

IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO SISTEMA DOSIMÉTRICO PARA RADIOTERAPIA BASADO EN DOSÍMETROS FRICKE¹.

F. J. Gómez Grance², H. A. Melgarejo³, M. Godin⁴, R. Estigarribia⁵, M. Martínez⁶.

¹ Publicación Financiada por FaCEN y TERAPEUTY S.A.,² Laboratorio de Ciencia Radiológica e Imagenología-FaCEN-UNA,^{3, 4, 5} Clínica TERAPEUTY S.A.,⁶ Laboratorio de Calidad de Agua -FACEN-UNA.

RESUMEN: La determinación de las dosis de radiación impartida al paciente, se realiza mediante estimaciones de la dosis de referencia con una incertidumbre de al menos 3% en los mejores casos, esta dosimetría tradicional se efectúa con detectores denominados Cámara de Ionización. Por lo que la propuesta se basa, en el fenómeno de reacción de la soluciones de sulfato ferroso de amonio, que al ser expuesto a radiación ionizante, cambia la absorbancia en proporción directa con la magnitud de las dosis de radiación que reciba, constituyéndose en un dosímetro cuya utilización en Radioterapia se hace más frecuente. Como resultado del presente trabajo, podemos decir que la dosimetría FRICKE es menos exacta que la dosimetría con cámara de ionización, pero dicha dosimetría, puede ser utilizada como parámetro relativo a la dosimetría física tradicional. Sin embargo trabajos posteriores podrían mejorar la exactitud de los dosímetros FRICKE mediante el cambio del estado físico de la solución y la optimización en la preparación de la solución, conjuntamente con el aumento en la precisión y la exactitud del espectrofotómetro al medir la absorbancia.

Palabras clave: Radioterapia, Control de Calidad, Radiación Ionizante, Dosímetro.

ABSTRACT: The Determined radiation dose delivered to the patient, it is estimated by the reference dose with an uncertainty of 3% in the best cases; this is done with traditional dosimetry detectors called ionization chamber. This research is based on the phenomenon of the reaction of solutions of ferrous ammonium sulfate, which when exposed to ionizing radiation, the absorbance changes in direct proportion to the magnitude of the radiation dose received, due to this it becomes an useful dosimeter for radiotherapy being its use more frequent. As a result of this work, we can say that FRICKE dosimetry is less accurate than ionization chamber dosimetry, but such dosimetry can be used as a relative parameter to traditional physical dosimetry. However, further research could improve the accuracy of the FRICKE dosimeters by changing the physical state of the solution and optimize the preparation of the solution, together with increased precision and accuracy of the spectrophotometer, when measure the absorbance.

Key words: Radiotherapy, Quality Control, Ionizing Radiation, Densitometry

INTRODUCCIÓN

El tratamiento del cáncer, con radiaciones ionizantes experimenta un constante avance debido al desarrollo de nuevos equipos para impartir las dosis, lo mas exactas posibles, de modo a maximizar el daño al tumor y minimizar los daños a tejido sano.

Uno de los componentes más importantes del sistema de aplicación clínica de la radioterapia, es la medición de los parámetros de salida del equipo de Teleterapia, estos equipos pueden contener una fuente radiactiva como la de cobalto-60 (Co-60) o poseer Aceleradores Lineales de Partículas, los

cuales imparten las dosis de radiación.(Organismo Internacional de Energía Atómica, 2000)

Las dosis de radiación impartidas son calculadas mediante los parámetros de salida, de los cuales, el más importante y que condiciona las dosis absorbidas por el paciente, es la “dosis de referencia en agua” estimada por los distintos protocolos, sea del Organismo Internacional de Energía Atómica-OIEA o la Asociación Americana de Físicos Médicos-AAPM (Huq et al.,1999).

Por otra parte las dosis de referencia estimadas poseen una incertidumbre asociada, que en el me-

por de los casos es del 3 %, con lo cual el error debe ser minimizado de modo a mantener un mayor margen de seguridad, para cumplir con esta premisa, se realizan controles cruzados con las cámaras de ionización, los cuales constituyen verificaciones redundantes que consisten en mediciones realizadas por varios profesionales (al menos dos), y también se utilizan detectores con principios físicos diferentes, como la termo-luminiscencia y el fenómeno de semiconducción de las cargas eléctricas en detectores sólidos (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2000; Cunningham y Johns, 1983)

Además de las mediciones redundantes por parte de la propia clínica, el Organismo Internacional de Energía Atómica – OIEA conjuntamente con la Organización Panamericana de la Salud-OPS, poseen programas gratuitos de inter-comparación, con dosímetros termolumiscentes TLDs, los cuales son enviados a las clínicas anualmente (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2005; Organismo Internacional de Energía Atómica, 1998)

El presente trabajo ofrece un método dosimétrico alternativo y fiable, mediante la solución Fricke, que al ser expuesta a radiación ionizante, cambia la absorbancia en proporción directa con la magnitud de las dosis de radiación que reciba, constituyéndose así en un sistema dosimétrico redundante.

