



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

“DETERMINACION DE LA DOSIS IMPARTIDA A CELULAS EXPUESTAS A UN IRRADIADOR DE ⁹⁰Sr / ⁹⁰Y Y EN UN EQUIPO DE RAYOS X”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

F I S I C O

P R E S E N T A :

HUGO RAMIREZ PEREZ



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM

DIRECTORA DE TESIS:

M. EN C. ANA ELENA BUENFIL BURGOS

2005



FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR

m 348908



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:
 "Determinación de la dosis impartida a células expuestas a un irradiador de
 Sr90/Y90 y en un equipo de rayos X".

realizado por Ramírez Pérez Hugo

con número de cuenta 09627417-6 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
 Propietario M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos

Ana E. Buenfil Burgos
María Ester Brandan Siqués

Propietario Dra. María Ester Brandan Siqués

Propietario Dra. María de los Angeles Ortiz Flores

María de los Angeles Ortiz Flores

Suplente Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga

Beatriz E. Fuentes M.

Suplente M. en C. Adolfo Zárate Morales

Adolfo Zárate Morales

Consejo Departamental de Física

Alicia Zarzosa Pérez
 M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ
 FACULTAD DE CIENCIAS
 DEPARTAMENTO DE FÍSICA

*A mi familia:
a mi Madre, a mi Padre, a mis
hermanos y amistades.*

*Sin quienes el amor, la dedicación,
la felicidad, y demás cosas
maravillosas a lo largo de mi vida
hubiera podido conocer, compartir
y disfrutar.*

Mehr Licht!

Johan Wolfgang Goethe.

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento a las siguientes personas, sin quienes habría sido muy, pero muy difícil la realización de esta tesis:

A la M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos, por su dedicación, apoyo, paciencia, y sabios consejos en la elaboración de este trabajo.

A los integrantes del comité sinodal: M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos, Dra. María E. Brandan Siqués, Dra. María de los Ángeles Ortiz Flores, Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga y M. en C. Adolfo Zárate Morales, por la lectura, comentarios y sugerencias acerca de este trabajo.

A la C. a Dra. Dorys Mata López, por su disposición y apoyo invaluable, además de comentarios y recomendaciones acertadas durante la realización de los experimentos de esta tesis.

A la Dra. Isabel Gamboa de Buen, por sus oportunos comentarios y sugerencias acerca de los problemas que se presentaron en el transcurso de este trabajo, así como en los cálculos efectuados con el programa XCOMP3 v 3.3.

A la Dra. María E. Brandan Siqués, por la atención que tuvo al revisar este trabajo, además de su apoyo y sugerencias siempre oportunas durante la escritura de esta tesis.

Al M. en C. César Gustavo Ruiz Trejo, por su apoyo en el manejo del tubo de rayos x, así como la solución de dudas al respecto.

A la Dra. Yolanda Villaseñor, por las facilidades otorgadas en la realización del experimento con un equipo de rayos x ubicado en el INCan.

A la Dra. Patricia Ostrosky S., por permitirnos usar las instalaciones y equipo del Laboratorio de Genómica y Toxicología Ambiental del Instituto de Investigaciones Biomédicas.

A mis maestros y compañeros de la Licenciatura en Física, por enseñarme el maravilloso mundo de la ciencia y el vasto campo de la investigación y sus aplicaciones.

Al grupo de Dosimetría del IFUNAM por su amistad y apoyo.

Finalmente, agradezco al proyecto de PAPIIT – IN109302 por el apoyo económico brindado durante la realización de este trabajo.

ÍNDICE:

INTRODUCCIÓN.....	iii
-------------------	-----

SECCIÓN I.- DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DOSIS IMPARTIDA A CÉLULAS EXPUESTAS A UN IRRADIADOR DE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

I.1.- SOLUCIÓN FRICKE.....	1
I.1.1.- Determinación de la dosis en Solución Fricke.	
I.2.- CORRECCIÓN DE LA DOSIS PROPORCIONADA POR LA FUENTE DE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, POR DECAIMIENTO RADIOACTIVO.....	3
I.3.- DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	3
I.4.- RESULTADOS.....	4
I.5.- COMENTARIOS ACERCA DE LOS RESULTADOS.....	5
I.6.- CONCLUSIONES.....	5

SECCIÓN II.- DETERMINACIÓN, CON SOLUCIÓN FRICKE, DE LA DOSIS IMPARTIDA POR UNA FUENTE DE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ COMO FUNCIÓN DEL ESPESOR DEL BLANCO

II.1.- DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	7
II.2.- RESULTADOS.....	9
II.3.- COMENTARIOS ACERCA DE LOS RESULTADOS.....	10
II.4.- CONCLUSIONES.....	11

