

*Revista Electrónica Nova Scientia*

Dosimetría Química de irradiadores gamma de  
 $^{60}\text{Co}$  y  $^{137}\text{Cs}$  de uso semi-industrial e  
investigación

Chemical dosimetry in gamma irradiators of  
 $^{60}\text{Co}$  and  $^{137}\text{Cs}$  for semi-industrial and research  
purpose

**G. Albarrán, E. Mendoza y E. Cruz-Zaragoza**

---

Departamento de Química de Radiaciones y Radioquímica,  
Instituto de Ciencias Nucleares.  
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

---

**México**

## Resumen

Se realizó la dosimetría en campos de radiación de  $^{60}\text{Co}$  y de  $^{137}\text{Cs}$ , correspondientes al irradiador Gammabeam 651PT, recargado con nuevas barras de  $^{60}\text{Co}$  y de un nuevo irradiador autoblandado Gammacell-3000 Elan de  $^{137}\text{Cs}$  que fue adquirido con fondos CONACYT. La radiación gamma de  $^{60}\text{Co}$  del Gammabeam, se utiliza para esterilización de productos industriales y para investigación en cambios de propiedades químicas y físicas de muestras sólidas y acuosas, de interés en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Sin embargo, la diferencia de energía entre los fotones gamma del  $^{60}\text{Co}$  (1.17, 1.33 MeV) y del  $^{137}\text{Cs}$  (0.66 MeV) hace interesantes los cambios en las muestras de investigación, tales como polímeros, nuevos materiales dosimétricos, compuestos orgánicos, etc., que se investigan actualmente en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM. Para utilizar los campos de radiación de los irradiadores, es importante determinar las dosis de exposición. En este trabajo, se informa la metodología llevada a cabo para la dosimetría de las fuentes de radiación gamma usando el dosímetro químico de Fricke. En este, se lleva a cabo la reacción de oxidación en medio ácido del ion ferroso a férrico. Los resultados en el Gammabeam muestran distribuciones de razones de dosis menores a 99 Gy/min en su cámara de irradiación. En el caso del irradiador de  $^{137}\text{Cs}$  se obtuvo la razón de dosis, 10.89 Gy/min, al centro de su cámara; los resultados obtenidos con la dosimetría realizada en nuestro laboratorio coincidieron satisfactoriamente con los certificados otorgados previamente por el proveedor del Gammacell-3000. Dado que las fuentes no son puntuales en los irradiadores, se determinaron las incertidumbres asociadas a las dosis. Los dos irradiadores presentan razones de dosis adecuadas para continuar apoyando a la investigación científica y ofrecer también el servicio de irradiación a escala semi-industrial.

**Palabras clave:** Dosímetro de Fricke; fuentes gamma de  $^{60}\text{Co}$  y  $^{137}\text{Cs}$ ; razón de dosis; irradiador para investigación; irradiador semi-industrial

*Recepción:* 05-04-2017

*Aceptación:* 26-06-2017

## Abstract

Fricke dosimetry was performed in radiation fields of  $^{60}\text{Co}$  and  $^{137}\text{Cs}$ , corresponding to the Gammabeam 651PT irradiator loaded with new  $^{60}\text{Co}$  sources and a new Gammacell-3000 Elan self-irradiator with  $^{137}\text{Cs}$ . This last irradiator was purchased with funds from CONACYT. The gamma photons of  $^{60}\text{Co}$  from Gammabeam are using for sterilization of industrial products as well as in studies of physical and chemical properties changes of solid and aqueous solutions samples which are of the interest in research at the National Autonomous University of Mexico (UNAM). However, the difference in energy of the gamma photons from  $^{60}\text{Co}$  (1.17, 1.33 MeV) and  $^{137}\text{Cs}$  (0.66 MeV) makes interesting changes in research samples such as polymers, new dosimetric materials, organic compounds, etc., which are currently researching at the Nuclear Science Institute (ICN-UNAM). In order to use the radiation fields of irradiators, it is important to determine the exposure dose. In this paper, a successful methodology by using Fricke chemical dosimeter is reported. In this dosimeter is carried out the oxidation reaction in acid to ferric ion of ferrous. Dose rates distribution, less than 99 Gy/min, was determined in the Gammabeam irradiator. In the case of  $^{137}\text{Cs}$  irradiator, 10.89 Gy/min, at the center of the irradiation chamber was obtained. This value is in agreement to that certified measurement given by the Gammacell-3000 supplier. Because the sources are nonpoint, the uncertainties associated to the gamma doses were determinated. The two irradiators have adequate dose rates to continue supporting scientific research on different substances and materials, and offer the irradiation service at semi-industrial scale.

**Keywords:** Fricke dosimetry;  $^{60}\text{Co}$  and  $^{137}\text{Cs}$  gamma sources; dose rate; research irradiator; semi-industrial irradiator.

## 1. Introducción

Los irradiadores gamma se diseñaron desde 1957 en la ex-Unión Soviética, Estados Unidos y en Canadá principalmente (IAEA 1960; OMS 1981; Cruz Zaragoza 2004, 217). Actualmente existen diversos diseños, tales como panorámicos donde las fuentes pueden emerger de la piscina (de tipo Gammabeam) o secos, contenidos en blindajes de plomo tanto Gammabeam como de tipo Gammacell autoblandados (IAEA 1985; FAO/OMS, 1984; CAC7RCP 19-1979, 2003; CAC 2006). Ellos pueden usarse con gran éxito en la industria, así como de apoyo a la investigación. El Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México (ICN-UNAM) ha tenido una larga trayectoria desde 1968 sobre el uso de la radiación gamma en México (Castaños et al. 2017, 1). Existen varias aplicaciones de la radiación ionizante, como la gamma (Cruz Zaragoza 2004, 217), la cual ha tenido gran auge comercial, principalmente en la esterilización de alimentos, productos dentales, prótesis, mejora de polímeros, eliminación de gérmenes y virus en distintos medios, material quirúrgico, preservación de retablos e instrumentos de madera mediante la eliminación de insectos, etc. (Woods, Pikaev 1994, 381; Bakri et al. 2005, 233). Así, el uso de la radiación en dosis adecuadas a cada material o producto de interés, es un asunto importante a resolver. Esta es la razón por la cual se debe realizar la dosimetría, asegurando que la dosis a impartir a los productos es la adecuada para garantizar su esterilización o lograr el objetivo de estudio.