Los dosímetros Fricke son utilizados en la determinación de dosis, en irradiadores industriales, los cuales se utilizan para esterilización de insectos e irradiación de alimentos, estos dosímetros poseen un rango de medición en esas prácticas del orden de 40-400 Gy (International Atomic Energy Agency, 1977).

La dosimetría Fricke ha demostrado poseer una reacción estable de oxidación-reducción, inducida por la exposición a las radiaciones ionizantes, también ha demostrado poseer versatilidad y facilidad de procesamiento de las lecturas con un bajo costo, por lo que estos factores hacen de esta alternativa una opción viable.

También se debe tener en cuenta que la reacción de oxidación-reducción que forman los iones, se puede activar con la iluminación de luz natural, por lo que se debe mantener la solución en lugares fres-

cos y oscuros. (Pedrosa et al., 2003)

Podemos definir la calibración del dosímetro por medio del factor “f” que determina la respuesta del dosímetro, en valores de absorbancia “A”, así este factor está dado por:

$$f = \frac{(A - A_0)}{D} \quad \text{Ec-1}$$

En donde A_0 es la absorbancia medida antes de que la solución sea irradiada, y D es la dosis de radiación impartida al dosímetro. (ZAVALA ed at., 1985)

Además el factor “f” depende la eficiencia o rendimiento (G) de los fotones de rayos gamma que interactúan con el dosímetro (ρ), la densidad del dosímetro (\bar{n}), el camino óptico recorrido (d) por la radiación UV que utiliza el espectrofotómetro, el coeficiente de extinción molar (k) a 305 nm y 25 °C, factores de conversión de volumen (b) y energía (ϵ), como también de la constante de avogadro (N_A). (ZAVALA ed at., 1985)

Así el factor f se puede escribir como:

$$f = \frac{N_A}{\rho \cdot G \cdot \epsilon \cdot d} \cdot \frac{b}{k} \quad \text{Ec-2}$$

En la ecuación 2, “G” se denomina rendimiento de interacción del fotón en la solución Fricke y su valor está medido en unidades del inverso de la energía del fotón (International Atomic Energy Agency, 1977).

Con este formalismo se realizaron las exposiciones de los dosímetros FRICKE con el maniquí desarrollado en el Laboratorio de Ciencias Radiológicas e Imagenología dependiente de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción, para dicha irradiación se utilizó un Acelerador de 6 MU, para el que se mantiene un programa de Calidad adecuado en la Clínica de Radioterapia Terapeutix S.A.

