H, Seifert V. High precision film dosimetry with GAFCHROMIC® films for quality assurance especially when using small fields. *Med Phys* 2003; 30:2399-408.
3. American Association of Physicists in Medicine (AAPM) Report 63. Radiochromic film dosimetry. *Med Phys* 1998; 25:2093-115.
4. Saad A, Slobodan D, Huriyya M, Nada T, Li-Heng L, Francois D. Evaluation of EBT2 model Gafchromic™ film performance in water. *Med Phys* 2010; 37:3687-93.
5. International Speciality Products. Gafchromic® EBT2 self developing film for radiotherapy dosimetry. 2009.
6. Arjomandy B, Tailor R, Anand A, Sahoo N, Gillin M, Prado K, et al. Energy dependence and dose response of Gafchromic EBT2 film over a wide range of photon, electron and proton beam energies. *Med Phys* 2012; 37:1942-7.
7. Lindsay P, Rink A, Ruschin M, Jaffray D. Investigation of energy dependence of EBT and EBT-2 Gafchromic film. *Med Phys* 2010; 37:571-6.
8. Martíšikova M, Ackerman B, Jäkel O. Analysis of uncertainties in Gafchromic EBT film dosimetry of photon beams. *Phys Med Biol* 2008; 53:7013-27.
9. Kaled-Ezra J, Karava K. Radiochromic film dosimetry: reflection vs transmission scanning. *Med Phys* 2008; 35:2308-11.
10. Menegotti L, Delana A, Martignano A. Radiochromic film dosimetry with flatbed scanners: A fast and accurate method for dose calibration and uniformity correction with single film

- exposure. *Med Phys* 2008; 35:3078-85.
- 11. Fuss M, Sturtevagen E, De Wagter C, Georg D. Dosimetric characterization of Gafchromic EBT film and its implication on film dosimetry quality assurance. *Phys Med Biol* 2007;52:4211-25.
 - 12. Devic S, Tomic N, Soares C, Podgorsak E. Optimizing the dynamic range extension of a radiochromic film dosimetry system. *Med Phys* 2009; 36: 429-37.
 - 13. Paelinck L, De Neve W, De Wagter C. Precautions and strategies in using a commercial flatbed scanner for radiochromic film dosimetry. *Phys Med Biol* 2007;52:231-42.
 - 14. Bouchard H, Lacroix F, Beaudoin B, Carrier J, Kawrakow I. On the characterization and uncertainty analysis of radiochromic film dosimetry. *Med Phys* 2009; 36:1931-46.
 - 15. Renade M, Li J, Dubose R, Kozelka J, Simon E, Dempsey J. A prototype quantitative film scanner for radiochromic film dosimetry. *Med Phys* 2008; 35:473-9.
 - 16. Devic S, Wang Y, Tomic N, Podgorsak E. Sensitivity of linear CCD array based film scanners used for film dosimetry. *Med Phys* 2006; 33:3993-6.
 - 17. Esparza-Moreno K. Estudio comparativo retrospectivo entre la dosimetría con película radiográfica y película radiocrómica para tratamientos con radiocirugía de neuralgia del trigémino [Tesis de Maestría en Ciencias con Especialidad en Física Médica]. Facultad de Medicina, Universidad Autónoma del Estado de México. 2011.
 - 18. Hupe O, Brunzendorf J. A novel method of radiochromic film dosimetry using a color scanner. *Med Phys* 2006; 33:4085-94.
 - 19. Todorovic M, Fischer M, Cremers F, Thom E, Schmidt R. Evaluation of GafChromic EBT prototype B for external beam dose verification. *Med Phys* 2006; 33:1321-8.
 - 20. Skoog D, Holler F, Crouch S. Principios de análisis instrumental. 5th. Edición. New York. *Saunders College Publishing* 2008; 146-9.
 - 21. Butson M, Cheung T, Yu P. Evaluation of the magnitude of EBT Gafchromic film polarization effects. *Australas Phys Eng Sci Med* 2009; 32:21-25.
 - 22. Butson M, Yu P, Cheung T, Inwood D. Polarization effects on a high-sensitivity radiochromic film. *Phys Med Biol* 2003;48:207-11.