La dosimetría es la medida de la dosis en un campo de radiación que se imparte a un sistema químico, biológico o físico. Un dosímetro es un dispositivo que se utiliza para medir la cantidad de energía absorbida por dicho sistema. Los dosímetros pueden clasificarse en primarios y secundarios. Los primarios se basan en un cambio físico producido por la interacción de la radiación ionizante con el medio y que utilizan una variable física para medir la dosis. Los secundarios son aquéllos que experimentan un cambio en una variable química como ejemplo una reacción de oxidación o reducción. De los secundarios, el más utilizado es el dosímetro de Fricke (Costa et al. 2012, 6; Meesat et al. 2012, 813; Valente et al. 2016, 402), donde una reacción de oxidación de los iones ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) se lleva a cabo produciendo iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (Spinks, Woods 1990, 95). La concentración de iones férricos se puede determinar mediante espectrofotometría ultravioleta (UV), el espectro resultante presenta un pico de absorción máximo a 304 nm, mientras que los iones ferrosos no absorben en esta longitud de onda.

La unidad de la dosis absorbida es el Gray (Gy), que corresponde a la absorción de un joule de energía ionizante en un kilogramo de material irradiado, y la unidad de la razón de dosis está dada en Gy por unidad de tiempo. Idealmente, las propiedades de un dosímetro deben ser de fácil preparación y uso, que sea reproducible y proporcional a la dosis impartida entre otras variables (Spinks, Woods 1990, 95). La precisión de las mediciones dosimétricas especifica la reproducibilidad en condiciones similares y se puede estimar a partir de los datos obtenidos en mediciones repetidas. Las mediciones no pueden ser absolutamente exactas y la inexactitud (Izewska, Rajan 2005, 71) de un resultado de medición se caracteriza por la "incertidumbre" asociada (Miranda 2001, 13), por lo que también ésta se ha evaluado.

En este trabajo se presenta la actualización de la dosimetría de las fuentes del Gammabeam 651PT, después de realizarse la recarga con nuevos lápices de  $^{60}\text{Co}$  al irradiador. La actividad total fue de 99,191 Ci ( $3.67 \times 10^{15}$  Bq) distribuidos en nueve bastidores o módulos en alberca profunda. Esta cuenta con agua desionizada para evitar corrosión en las paredes de acero de la alberca. La dosimetría se realizó el 18 de junio de 2015 en diferentes posiciones de la cámara de irradiación para establecer un mapa de razones de dosis que serán de utilidad para las irradiaciones gamma de muestras acuosas y sólidas para la investigación científica y de diversos productos industriales.

Así también, el 12 de junio de 2015, se realizó la dosimetría en la cámara del Gammacell-3000 Elan de fabricación canadiense (Best Theratronics), de reciente adquisición. En ambos irradiadores se usó el dosímetro de Fricke. Adicionalmente se determinó experimentalmente la absorptividad molar del  $\text{Fe}^{3+}$ .

## Método

### 2. Parte experimental

#### 2.1 Gammabeam 651PT panorámico

El ICN-UNAM cuenta con un irradiador Gammabeam de alberca profunda con  $^{60}\text{Co}$ , adquirido originalmente con  $1.66 \times 10^{15}$  Bq (45,000 Ci) y 9 fuentes en 1986 a la empresa estatal Atomic Energy of Canada Limited, hoy empresa privada denominada Nordion. El  $^{60}\text{Co}$  tiene una vida media de 5.27 años y decae por emisión de una partícula beta de baja energía (315 keV) y poco penetrante, generando la emisión de dos fotones gamma de energías de 1.17 y 1.33 MeV, para decaer finalmente a  $^{60}\text{Ni}$  (estable) el cual es inocuo. Esta radiación tiene un alto poder de

penetración en diferentes materiales. La energía de estos dos fotones gamma son los que se utilizan para la irradiación de muestras y productos. Recientemente, gracias al apoyo de la UNAM e ingresos propios del servicio de irradiación, se realizó una recarga al irradiador con  $^{60}\text{Co}$ , actualmente posee 18 fuentes y actividad total de  $3.67 \times 10^{15}$  Bq (99,191 Ci) en Junio de 2015. La actividad de las fuentes ha variado al transcurrir los años debido al decaimiento del  $^{60}\text{Co}$  por lo que también varían las razones de dosis en los campos de radiación. En la distribución física de las fuentes tipo lápiz, de 52 cm de longitud y 0.5 cm de diámetro sellados, se busca siempre que ésta sea uniforme en los bastidores para lograr campos de radiación más homogéneos posibles en el área de irradiación del bunker. Las curvas de isodosis permiten lograr irradiaciones más precisas de productos industriales e irradiación de muestras para la investigación científica. Para lograr las irradiaciones adecuadas es necesario realizar la dosimetría confiable, para determinar la distribución de las razones de dosis útiles para la irradiación de las distintas muestras y materiales en diferentes posiciones en un área de  $19.3 \text{ m}^2$  correspondientes a la cámara de irradiación del bunker.