MATERIALES Y MÉTODOS

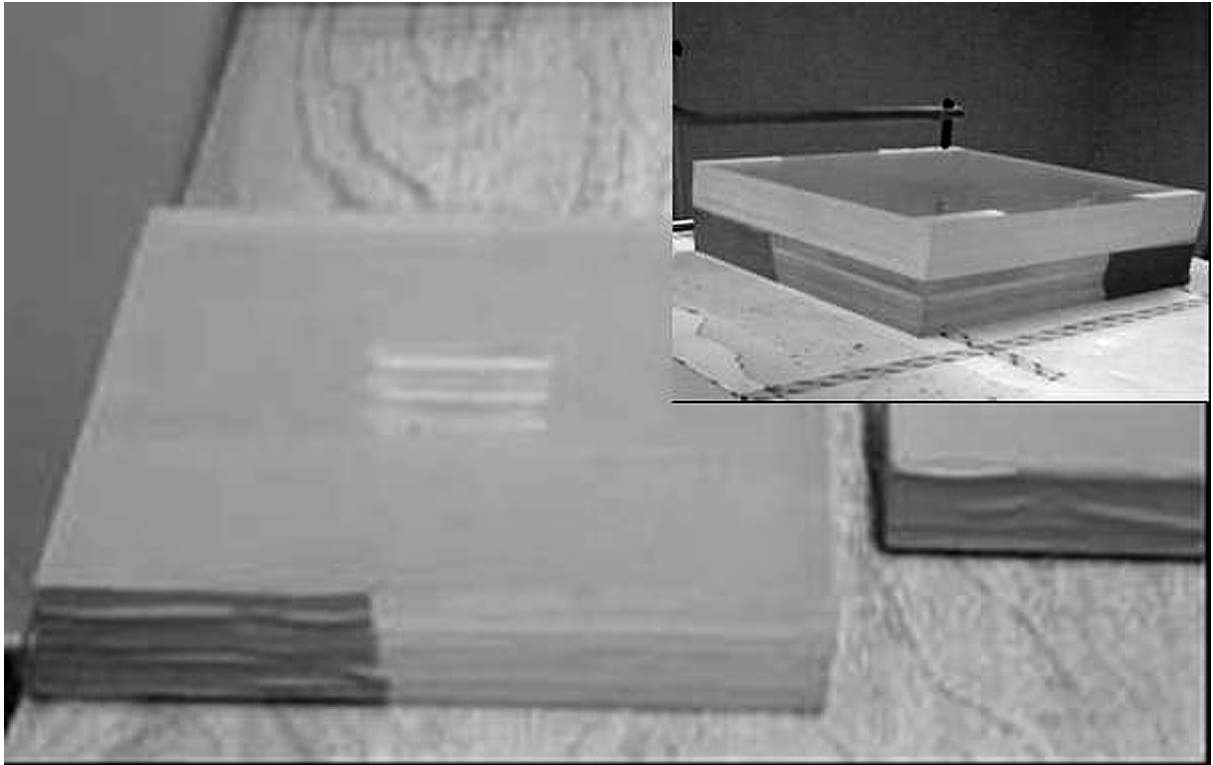


Figura 1. Maniquí equivalente a agua construido en FACEN, con tres ranuras para el posicionamiento de las cápsulas dosimétricas.

De manera a realizar la mejor estimación de las dosis de radiación impartidas en la Clínica, se procedió a:

- I- La construcción del maniquí equivalente a agua y las cápsulas dosimétricas.
- II- Preparación de la Solución Fricke.
- III- El control de calidad del espectrofotómetro.
- IV- La irradiación de soluciones Fricke en condiciones de referencia.
- V- Mediciones de Absorbancia con el espectrofotómetro.

Los dosímetros no pueden ser irradiados en el aire debido a la necesidad de atenuación bajo la condición de equilibrio electrónico (CEP) de los electrones secundarios y Build-Up (Padgorsak, 2005), además, los dosímetros en estado líquido, están contenidos en un recipiente, el cual sería muy grande si pensamos en la atenuación necesaria, por tal motivo se procedió a:

I- Construcción del maniquí equivalente a agua y las cápsulas dosimétricas.

Para la construcción del maniquí equivalente a agua se realizó el siguiente cálculo.

- Se considera la ecuación de atenuación de haces de fotones, bajo condiciones de haz fino (PADGORSK, 2005)

$$I = I_0 e^{-\mu X} \quad \text{Ec-3}$$

- El coeficiente de atenuación másico relativo agua-acrílico, obtenido de la Tabla I-I referencia (International Atomic Energy Agency, 1977).

$$\left[\frac{\mu_{en}}{\rho} \right]_{a/p} = 1,04 \quad \text{Ec-4}$$

- La condición de misma atenuación de la dosis:

$$\left[\frac{\mu_{en}}{\rho} \right]_{a/p} = \frac{d_p}{d_a} = 1,04 \quad \text{Ec-5}$$

- La densidad nominal del acrílico: Ver referencia (International Atomic Energy Agency, 1977) cuadro 21.

$$\rho_p = 1,190 \text{ g/cm}^3$$

- El espesor másico del agua:

$$d_a = 1 \text{ g/cm}^2$$

- Con la Ec-5 se calcula el espesor másico del acrílico:

$$d_p = 1,04 \text{ g/cm}^2$$

Y teniendo en cuenta la profundidad de referencia en agua: $d'_p = 5 \text{ cm}$., ver referencia (Organismo Internacional de Energía Atómica, 1998) cuadro VII, se calculó el espesor de acrílico equivalente a 5 cm de agua:

$$e = \frac{d'_p}{\rho_p} \approx 4,4 \text{ cm} \quad \text{Ec-6}$$

Por tanto la parte superior del maniquí posee 4 cm de espesor, más la parte intermedia 0,5 cm y el inferior 10,5 cm. Entonces las dimensiones finales del cubo de acrílico son de 25 cm x 25 cm y 15 cm de altura. Dicho cubo fue construido con láminas acrílicas de 1 cm de espesor y 25 cm x 25 cm de superficie, como se muestra en la Figura 1

Para el posicionamiento de los dosímetros se efectuó tres aberturas en el acrílico de modo a ubicar las cápsulas del dosímetro en una posición fija respecto al maniquí, como se muestra en la figura 1.