SECCIÓN III.- DETERMINACIÓN DE LA DOSIS, COMO FUNCIÓN DEL ESPESOR, DE PELÍCULAS DE TINTE RADIOCRÓMICO, EXPUESTAS A UNA FUENTE DE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

III.1.- RESPUESTA ÓPTICA DE LAS PTR.....	13
III.2.- DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	14
III.3.- RESULTADOS.....	15
III.4.- COMENTARIOS ACERCA DE LOS RESULTADOS.....	16
III.5.- CONCLUSIONES.....	18

SECCIÓN IV.- DETERMINACIÓN DE LA DOSIS IMPARTIDA, EMPLEANDO CÁMARA DE IONIZACIÓN, A CÉLULAS EXPUESTAS A UN CAMPO DE RADIACIÓN DE UN TUBO DE RAYOS X

IV.1.- CÁMARA DE IONIZACIÓN.....	19
IV.1.1.- Calibración de un haz de rayos x en términos del kerma de colisión en espacio libre o dosis absorbida	
IV.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	21
IV.3.- RESULTADOS.....	21
IV.4.- CONCLUSIONES.....	24

CONCLUSIONES GENERALES.....	25
------------------------------------	-----------

REFERENCIAS.....	26
-------------------------	-----------

APÉNDICE I.....	28
------------------------	-----------

APÉNDICE II.....	29
-------------------------	-----------

INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Genómica y Toxicología Ambiental del Instituto de Investigaciones Biomédicas (IIB), se llevan a cabo experimentos que requieren irradiar células para estudiar los efectos que la radiación tiene sobre éstas {Ma 04}. Para ello se diseñó y construyó un irradiador de partículas β^- emitidas por una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. En el año 2002, se realizó un estudio muy completo, como trabajo de tesis, de la distribución de la dosis en el interior de los tubos en los que se irradian las células {Ro 03}. En 2005 existían resultados muy interesantes, en relación con las células irradiadas, dignos de publicarse, por lo que se decidió hacer una nueva dosimetría para asegurar que los efectos observados en las células ocurrieron a las dosis reportadas.

Se optó por hacer una nueva evaluación de la dosis en agua, impartida por la fuente, empleando ahora un dosímetro absoluto llamado Solución Fricke, el cual funciona con una precisión del 2 %.

El presente trabajo tuvo como motivación inicial, determinar la dosis en agua (o tasa de dosis) impartida a las células por un irradiador que contiene una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ubicado en el IIB, empleando como dosímetro a la Solución Fricke, así como por un equipo de rayos x usando en este caso una cámara de ionización, considerando en ambas irradiaciones condiciones específicas.

Como parte complementaria e importante, se considera la calibración directa con Solución Fricke, y complementada con películas de tinte radiocrómico (PTR), de la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ubicada en el IFUNAM, a la cual se le asignaba previamente una dosis de radiación equivalente a rayos gamma, correspondiente a la fuente de ^{60}Co que se usó para calibrar.

I.- DETERMINACIÓN DE LA TASA DE DOSIS IMPARTIDA A CÉLULAS EXPUESTAS A UN IRRADIADOR DE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

La ventaja que tiene la Solución Fricke en este experimento, es que se trata de un dosímetro líquido cuya densidad es muy similar a la del agua y también a la sustancia⁺ en la que se encuentran las células durante las irradiaciones. Anteriormente, septiembre del 2004, en un trabajo donde se intentó evaluar la dosis entregada por dicha fuente, pero empleando dosímetros termolumiscentes y películas de tinte radiocrómico {Bu 05}, no se pensaba en usar este tipo de dosímetro, ya que la dosis en agua en la Solución Fricke, se evalúa midiendo el cambio en su densidad óptica en un espectrofotómetro. Éste debe ser capaz de hacer medidas de cantidades muy pequeñas de líquido (100 μl) para este caso particular, sin embargo, en ese entonces, no se tenía disponibilidad de un instrumento de este tipo, pero debido a que el Laboratorio de Genómica y Toxicología Ambiental del IIB, cuenta con un espectrofotómetro capaz de realizar medidas para volúmenes reducidos (mínimo 100 μl , dependiendo de la celda del espectrofotómetro), se procedió a realizar tal experimento con la Solución Fricke, para determinar la tasa de dosis impartida a las células por el irradiador de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

I.1.- SOLUCIÓN FRICKE

El sistema dosimétrico de sulfato ferroso propuesto por H. Fricke y E. J. Hart en 1927, conocido como Solución Fricke {Fr 66}, es aceptado como un sistema dosimétrico de referencia para la calibración de dosis absorbida en un campo de radiación, así como para la calibración de otros dosímetros secundarios.