## 2.2 Gammacell-3000 Elan

Se adquirió en el año 2015 el irradiador autoblandado Gammacell-3000 para reemplazar al Gammacell-200 que data de octubre de 1967. El irradiador nuevo tiene una actividad de  $9.62 \times 10^{13}$  Bq (2,600 Ci) de  $^{137}\text{Cs}$ , distribuida en dos fuentes tipo lápiz, el cual decae por emisión beta, de energía máxima de 1.174 MeV (5.4%) y 0.5120 MeV (94.6%), a  $^{137m}\text{Ba}$  (metaestable, *m*). De tal forma, que el  $^{137m}\text{Ba}$  decae a  $^{137}\text{Ba}$  (estable) por la emisión de un fotón gamma de energía 0.6617 MeV. El  $^{137}\text{Cs}$  tiene una vida media de 30.17 años, la cual lo hace un buen material radiactivo para uso prolongado en el laboratorio de investigación. El fotón gamma producido durante su decaimiento es el de interés para irradiar diferentes materiales. Dado que los materiales a irradiar poseen propiedades físicas y químicas distintas, las razones de dosis deben ser determinadas y verificadas previamente certificadas por el fabricante al momento de venta del irradiador. Este irradiador Gammacell-3000 tiene un blindaje de plomo suficiente para detener la radiación gamma del  $^{137}\text{Cs}$  y tiene adaptada una computadora de control del tiempo de irradiación para impartir la dosis necesaria, así como un cilindro sobre una base giratoria que transporta a la muestra hacia la posición de irradiación de las dos fuentes radiactivas fijas e insertadas en su blindaje. El área útil de irradiación de la cámara de este irradiador autoblandado es un cilindro

huevo, con soporte especial de acero inoxidable y capacidad 2.34 L. Este irradiador puede ser utilizado en pruebas de irradiación de productos industriales, de esterilización de plasma sanguíneo necesario para trasplantes o cirugías, para eliminar bacterias o virus presentes en alimentos, entrecruzamiento e injertos de polímeros, degradación de desechos industriales y de las ciudades, mejora de vegetales, irradiación para preservación de alimentos, etc. Desde luego, es una herramienta muy útil para la investigación científica (Albarrán et al. 2015, 109; Burillo et al. 2013, 1407; Negrón-Mendoza et al. 2015, 55; Meléndez et al. 2016, 37; Cruz Zaragoza, Martínez-Barrera 2009,1; Cruz-Zaragoza et al. 2013, 1227; Molins 2001 Cap 11 y 15).

### 2.3 Preparación del dosímetro de Fricke

Todas las soluciones fueron preparadas utilizando reactivos químicos de la marca Sigma-Aldrich, grado analítico ( $\geq 99\%$ ). Los reactivos fueron almacenados en sus envases originales en un lugar seco y oscuro. El agua utilizada para preparar las soluciones se obtuvo en el laboratorio con un equipo de purificación de agua Millipore Direct-Q UV 3.

El material de vidrio donde se prepara la solución de Fricke requiere de gran limpieza para que el dosímetro funcione con exactitud. Esta solución se prepara con  $1 \times 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> de sulfato de hierro (II) amoniacal hexahidratado  $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ ,  $1 \times 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> de cloruro de sodio (NaCl), 0.4 mol/dm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y conteniendo oxígeno (Guiho, Simoen 1975, 714; Fricke, Hard 1966, 167). Al estar el oxígeno presente, esta solución dosimétrica permite determinar la dosis de manera adecuada y exacta entre 50 y 200 Gy (Dutreix, Bridier 1985, 168; Spinks, Woods 1990, 104). La solución de Fricke es sensible a la luz ultravioleta, por lo tanto, la preparación se realizó en un cuarto oscuro y se protegió de la luz del ambiente al momento de ser irradiada.

### 2.4 Determinación de la absorptividad molar del Fe<sup>3+</sup>

Para realizar la dosimetría se requiere conocer algunos parámetros, los cuales se indican posteriormente. Entre estos parámetros se debe determinar el valor de la absorptividad molar del Fe<sup>3+</sup>. Con este propósito se hicieron varias curvas de calibración de la manera siguiente; se prepararon disoluciones de nitrato de hierro nanohidratado  $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$  y sulfato de hierro (III) amoniacal dodecahidratado  $[\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$  en medio ácido, con una concentración igual al dosímetro de Fricke (0.4 mol/dm<sup>3</sup> de ácido sulfúrico). Se realizaron varias disoluciones,

cuyas concentraciones se encuentran en el intervalo de  $1 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup>, ya que se estima que la formación de  $\text{Fe}^{3+}$  en las muestras irradiadas del dosímetro de Fricke se encuentra en este intervalo. Las medidas de la absorbancia del ion  $\text{Fe}^{3+}$  fueron hechas en un equipo Agilent 8453 UV-Vis Spectroscopy System, a 302, 303 y 304 nm, se usó una celda de cuarzo de longitud de paso de la luz de 10 mm, con un ángulo por debajo de 0.1 grados.

## 2.5 Cálculos para determinar la dosis absorbida

Para determinar la dosis absorbida mediante el dosímetro de Fricke se requiere de varios factores, los cuales están incluidos en la ecuación siguiente (Attix 1986, 395):

$$D = \frac{N(\Delta OD)100}{\epsilon \rho 10^3 G(\text{Fe}^{3+}) fl} \quad (1)$$

Donde:

N es el número de Avogadro ( $6.023 \times 10^{23}$  moléculas por mol<sup>-1</sup>),  $\Delta OD$  es el cambio de densidad óptica entre el dosímetro irradiado y no irradiado a 304 nm. El término  $\epsilon$  equivale a  $2176 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (absortividad molar),  $\rho = 1.024 \text{ g cm}^{-3}$ , G es el rendimiento radiolítico de  $\text{Fe}^{3+}$  y tiene un valor igual a 15.45 moléculas/100 eV. El factor f es  $6.2415 \times 10^{15} \text{ eV cm}^{-1}$ , el cual es un factor de conversión de eV cm<sup>-1</sup> a Gy, y la longitud  $l$  del paso óptico fue de 1 cm. Considerando los términos referidos, la concentración de iones férricos se determinó a 304 nm mediante espectrofotometría UV.

En particular, el rendimiento químico conocido como valor G, se define como el número de moléculas o iones transformados por cada 100 eV de energía absorbida. Para el ion férrico, el valor G se conoce de la literatura, el cual fue determinado por comparación con un dosímetro primario (Shortt 1989, 1923) y tiene un valor de 15.45 con incertidumbre de 1.2% (Guiho, Simoen 1975, 714). El valor de la absortividad molar ( $\epsilon$ ) se determinó bajo las condiciones de trabajo para el dosímetro de Fricke usadas en nuestro laboratorio.