Las cápsulas de los dosímetros están hechas de

material plástico con un espesor de 1 mm y fueron envueltas con una lámina opaca a la luz natural, de modo a reducir el ruido debido a las recombinaciones estimuladas por dichos fotones.

II- Preparación de la solución Fricke.

La preparación del dosímetro se realiza disolviendo 0,392 g de sulfato ferroso de amonio ($(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_6\text{H}_2\text{O}$) y 0,0585 g de NaCl en 12,5 ml. H_2SO_4 0.8N a 25 °C. Esta solución no es completamente estable, sin embargo se puede guardar por 9 semanas en botellones acaramelados a temperatura de 15°C a 20 °C (International Atomic Energy Agency, 1977).

Se debe preparar además una solución patrón de modo a obtener el coeficiente de extinción de la sustancia o que es lo mismo su absortividad.

La solución "master" o solución patrón debe tener una absorbancia aproximadamente de 4, para preparar dicha solución es necesario pesar 100 mg de hierro puro en polvo [pro análisis-p.a.], colocando luego en un frasco volumétrico de 1000 ml de cuello largo calibrado. Luego se adiciona 60 ml de agua destilada y 22,5 ml de ácido sulfúrico concentrado [densidad de 1,84 g/ml], se calienta lentamente hasta que se disuelva completamente el alambre de Fe y se disipe el humo blanco.

Con el frasco invertido se deja enfriar la solución, se debe recordar que durante el calentamiento, enfriado y reflujo, el cuello del frasco permaneció a 45° para evitar la pérdida de solución por borboteo.

III- Control de calidad del Espectrofotómetro.

Es posible chequear las longitudes de onda detectadas por el espectro fotómetro de la Shimadzu Modelo: UV-160A, mediante dos procedimientos:

- Mediante una lámpara de mercurio estándar, que emite fotones de longitudes de onda específica en el rango visible y de UV.
- Mediante una lente que filtre determinadas longitudes de onda.

Se puede controlar la absorbancia [densidad

Longitud de Onda (nm)	Máximo y Mínimo	Coefficiente de Extinción ($\text{g}^{-1}\text{cm}^{-1}$)	Absorbancia ($0,055\text{g}/\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
235	Mínimo	12,5	0,687
257	Máximo	14,5	0,797
313	Mínimo	4,5	0,270
350	Máximo	10,7	0,588

Tabla I. Valores de la escala estándar de la absorbancia del Dicromato de Potasio (International Atomic Energy Agency, 1977).

óptica]; mediante la verificación de la longitud de onda que está emitiendo la lámpara.

Para ello se chequea la escala de la absorbancia o la densidad óptica de una solución estándar [Dicromato de Potasio], la cual se prepara mediante la dilución de 10 ml de ácido sulfúrico en 1000 ml de agua destilada (International Atomic Energy Agency, 1977).

Luego se vierte 500 ml de agua destilada en un recipiente limpio de 1000 ml de capacidad. Se mezcla 35 ml del ácido sulfúrico disuelto con 500 ml de agua del recipiente. Se disuelve 55 mg de dicromato de potasio [p.a.] con la solución del mismo frasco. Cualquier cantidad entre 60 y 50 mg de dicromato de potasio puede ser utilizada pero debe conocerse el peso con una precisión de 0,1 mg. (International Atomic Energy Agency, 1977).

Por último se llena el frasco justo por debajo de la marca calibrada y se deja estabilizar la solución a una temperatura constante, determinada mediante un termómetro calibrado, luego se llena con agua destilada hasta la marca y se mezcla meticulosamente hasta que esté lista para su uso.

La absorbancia, "A" de la solución de dicromato de potasio puede calcularse [utilizando como solución blanco la solución acuosa del ácido sulfúrico] mediante la fórmula:

$$A = a \cdot c \cdot d \quad \text{Ec-7}$$

donde:

"a" se denomina coeficiente de extinción dado en [$\text{g}^{-1}\text{cm}^{-1}$], ver Tabla I

"c" es la concentración de dicromato de

potasio en ácido sulfúrico [g^{-1}]
 "d" es el camino óptico de la cubeta utilizada [cm.]

Se utiliza el Dicromato de Potasio como estándar debido a la estabilidad de dos picos máximos y dos picos mínimos cuyos coeficientes de extinción y absorbancia se observan en la Tabla I.