El dosímetro está basado en la oxidación, debida a la irradiación, de una solución acuosa de sulfato ferroso amoniacal, y la dosis se determina a partir de conocer la concentración de iones férricos formados después de la irradiación. El intervalo de dosis medido con una precisión entre el 1% y 2% de error es de 40 Gy a 400 Gy; sin embargo estos límites pueden extenderse usando

* Conocida como medio de cultivo RPMI – 1640, densidad similar a la de las células a irradiar y está compuesta por una serie de alrededor de 30 nutrientes {Ma 04}.

técnicas especiales. La Solución Fricke empleada durante el desarrollo de ésta tesis, fue elaborada por la química Claudia Raya Camargo (del ICN), el 9 de febrero del 2005.

1.1.1.- Determinación de la dosis en Solución Fricke

Para determinar la dosis absorbida promedio en agua por el dosímetro Fricke es necesario conocer la cantidad de iones férricos formados en ésta debido a la irradiación. La técnica de titración[‡] puede ser usada para determinar tal cantidad pero el método estándar empleado para este fin es el método espectrofotométrico, el cual es más común debido a que es más rápido, preciso y se puede hacer el análisis para bajas concentraciones de iones férricos y cantidades pequeñas de solución.

El método consiste en medir el cambio en la densidad óptica o absorbancia (DO, A) de la solución irradiada respecto de otra no irradiada, tomada como referencia, a una longitud de onda de 304 nm, a la cual los iones férricos muestran la máxima absorción. Sin embargo, existe un intervalo de 302 nm a 305 nm en el que puede leerse la DO {Sc 62}. La dosis absorbida promedio en agua, está dada por:

$$\bar{D} = \frac{\Delta A}{\rho \epsilon d G(Fe^{3+})} \quad (\text{ec. I.1})$$

donde:

$\epsilon = 2187 \text{ l/mol cm}$, es el coeficiente de extinción molar de los iones férricos, para una longitud de onda de 304 nm y una temperatura de 25 °C {At 86}.

$d = 1 \text{ cm}$ (longitud de trayectoria de la luz que recorre a través de la celda).

$G(Fe^{3+}) = 1.597 \times 10^{-6} \text{ mol/I}$, es el producto de los iones férricos formados por cada 100 eV de energía absorbida, para una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ {Vu 86}.

$\rho = 1.024 \text{ kg / l}$, para la Solución Fricke estándar a 25 °C {At 86}.

$\Delta A =$ es el cambio en la absorbancia o densidad óptica.

Entonces, la dosis promedio en agua vendrá dada por:

$$\bar{D} = 280 \times \Delta A(Gy) \quad (\text{ec. I.2})$$

[‡] La Titrición es una técnica de laboratorio con la cual se puede determinar la concentración de un reactivo desconocido, usando una concentración estándar de otro reactivo que químicamente reacciona con el desconocido. A esta solución estándar se le llama "titrante". Al llegar al punto (llamado "de equivalencia") en el que el reactivo desconocido ha reaccionado con el titrante estándar, se realiza una equivalencia entre ambas sustancias (conociendo el volumen empleado del titrante estándar) para conocer la concentración del reactivo desconocido.

I.2.- CORRECCIÓN DE LA DOSIS PROPORCIONADA POR LA FUENTE DE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, POR DECAIMIENTO RADIATIVO.

La fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, propiedad del Instituto de Ciencias Nucleares, en préstamo al Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM, tenía una tasa de dosis (\dot{D}_0) en diciembre del 2002, a una distancia de 1.6 cm*, de 11.5 ± 0.3 (mGy/min) {Ro 03}. Para determinar la tasa de dosis hoy día, debe de tomarse en cuenta el factor de corrección $f_c = e^{-\lambda t}$, y ya que han transcurrido 27 meses, (de diciembre del 2002 a marzo del 2005 que es la fecha cuando se determinó la tasa de dosis con Solución Fricke), se tiene que:

$$f_c = e^{-[2.01 \times 10^{-3} (1/\text{meses}) \times 27 (\text{meses})]} = 0.947 \quad (\text{ec. I.3})$$

donde $\lambda = \ln(2)/T_{1/2} = 2.01 \times 10^{-3}$ (meses⁻¹) es la constante de decaimiento radiactivo y $T_{1/2} = 345.48$ (meses) es la vida media de la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. Multiplicando la ecuación I.3 por (\dot{D}_0), la tasa de dosis en marzo del 2005 es:

$$\dot{D}(\text{marzo } 2005) = \dot{D}_0 \times f_c = (11.5 \pm 0.3)(0.947) = 10.9 \pm 0.3 \text{ mGy/min} \quad (\text{ec. I.4})$$

a una distancia de 1.6 cm en el irradiador (ver Apéndice I). El tiempo de irradiación de la Solución Fricke fue de 6.00 días = 8640 min, con lo cual se obtiene una dosis de:

$$D = (10.9 \pm 0.3 \text{ mGy/min})(8640 \text{ min}) = 94 \pm 3 \% \text{ Gy} \quad \text{a } 1.6 \text{ cm} \quad (\text{ec. I.5})$$

I.3.- DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Para el intervalo de dosis útil de la Solución Fricke (40 – 400 Gy), se decidió exponer la solución el tiempo necesario para recibir una dosis de cerca de 100 Gy, a la distancia (fuente-centro del tubo Eppendorf) de 1.6 cm, por lo que, consultando la tabla 2 (pág. 9) de {Ro 03}, se estimó un tiempo de irradiación de 6 días.