## 2.6 Mapeo para la distribución de las posiciones a irradiar

### 2.6.1 Gammabeam 651PT

Las fuentes de  $^{60}\text{Co}$  se encuentran sumergidas en la alberca que contiene agua deionizada y están dispuesta en un bastidor en forma de “V”. Las muestras en general se colocan alrededor del

mismo y forman un triángulo en el piso del bunker. Las fuentes suben mediante un sistema neumático desde el fondo de la alberca hacia una posición determinada en la cámara de irradiación donde se irradian las muestras por el tiempo requerido. El tiempo es predeterminado usando el software de la computadora del irradiador. Los lados **A** y **B** del bastidor con las fuentes tienen longitud de 78 cm (Figura 1). La parte frontal (lado C) tiene longitud de 100 cm y se determinó a una distancia de 55 cm del vértice que forman las paredes del bastidor.

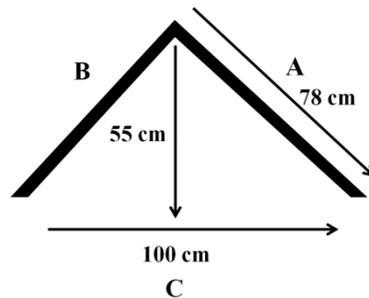


Figura 1. Dimensiones consideradas para el proceso de irradiación de muestras industriales.

Las fuentes de  $^{60}\text{Co}$  están en forma de balines metálicos contenidos en dos barras concéntricas selladas de acero inoxidable tipo C-183 denominados lápices. Estos fueron adquiridos en diferentes años a la empresa fabricante Nordion, lo que significa que el campo de radiación no es exactamente homogéneo a lo largo y ancho de los sitios de interés alrededor de los lados del irradiador. Para realizar la dosimetría de Fricke se usó un sistema de cajas, simulando la carga de productos industriales, con dimensiones de 78 cm de ancho con 100 cm de altura y se consideraron tres puntos con una distancia de 30 cm a lo ancho y 20 cm a lo alto entre cada uno de ellos con respecto al piso hasta 90 cm (Figura 2), altura máxima a la cual se irradian los productos de la industria.

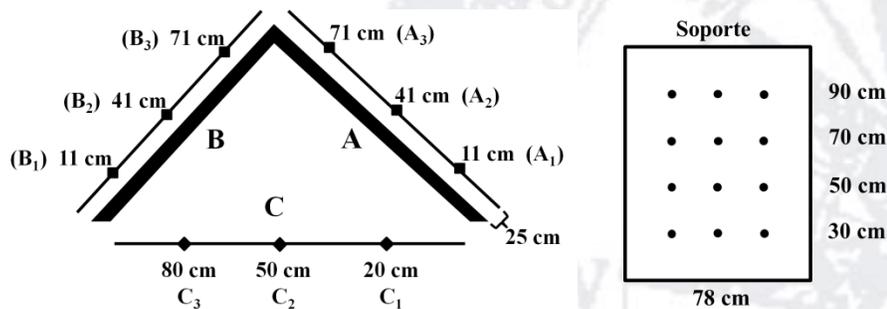


Figura 2. Distribución geométrica de las posiciones a irradiar en los lados A, B y C del irradiador.

También se realizó la dosimetría en los vértices ( $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ ) de los lados del irradiador (Figura 3), las cuales son posiciones de interés para irradiación de muestras de investigación que requieren de razones de dosis altas del orden de kGy. Se colocaron soportes de 30 cm de ancho, a una distancia de 20 cm con respecto a la pared del irradiador, en cada uno de ellos se fijaron dos posiciones: a 10 cm y 20 cm respecto al inicio del soporte, para colocar los tubos de ensayo conteniendo el dosímetro químico de Fricke. Así se consideró toda el área del campo de radiación que no se lograba medir con el diseño experimental de la dosimetría de la figura 2, de igual forma se colocaron dosímetros en las alturas antes referidas (Figura 3).

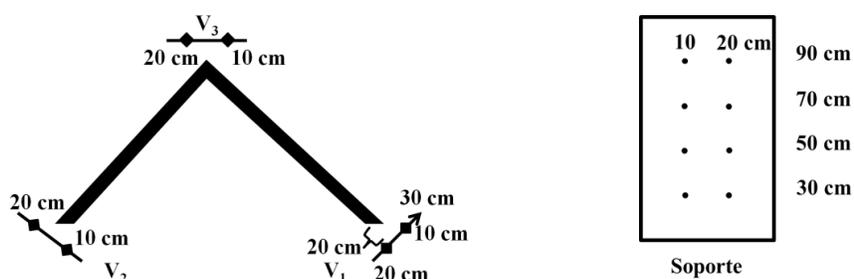


Figura 3. Distribución de las posiciones para la dosimetría en los vértices.

Para lograr los datos correctos de dosimetría, ésta se realizó en etapas; primero se hizo el lado A, continuando el lado B y enseguida el lado C y los vértices referidos. Todas las mediciones se realizaron con una solución de Fricke recientemente preparada. Los tiempos de irradiación en cada posición fueron 5, 7.5 y 10 min y se realizaron por triplicado.

### 2.6.2 Gammacell-3000 Elan

Este irradiador autoblandado Gammacell está diseñado para irradiar muestras pequeñas y la zona de irradiación se conforma de un cilindro de acero inoxidable y hueco, sus dimensiones son de 13 cm de diámetro y 20 cm de altura. En el cilindro se puede introducir un soporte para tubos. La figura 4 muestra el cilindro, el soporte y un disco con la distribución para colocar tubos. El soporte tiene dimensiones de 12 cm de diámetro y 19 cm de altura, cuenta con 2 niveles para colocar las muestras, la primera es a 2.7 cm y la segunda a 10 cm a partir del fondo del cilindro. Las muestras en tubos se pueden colocar en diferentes posiciones. El disco está dividido en 3 círculos, el primero está en el centro a 6.5 cm, el círculo de en medio está a 4.5 cm y el último

está alrededor del cilindro a 2 cm, respecto del borde del disco. En el centro únicamente se puede irradiar una muestra, en la posición media 6 y 12 en el círculo mayor.