Para realizar las medidas y controlar el ajuste de la perilla de selección de longitudes de onda, se procede de la siguiente forma:

- i. Se selecciona con el selector la longitud de onda 235 nm.
- ii. El selector de transmitancia se ajusta a 0% con la cubeta de referencia oscura.
- iii. Se ajusta a 100 % de transmitancia quitando la cubeta de referencia y dejando vacía la misma.
- iv. Se carga el dicromato de potasio en la cubeta y se analiza en el espectrómetro anotando el valor de la transmitancia.
- v. Se selecciona nuevamente la longitud de onda a 4 nm por encima y debajo de 235 nm y se mide en los dos casos.
- vi. Se repite los pasos desde el ii al v con el selector de longitudes de onda a 257 nm, en 313 nm y 350 nm.
- vii. Para que el equipo esté dentro del rango de tolerancia los valores nominales deben encontrarse dentro del 2%.
- viii. De no estar en conformidad con el paso vii los valores de lectura deben efectuarse con más detalle y son desechadas aquellas medidas fuera de la media.

Tipo de haz	Calidad	Profundidad de referencia	Distancia fuente superficie	Tamaño de campo.
<i>Rx de alta energía</i>	<i>TPR 20/10 < 0,70</i>	<i>5 cm</i>	<i>100 cm</i>	<i>10 cm x 10 cm</i>

Tabla II. condiciones de referencia para la calidad del haz de irradiación (Organismo Internacional de Energía Atómica, 1998).

IV- Irradiación de soluciones Fricke en condiciones de referencia.

Una vez diseñado y construido el maniquí para efectuar la irradiación de los dosímetros Fricke, se procedió a la puesta en marcha del setup de irradiación, teniendo en cuenta el equipamiento disponible para la irradiación, en ese sentido las dosis de radioterapia son calculadas en relación a una dosis de referencia medida en un maniquí de agua, con parámetros estándares y característicos de la energía del haz de radiación, en este caso se utiliza un acelerador de electrones que mediante la interacción con un filtro aplanador produce haces de fotones de 6 MeV. (Padgorsak, 2005)

Las condiciones de referencia de medición se muestran en la Tabla II:

Para impartir las dosis establecidas de 60, 50, 30, 10 Gy, se irradiaron los dosímetros en condiciones de referencia, es decir a distancia fuente-superficie de 100 cm con las cápsulas dosimétricas en el isocentro.

Estas condiciones fueron simuladas con el maniquí controlando la calidad del haz, y manteniendo la distancia fuente-superficie y el tamaño de campo.

Se irradian los dosímetros con dosis de 60 Gy, 50 Gy, 30 Gy y 10 Gy con exposiciones escalonadas de 999 UM hasta alcanzar las unidades monitor necesarias respectivamente.

Luego de la irradiación de cada grupo de dosímetro se retira del cuarto de irradiación y se ingresa los otros dosímetros para irradiar.

Terminada la irradiación en la Clínica se procedió a las lecturas de la absorbancia en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, con el espectrofotómetro Shimadzu-Modelo: UV-160A.

Con los valores medidos y el cálculo del coeficiente de extinción de la solución, se determinaron las dosis absorbidas para cada irradiación.

Se debe destacar que a los dosímetros para irradiar acompañan tres dosímetros denominados blancos, que determinan el fondo de la absorbancia, pues están sometidos a las mismas condiciones ambientales de los dosímetros irradiados.

V- Mediciones de Absorbancia con el espectro fotómetro.

Las mediciones de absorbancia del dosímetro y de la solución patrón se realiza con un espectrofotómetro, empleando una cubeta de cuarzo de camino óptico igual 1 cm e iluminado con luz de longitud de onda igual a 305 nm, fue necesario entonces, determinar el coeficiente de extinción de la solución patrón, y utilizar este coeficiente en el cálculo de la dosis que produce la variación de absorbancia.

Con las mediciones obtenidas se realizó la mejor estimación del coeficiente de extinción cuyo valor medido fue de: $2652,8 \text{ g}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

Los demás valores considerados para la estimación de las dosis son:

N° de Avogadro: $N_A = 6,022 \times 10^{23}$

Densidad de la solución: $\rho = 1,024 \text{ g/cm}^3$

Rendimiento químico de irradiación " G " = $15,2 \times 10^{-2} \text{ eV}^{-1}$

Camino óptico = 1 cm

Factor de conversión de energía E: $1,602 \times 10^{-14}$

Factor de conversión de volumen K: 10^3 .

Con el coeficiente de extinción y la medida de absorbancia se determinó la dosis absorbida en los dosímetros:

Curva del coeficiente de extinción			
C	ABS.	Relación	
1	0	0	
2	1	0,032	0,032
3	2	0,068	0,034
4	5	0,183	0,037
5	7	0,257	0,037
6	10	0,372	0,037
7	15	0,567	0,038
8	20	0,759	0,038
9	25	0,943	0,038

Coeficiente de Extinción 2652,8

Tabla III. Valores de concentración vs. Absorbancia y el valor del coeficiente de extinción.