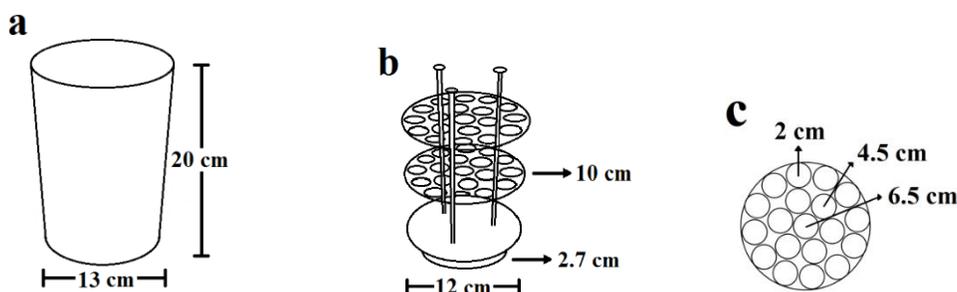


Figura 4. Arreglo geométrico para las irradiaciones, a) cilindro metálico para contener las muestras, b) soporte para muestras y c) distribución en el disco.

La dosimetría se realizó en las dos posiciones posibles; a 2.7 y 10 cm de altura (Fig. 4b), ambas en los tres círculos del disco (Fig. 4c), ésta se llevó a cabo por triplicado usando una diferente preparación del dosímetro de Fricke para cada ensayo con el fin de replicar los resultados.

### 3 Resultados y discusión

#### 3.1 Determinación de la absorptividad molar del $\text{Fe}^{3+}$

En la determinación de la absorptividad molar del  $\text{Fe}^{3+}$  se observó que los datos obtenidos con nitrato férrico fueron bajos, comparados con los de la literatura (Eggermont et al. 1977, 317), por lo que se utilizó únicamente el sulfato de hierro (III) amoniacal (recién adquirido), el cual dio como resultado valores consistentes con lo indicado en la literatura. Esta determinación se realizó para obtener el valor correspondiente bajo las condiciones experimentales en nuestro laboratorio, ya que en la literatura se encuentran diferentes valores entre  $-2170$  y  $2190 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (Eggermont et al. 1977, 317; Svensson, Brahme 1979, 326). La Tabla I muestra los datos encontrados usando el nitrato férrico. La absorptividad molar se determinó en tres longitudes de onda que se informan en la literatura, siendo la de 304 nm donde encontramos un valor mayor. Como se indicó anteriormente, la incertidumbre de la medida es necesaria y se calculó mediante mínimos cuadrados (Miranda Martín del Campo 2001, 13) de nueve diferentes conjuntos de datos para las tres longitudes de onda usando una disolución para cada ensayo. La Tabla II indica los

resultados obtenidos con el sulfato de hierro (III) amoniacal y el promedio con sus incertidumbres. La Figura 5 muestra la linealidad de los resultados.

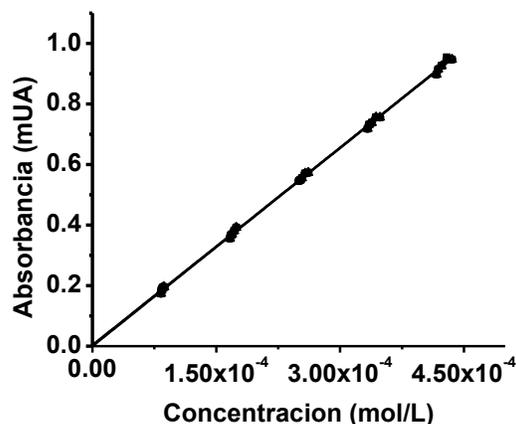
Tabla I. Absortividad molar del  $\text{Fe}^{3+}$  ( $\text{dm}^3\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ) usando  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

304 nm	303 nm	302 nm
2157.59	2159.29	2157.56
2155.61	2157.44	2156.32

Tabla II. Absortividad molar del  $\text{Fe}^{3+}$  ( $\text{dm}^3\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ) usando  $[\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$

304 nm	303 nm	302 nm
2173.86	2172.45	2175.08
2176.46	2176.81	2175.63
2173.45	2174.18	2172.38
2173.97	2174.01	2172.18
2178.60	2174.04	2173.69
2175.47	2175.56	2174.09
2178.85	2174.45	2172.45
2179.32	2174.54	2172.02
2179.71	2173.87	2171.38
Promedio		
2176.62±0.13	2174.48±0.14	2173.19±0.14

Este trabajo muestra también que utilizar sales férricas puede llevar a errores, como lo indicaron Eggermont *et al.* (1977, 317). En este ensayo, la sal férrica amoniacal es la que produce un coeficiente de absortividad molar coherente con los valores de la literatura.



$\lambda$ (nm)	$R^2$	Absortividad molar* del $Fe^{3+}$
302	0.99956	$2173.19 \pm 0.14$
303	0.99956	$2174.48 \pm 0.14$
304	0.99943	$2176.64 \pm 0.13$

\* $dm^3 mol^{-1} cm^{-1}$

Figura 5. Absortividad molar del  $Fe^{3+}$  y su incertidumbre obtenida mediante mínimos cuadrados.

### 3.2 Dosimetría del Gammabeam 651PT

El cambio de absorbancia del dosímetro ( $\Delta OD$ ) junto con el valor de  $\epsilon$  (absortividad molar), que se determinó anteriormente, se sustituyen en la ecuación 1 para obtener la dosis para cada posición de irradiación realizada. El promedio de los datos obtenidos de la razón de dosis, su incertidumbre típica de la media experimental (Miranda Martín del Campo 2001, 2) y el porcentaje de error, se presentan en las Tablas III a VI, los cuales son los valores que se necesitan para fines prácticos.

Tabla III. Razón de dosis (Gy/min) en el lado A

Altura (cm)	Dosis			Incertidumbre			% de error		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
30	69.88	82.04	56.96	0.76	1.12	1.94	1.09	1.38	3.41
50	86.20	99.03	67.40	1.56	1.90	2.08	1.81	1.92	3.08
70	73.08	82.08	58.68	2.10	2.86	0.98	2.88	3.48	1.68
90	43.93	47.57	38.88	1.12	0.77	1.73	2.56	1.62	4.45

$A_1=11$  cm,  $A_2=41$  cm,  $A_3=71$  cm

Tabla IV. Razón de dosis (Gy/min) en el lado B

Altura (cm)	Dosis			Incertidumbre			% de error		
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
30	67.52	85.74	54.06	0.89	1.86	1.21	1.32	1.17	2.24
50	87.66	99.64	63.01	1.03	1.32	1.40	1.17	1.33	2.22
70	76.62	86.05	53.71	1.62	2.81	1.15	2.12	3.27	2.13
90	48.62	50.78	40.35	1.04	0.99	0.63	2.14	1.94	1.55

B<sub>1</sub>=11 cm, B<sub>2</sub>=41 cm, B<sub>3</sub>=71 cm

Las razones de dosis tanto del lado A como del B del irradiador Gammabeam son similares en las tres posiciones, sin embargo, entre estas posiciones la razón de dosis medida es mayor para 41 cm seguida de 11 cm, siendo la menor en 71 cm. Las incertidumbres de las razones de dosis medidas son pequeñas (0.63 a 2.86) y el porcentaje de error es, para todos los casos, menor a 4%. Además, la razón de dosis mayor se encuentra en la posición de 50 cm de altura y a 41 cm del vértice, ya que las fuentes están distribuidas de manera no homogénea y las de mayor actividad del  $^{60}\text{Co}$  están alrededor de esas posiciones.

Tabla V. Razón de dosis (Gy/min) en el lado C

Altura (cm)	Dosis			Incertidumbre			% de error		
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
30	81.54	72.81	83.09	0.90	0.82	1.58	1.11	1.13	1.90
50	95.87	81.22	96.30	1.38	0.15	0.88	1.44	0.18	0.91
70	79.33	75.40	78.61	0.87	1.51	0.22	1.09	2.01	0.28
90	53.20	56.21	54.30	0.64	1.10	1.37	1.20	1.97	2.52

C<sub>1</sub>=20 cm, C<sub>2</sub>=50 cm, C<sub>3</sub>=80 cm

En el caso del lado C (Tabla V), la razón de dosis mayor también se encuentra a 50 cm de altura en las posiciones de 20 y 80 cm, siendo 95.87 y 96.30 Gy/min respectivamente, manteniendo esta proporción en los datos de la razón de dosis en los extremos C1 y C3. En la posición media (50 cm), la razón de dosis varía por causa de fenómenos de dispersión al interaccionar la radiación con la estructura de lámina de aluminio del irradiador. De manera

similar que en los lados A y B, en el lado C las incertidumbres y los porcentajes de error son pequeños, menor a 2.5%.

Tabla VI. Razón de dosis (Gy/min) en los vértices

Altura (cm)	Puntos (cm)	Dosis			Incertidumbre			% de error		
		V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>
30	10	63.06	49.99	53.71	0.35	1.31	0.78	0.55	2.63	1.44
	20	41.96	57.66	51.68	1.38	0.79	0.56	3.29	1.37	1.08
50	10	75.01	59.01	61.79	0.37	0.92	0.99	0.49	1.55	1.60
	20	48.84	63.63	61.16	1.89	2.70	1.65	3.87	4.25	2.71
70	10	63.43	41.69	50.53	2.02	1.68	0.49	3.18	4.03	0.97
	20	38.19	54.50	52.43	1.25	1.98	1.73	3.28	3.63	3.29
90	10	43.70	25.33	37.56	0.95	0.74	1.66	2.18	2.93	4.41
	20	25.55	39.27	37.20	0.90	1.26	1.59	3.53	3.21	4.26

Las diferentes razones de dosis en los vértices (Tabla VI), que fueron obtenidas experimentalmente, muestran una incertidumbre entre 0.35 y 2.70 y el porcentaje de error está entre 0.49 y 4.41, siendo éste mayor que en los lados A y B. Esto se atribuye a que, durante un proceso de irradiación del material industrial o de investigación, se tiene mayor dispersión de la radiación en los vértices donde están los soportes metálicos del irradiador y también debido a la forma en que está construido el bastidor donde se alojan los lápices de <sup>60</sup>Co.

En las posiciones de los vértices correspondientes a V<sub>1</sub> a 20 cm y V<sub>2</sub> a 10 cm que dan hacia el centro del bastidor, la razón de dosis es menor que en las posiciones V<sub>1</sub> a 10 cm y V<sub>2</sub> a 20 cm, debido a la interferencia que ejerce la estructura del bastidor durante la irradiación. En el caso del vértice V<sub>3</sub> la razón de dosis es muy similar tanto en las posiciones de 10 cm como en 20 cm.

Los resultados de las razones de dosis obtenidas son las adecuadas para nuestros propósitos de las irradiaciones gamma. Cabe mencionar que no existe un protocolo definido único para la dosimetría en los irradiadores de tipo Gammabeam, pues éstos son diseñados por el fabricante para cada tipo de uso donde se requieren dosis relativamente bajas (<1 kGy), intermedias (1-10 kGy) o altas (>10 kGy), por ejemplo: irradiaciones para alargar la vida de

anaquel de frutas, especias y condimentos, esterilización de material de uso hospitalario, irradiaciones de tejido blando o duro, sistemas acuosos orgánicos y sólidos para investigación. En este caso, hemos logrado realizar la dosimetría en tres campos geométricos alrededor del irradiador que permitirá su uso en irradiaciones de dosis bajas, intermedias y altas, que son de uso frecuente en la investigación. La metodología descrita para la dosimetría con el dosímetro de Fricke es aplicable también a los campos de radiación en irradiadores de tipo comercial, en los que puede adaptarse muy bien considerando sus contenedores metálicos y las velocidades del transporte de sus productos durante la exposición a la radiación gamma.

### 3.3 Dosimetría del Gammacell-3000 Elan

De la misma forma mencionada, se preparó el dosímetro de Fricke para realizar la dosimetría del Gammacell. La razón de dosis se determinó graficando la dosis en función del tiempo de irradiación. La Figura 6 muestra un ejemplo de los datos que se obtuvieron en el centro y a 10 cm de altura.