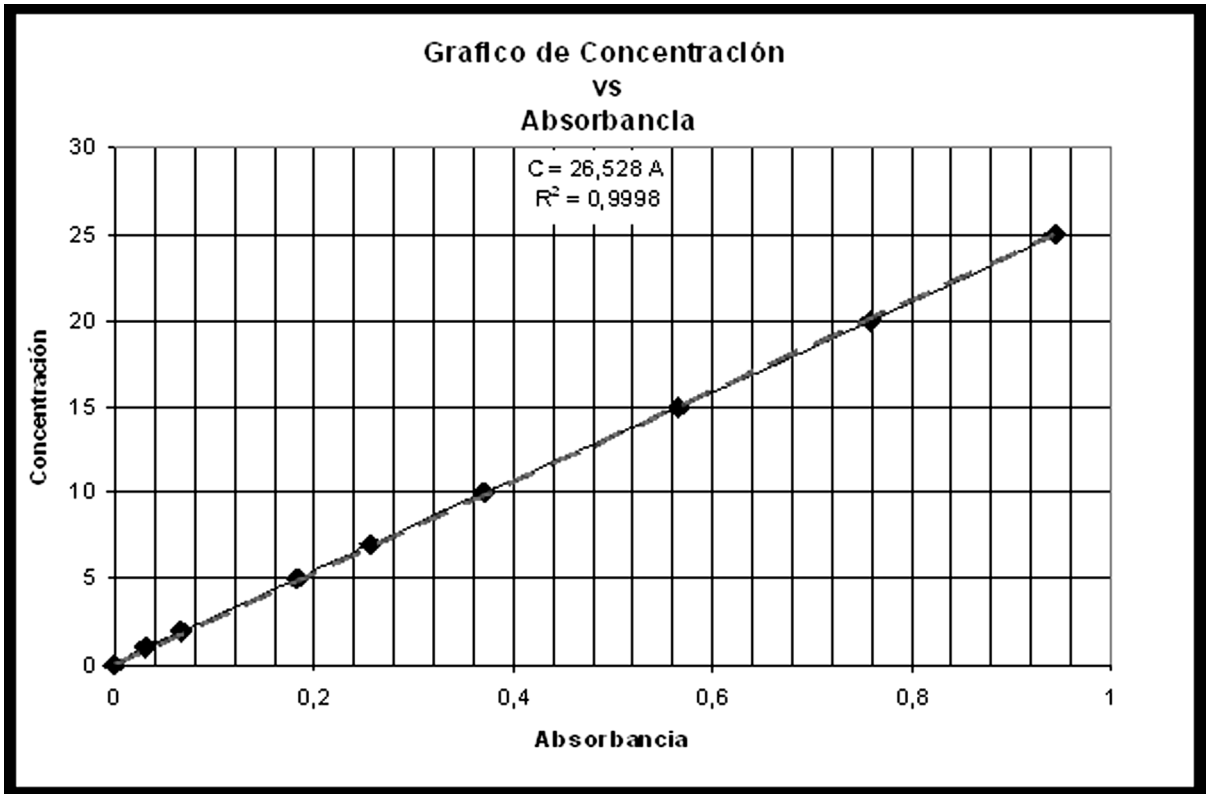


Gráfico 1. Línea de tendencia del análisis de regresión lineal, de la concentración de la solución Fricke y la absorbancia.

$$D = \frac{Na \times E}{K \rho_F G \epsilon \lambda} \Delta A \quad \text{Ec-9}$$

donde ΔA es la variación de absorbancia antes y después de irradiar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La medición de la absorbancia de los dosímetros se realiza mediante el valor del coeficiente de extinción de la solución Fricke.

Para la determinación del coeficiente de extinción (luego de la prueba de calidad del espectrofotómetro) se preparó diferentes alícuotas con diferentes concentraciones de la solución patrón, y se realizaron medidas de absorbancia para cada concentración, determinándose mediante la pendiente de la curva el coeficiente de extinción mostrado en la Tabla III

Con los datos de absorbancia y concentración se puede graficar la concentración en función de la absorbancia.

Una vez obtenida el valor del coeficiente de extinción, se realizó la irradiación de los dosímetros,

los cuales fueron irradiados en grupos de tres dosímetros, en quince oportunidades, y luego fueron medidos en el espectrofotómetro de la FaCEN, con lo cual se calculó las dosis de radiación, las cuales se muestra en la Tabla IV.