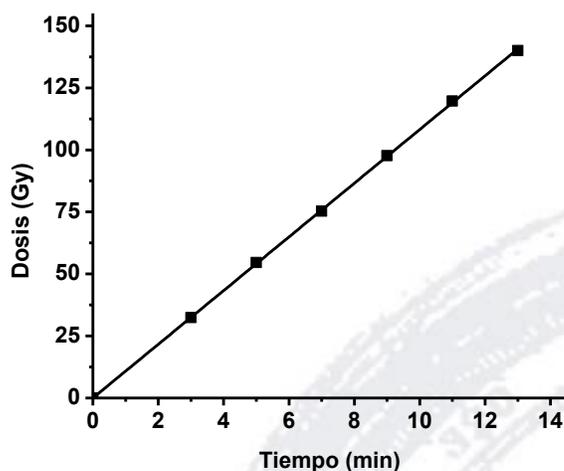


Figura 6. Dosis en función del tiempo obtenida mediante mínimos cuadrados en la parte central del Gammacell.

La Tabla VII muestra los valores de las razones de dosis y su incertidumbre obtenidas en las dos alturas y los 3 círculos del soporte, referidos en la figura 4.c, donde se pueden irradiar las muestras.

Tabla VII. Razón de dosis (Gy/min) en el Gammacell

Posición	Altura 2.7 cm	Altura 10 cm
2.0 cm	11.79 ± 0.15	11.99 ± 0.16
4.5 cm	10.80 ± 0.14	10.97 ± 0.13
6.5 cm	10.46 ± 0.12	10.82 ± 0.19

Al comparar los datos certificados por el proveedor del Gammacell, éstos coinciden satisfactoriamente con los resultados obtenidos bajo las condiciones de trabajo efectuadas en el ICN-UNAM. Las diferencias encontradas fueron menores al 3% para las diferentes posiciones de irradiación en los soportes de la cámara.

### Conclusión.

El valor de la absorptividad molar determinado del  $\text{Fe}^{3+}$  fue de  $2176 \text{ dm}^3\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$  en 304 nm, el cual se encuentra en el intervalo indicado en la literatura. También se pudo comprobar el error que conlleva el utilizar sales férricas en la determinación de este valor. La dosimetría química, usando el dosímetro químico de Fricke, permitió de manera adecuada determinar la razón de dosis en diferentes posiciones de la cámara de irradiación alrededor de la distribución de las fuentes. Las razones de dosis obtenidas con esta dosimetría química son aceptables en sus valores para lograr las dosis requeridas para los propósitos de nuestra investigación sobre los cambios de propiedades químicas y físicas de sustancias de muestras acuosas y de estado sólido. Así también, lograr dosis mayores de interés para utilizarse en la irradiación de productos industriales, las cuales son principalmente para preservación y esterilización, asimismo como pruebas de equipos electrónicos para uso espacial ante campos intensos de radiación. La metodología expuesta en este artículo, logra garantizar las dosis necesarias con una incertidumbre menor a  $\pm 3 \text{ Gy/min}$ , esto resulta muy importante debido a que en el caso de ciertos productos comerciales (vegetales, frutas, gomas, aditivos y cosméticos, etc.) pueden cambiar notoriamente sus propiedades tales como aroma, textura, color, propiedades reológicas, etc., dependiendo del control de la dosis recibida.

La dosimetría realizada en el Gammacell-3000 Elan coincide satisfactoriamente ( $\pm 3 \%$ ) con el certificado de dosis entregado por el proveedor canadiense al ICN UNAM. Respecto a la distribución de dosis encontradas en el Gammacell es muy útil para irradiaciones de muestras de

laboratorio tales como pruebas de alimentos a irradiar, efectos de luminiscencia estimulada en sólidos para detectores de radiación que recientemente se están sintetizando en nuestro laboratorio para dosis bajas. Además de estudios de los efectos de las razones de dosis en dosímetros de estado sólido, así también determinación de dosis para esterilización de plasma sanguíneo para transfusión evitando gérmenes patógenos que pueden transmitirse de un donador a un receptor.

Así, la distribución de las razones de dosis encontradas con nuestra dosimetría, será de gran utilidad para irradiar muestras en estudio de reacciones químicas y biológicas de los compuestos de interés, en procesos de oxidación avanzada mediante irradiación, en degradación o injerto polimérico, en la formación de productos radiolíticos, mecanismos de defectos electrónicos en halogenuros, óxidos y fluoruros, en evolución molecular, origen de la vida y liberación de fármacos, entre otras líneas de investigación que estamos realizando en el ICN-UNAM.

La metodología utilizada en este trabajo, se considera básica e importante para profesionales que trabajan en irradiadores gamma en el país tanto en el área industrial como en el área médica, en la formación de recursos humanos altamente calificados, e investigadores del área de radiaciones y sus efectos que tengan interés en utilizar la radiación ionizante gamma para estudiar fenómenos y efectos físicos, químicos y biológicos en la materia.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecemos al Fís. Francisco García por la irradiación de las muestras del dosímetro. Al PAPIIT-DGAPA-UNAM por el apoyo económico otorgado a los proyectos IN202916 e IN112617. También agradecemos al CONACYT por el apoyo otorgado en 2015 a través del proyecto 226418 de infraestructura para la adquisición del irradiador Gammacell-3000 Elan.

### **Referencias**

- Albarran, G. Esparza, M. Mendoza, E. (2015). Oxidation of hydroxybenzoic acids by OH radical produced radiolytically. *Radiat. Phys. Chem.* (107): 109-114.
- Attix, F.H. (1986). *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. John Wiley & Sons. New York. pp. 395-437.