Como puede observarse en la Tabla IV, la diferencia porcentual con los valores de dosis teóricos es muy alta y no son suficientemente precisos para la dosimetría necesaria en Radioterapia.

En el Gráfico 2 podemos notar que la diferencia porcentual es de 15 % para el 95% de los valores estimados y solo el 5 % de ellos tienen un error porcentual de 20 % o más.

Parte de los errores en estimación de las dosis son debidos a los resultados obtenidos en el control de calidad del espectro fotómetro, que demostraron una falta de calibración y de constancia de dicho instrumento, como se observa en la tabla V.

Otro aspecto por el cual el error porcentual es muy elevado se debe al diseño del maniquí con las láminas de acrílico, pues entre láminas existe aire, cuyo efecto no se ha tenido en cuenta.

Las estimaciones de las dosis suministradas al dosímetro, mediante la medida de la absorbancia

Nº Prueba	Dosis Teórica Suministrada (Gy)	Dosis Medida(Gy)	Diferencia %
1	50	42,55	-14,9
2	30	25,56	-14,8
3	50	50,76	1,5
4	30	35,52	18,4
5	10	10,77	7,7
6	50	49,22	-1,6
7	30	24,83	-17,2
8	30	25,78	-14,1
9	60	48,17	-19,7
10	60	50,35	-16,1
11	60	48,57	-19,0
12	60	44,22	-33,6
13	60	39,86	-18,6
14	60	48,81	-12,3
15	60	52,61	-12,3

Tabla IV. Valores de dosis calculadas a partir de las medidas de absorbancia promediadas de cada grupo de dosímetros.

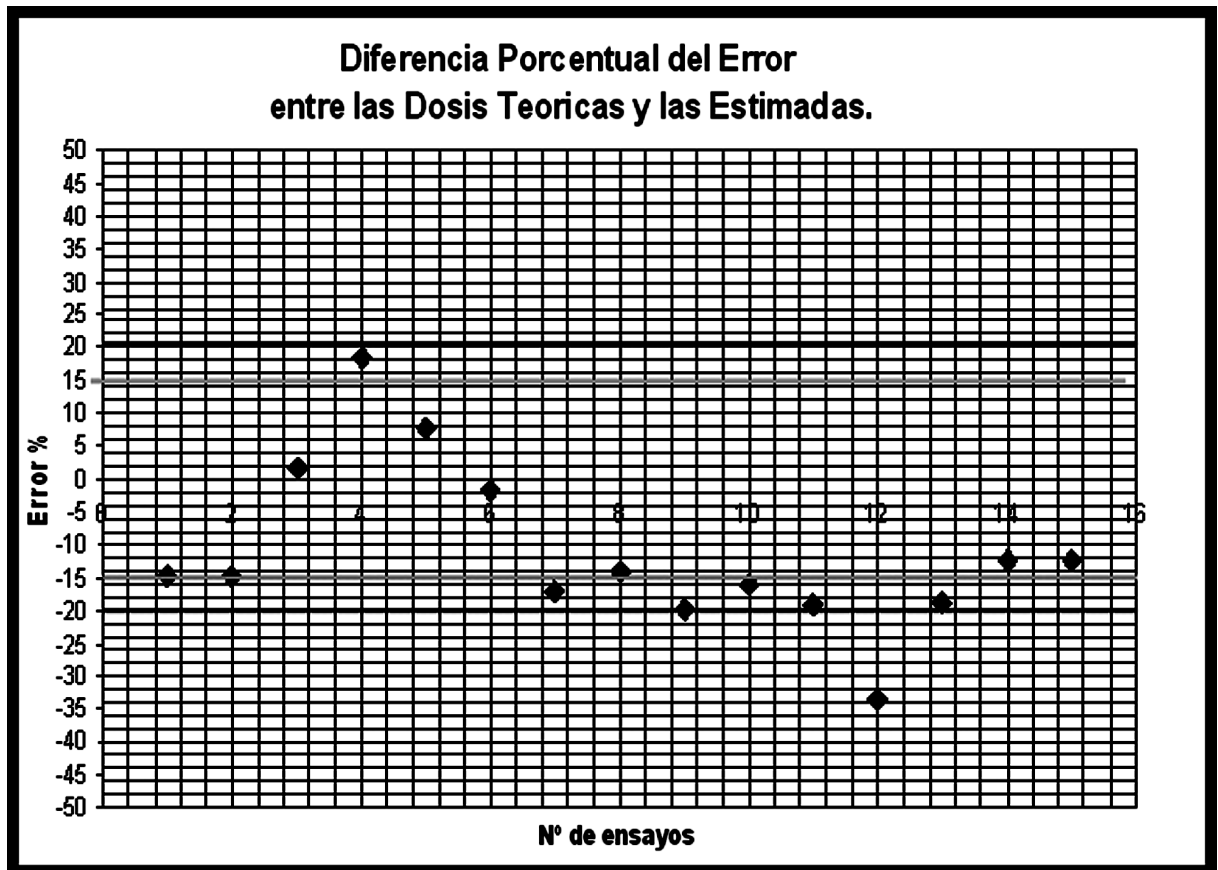


Gráfico 2. Valores de la diferencia porcentual se puede notar una gran tendencia a sobre estimar las dosis de radiación, dentro del 20% de error relativo.

de la solución Fricke, a demostrado ser una alternativa para establecer una dosimetría relativa y de referencia, sin embargo debido a la variabilidad de los valores estimados y el error relativo del 20%, se considera que ésta dosimetría *no podría* ser utilizada como una dosimetría absoluta, teniendo en cuenta que la dosimetría con cámara de ionización tiene una exactitud del 3%.

Sin embargo una optimización de los controles de calidad del espectrofotómetro y de la construcción del maniquí podría cambiar dicha afirmación.

Por otra parte se estima que cambiando el estado de la solución y la calidad del haz para la irradiación, como por ejemplo un haz de electrones y no de fotones, podría cambiar el rendimiento de interacción "G", del fotón o la radiación involucrada en la solución, lo cual resultaría en estimaciones

más exactas.

CONCLUSIONES

Las dosis de radiación así estimadas mediante este sistema verifica la necesidad de realizar nuevas investigaciones referentes a aumentar el rendimiento de interacción "G", aun así dicho sistema se constituyen un sistema redundante aunque no absoluto del control de Dosis que se aconseja realice una instalación de Radioterapia.

LITERATURA CITADA

Padgorsak, E.B. 2005. «Radiation Oncology Physics: a handbook for Teachers and students». Vienna-Austria: International Atomic Energy Agency. 657p.

<i>Valores medidos de Transmitancia y Valores calculados de ABSORBANCIA y COEFICIENTE DE EXTINCIÓN</i>						
<i>Longitud de Onda</i>	<i>Coefficiente de Extinción</i>	<i>Absorbancia</i>	<i>Transmitancia Medida</i>	<i>Coefficiente de Extinción Calculados</i>	<i>Absorbancia Calculada</i>	<i>Error %</i>
235	12,5	0,687	18,3	13,4	0,738	7,2
257	14,5	0,797	15,4	14,7	0,812	1,4
313	4,5	0,270	50,5	5,39	0,297	19,8
350	10,7	0,588	24,9	11	0,604	2,8

Tabla V. Valores de absorbancia para diferentes longitudes de onda, el error porcentual no debió pasar el 2%.

- Pedrosa G.A.C.; Dantas C.C.; Campos C.A. 2003. *Análise de Medições com Dosímetro Fricke*. Sociedade Brasileira de Metrologia (EBM). Recife: Pernambuco, 1-5p.
- Huq, M.S.; Hossain, M.; Andreo, P. 1999. A comparison of the AAPM TG51 protocol and the IAEA absorbed -dose-to water based Code the Practice for dosimetry calibration of high energy photon beams. , *Med. Phys.*, 26: 1153p.
- International Atomic Energy Agency. 1977. *Manual of Food Irradiation Dosimetry*. Vienna: Technical Reports. 159 p. Serie Nº 178.
- Zavala, J.L.; Fierro, M.M.; Schwarz, A.J. et al. 1985. *Dosimetry Practice For Irradiation of the Mediterranean Fruit Fly*. Chiapas-México: IAEA-SM 272/36. Dirección General de Sanidad Vegetal, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos Metapa. 22-30 p.
- Cunningham, J.; Johns, H. 1983 *The Physics of Radiology* ;4ª Ed. Springfield: Charles C Thomas, Publisher. 796 P.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. 1998. *Determinación de la Dosis Absorbida en haces de fotones y electrones*. ; Viena-Austria: Colección de Informe Técnico. 102 p. Serie Nº: 277
- Organismo Internacional de Energía Atómica. 2000. *Aspectos Físicos de la Garantía de Calidad en Radioterapia: Protocolo de Control de Calidad* Austria: IAEA-TECDOC. 135 p. Serie Nº 1151.
- Organismo Internacional d Energía Atómica. 2005. *Determinación de la Dosis Absorbida en Radioterapia con haces externos* Viena-Austria: Colección de Informe Técnico. 229 p. Serie Nº 398.