- Bakri, A. Mehta, K. Lance, D.R. (2005). Sterilizing insects with ionizing radiation. Ed. Dyck, V.A. Hendrichs, J Robinson A.S. IAEA. Springer, Dordrecht. pp. 233-268.
- Burillo, G. Dionisio, N. Garcia-Uriostegui, L. (2013). Evaluation of 2-vinylnaphthalene and 4-vinylbiphenyl as antirads to increase the radiation resistance of poly(vinyl chloride). *Polymer Degradation and Stability*. (98): 1407-1412.
- CAC7RCP 19-1979, (2003). Code of Practice for Radiation Processing of Food, Codex Alimentarius, International Foods Standards. World Health Organization/Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- CAC (2006). Understanding the Codex Alimentarius. Produced by the Codex Secretariat Third Edition. FAO, World Health Organization Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. pp. 47. ISBN: 978-92-5-105614-1.
- Castañón, O. Aguilera, E.F. Barrón-Palos, L. Bijker, R. Cruz-Zaragoza, E. Hess, P.O. Hirsch, J.G. Padilla-Rodal, E. Rickards, J. Ruvalcaba Sil, J.L. (2017). La Física Nuclear y de Radiaciones. Aceptado para su publicación en la Revista Mexicana de Física.
- Costa, C. Vandenborre, J. Crumière, F. Blain, G. Essehli, R. Fattahi, M. (2012). Chemical dosimetry during alpha irradiation: A specific system for UV-Vis in situ measurement. *American Journal of Analytical Chemistry* (3): 6-11.
- Cruz Zaragoza, E. (2004). La irradiación de alimentos en otros países y en México, en *Experiencia Mexicana en Aceleradores de Partículas*, (M. Ramos Lara, compiladora), Siglo XXI Editores, México, pp. 217-241.
- Cruz-Zaragoza E. y Martínez-Barrera, G. (2009). Ionizing radiation effects on the matter and its applications in research and industry, in *Gamma Radiation Effects on Polymeric Materials and its Applications: (Barrera-Díaz C.E. and Martínez-Barrera, G. Editors)*, Research Signpost, India. pp. 1-14, ISBN: 978-81-308-0293-0
- Cruz-Zaragoza, E. Marcazzó, J. Chernov, V. (2013). Photo- and thermally stimulated luminescence of polyminerals extracted from herbs and spices. *Radiation Physics and Chemistry* (81): 1227-1231.
- Dutreix, A. Bridier, A. (1985). The dosimetry of ionizing radiation. Ed. K.R. Kase, B.E. Bjarngard, F.H. Attix, F.H. Vol I. Academic Press, Inc. New York. pp.168.
- Eggermont, G. Buysse, J. Janssens, A. Thielens, G. Jacobs, R. (1977). Discrepancies in molar extinction coefficients of Fe<sup>3+</sup> in Fricke dosimetry. *Proceedings series; v. 2 p.* Interna

- tional symposium on national and international standardization of radiation dosimetry; Atlanta, GA, USA; Vienna, IAEA-SM-222/42. pp. 317-333.
- FAO/OMS, Codex Alimentarius Commission (1984), General Standard for Irradiated Foods and Recommended International Code of Practice for the Operation of Radiation Facilities Used for the Treatment of Foods.
- Fricke, H. y Hard E.J. (1966). Chemical dosimetry in Radiation Dosimetry. Vol II, Ed. Attix, F.H. y Roesch, W.C. Academic Press, New York. pp 167-239.
- Guiho, J.P. y Simoen, J.P. (1975). Détermination expérimentale de l'énergie moyenne nécessaire à la production d'une paire d'ions dans l'air. *Int. J. Appl. Radiat. Isotop.* (26): 714-719.
- IAEA, (1960), Proceedings of a Conference on the Application of Large Radiation Sources in Industry and Especially to Chemical Processes, International Atomic Energy Agency, Warsaw, 8-12 September.
- IAEA (1985), Proceedings of an International Symposium on High-Dose Dosimetry. Vienna, 8-12 October.
- Izewska, J. y Rajan, G. (2005). Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. Ed. E.B. Podgorsak, IAEA, Vienna, pp. 71-99.
- Meléndez-Ortiz, H.I., Alvarez-Lorenzo, C., Concheiro, A; Jimenez-Paez, V.M., Bucio, E. (2016). Modification of medical grade PVC with N-vinylimidazole to obtain bactericidal surface. *Radiat. Phys. Chem.* (119): 37-43.
- Meesat, R.1., Sanguanmith, S., Meesungnoen, J., Lepage, M., Khalil, A., Jay-Gerin, J.P. (2012). Utilization of the ferrous sulfate (Fricke) dosimeter for evaluating the radioprotective potential of cystamine: experiment and Monte Carlo simulation. *Radiat. Res.* (177): 813-26.
- Miranda Martín del Campo J. (2001). Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales. Instituto de Física - UNAM. pp. 13-15.
- Molins, R.A. (2001). Food Irradiation. Principles and Applications, John Wiley & Sons Inc., New York. Cap. 11 y 15.
- Negron-Mendoza, A., Uribe, R.M., Ramos-Bernal, S., Camargo-Raya, C., Gomez-Vidales, V., Kobayashi, K. (2015) Calcium carbonate as a possible dosimeter for high irradiation doses. *Applied Radiation and Isotopes.* (100): 55-59

- OMS (1981), Serie de Informes Técnicos, núm. 659, La comestibilidad de los alimentos irradiados: Informe de un Comité Mixto FAO/OIEA/OMS de Expertos, Organización Mundial de la Salud, Ginebra.
- Shortt, K.R. (1989). The temperature dependence of  $G(\text{Fe}^{3+})$  for the Fricke dosimeter. *Phys. Med. Biol.* (34): 1923-1926.
- Spinks, J.W., Woods, R.J. (1990). *An Introduction to Radiation Chemistry*. 3th Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. pp. 95-103.
- Svensson, H., Brahme. A. (1979). Ferrous Sulphate Dosimetry for Electrons: A reevaluation. *Acta Radiol. Oncol. Radiat. Phys. Biol.* (18): 326-336.
- Valente, M., Molina, W., Carrizales Silva, L., Figueroa, R., Malano, F., Pérez, P., Santibañez, M., Vedelago, J. (2016). Fricke gel dosimeter with improved sensitivity for low-dose-level measurements. *Journal of Applied Clinical Medical Physics* (17): 402-417.
- Woods, R.J., Pikaev, A.K. (1994). *Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing*. John Wiley & Sons, Inc. New York. pp. 341-489.