Debido a que se deseaba tener una irradiación en las mismas condiciones que aquellas con que se irradian las células, se colocaron 100 µl de Solución Fricke, dentro del tubo que se emplea para poner las muestras biológicas por irradiar (tubo Eppendorf), y éste a su vez se colocó dentro

* La distancia de 1.6 cm se refiere al espacio que existe entre la fuente radiactiva y el centro geométrico de los tubos Eppendorf, para un mayor detalle se puede consultar el apéndice I de esta tesis.

del irradiador a la distancia predicha de la fuente radiactiva (1.6 cm), además, se accionó el motor (ver apéndice I), que hace girar al tubo Eppendorf para que la exposición fuera lo más homogénea posible. Durante la exposición, el irradiador se guardó en el mismo horno en el que las células se irradian, para tener una mejor aproximación y seguridad de las condiciones de irradiación de las células, pero sin que éste estuviera funcionando.

El procedimiento para determinar la dosis de radiación que reciben las células es muy sencillo, ya que la Solución Fricke (agua en su mayoría) asemeja considerablemente al medio de cultivo en donde dichas células se encuentran para su subsistencia y sólo habría que determinar el cambio en la absorción (ΔA) de la Solución Fricke después de irradiar, con respecto a otra muestra de Solución Fricke sin irradiar, llamada “muestra blanco” o “referencia” en el espectrofotómetro. Las condiciones de irradiación se listan a continuación:

$$\rho = 1.024 \text{ kg/L} \quad (\text{para la Solución Fricke estándar a } 25^\circ\text{C}) \{ \text{At } 86 \}$$

$$\epsilon = 2184 \text{ L/mol}\cdot\text{cm} \quad (\text{a } 304 \text{ nm y } 25^\circ\text{C}) \{ \text{At } 86 \}$$

$$d = 1.0 \text{ cm}$$

$$G(\text{Fe}^{3+}) = 15.40 \pm 0.04 \text{ ionizaciones/ } 100 \text{ eV} \{ \text{Pe } 60 \}$$

$$= 1.597 \pm 0.004 \times 10^{-6} \text{ mol/J} \{ \text{Vu } 86 \}$$

I.4.- RESULTADOS

Después de los 6 días de irradiación transcurridos, la lectura en el espectrofotómetro del cambio de absorción de la Solución Fricke a una longitud de onda $\lambda = 304 \text{ nm}$, fue de:

$$\Delta A = 0.331 \pm 2\% \quad (\text{ec. I.6})$$

Recordando la ec. I.2 y sustituyendo los valores e incertidumbres anteriormente dados, tendremos el valor de dosis en agua proporcionada por la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (durante 6 días):

$$D = (280 \pm 1)(0.331 \pm 2\%) = 92.68 \pm 2\% \text{ Gy} = 93 \pm 2\% \text{ Gy}. \quad (\text{ec. I.7})$$

Esto es:

$$D (\text{marzo del } 2005) = 93 \pm 2\% \text{ Gy} \quad \text{para } 6 \text{ días} \quad (\text{ec. I.8})$$

Tomando en cuenta el tiempo de irradiación (6 días = 8640 min), se obtiene que la tasa de dosis en marzo del 2005 es:

$$\dot{D} (\text{marzo } 2005) = 10.8 \pm 2\% \text{ mGy} / \text{min} \quad (\text{ec. I.9})$$

I.5.- COMENTARIOS ACERCA DE LOS RESULTADOS

Considerando el valor corregido (ec. I.4) por decaimiento radiactivo de la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, para la tasa de dosis en agua:

$$\dot{D}(\text{marzo } 2005) = 10.9 \pm 3\% \text{ mGy/min} \quad (\text{ec. I.4})$$

y al compararlo con la tasa de dosis en agua determinada con Solución Fricke (ec. I.9), podemos observar que ambos valores son consistentes.

Las ventajas que se tomaron en cuenta para emplear Solución Fricke para determinar la dosis proporcionada por el irradiador, fueron principalmente las siguientes:

1.- La Solución Fricke es un dosímetro primario o absoluto, que se usa para la calibración de dosis absorbida en un campo de radiación; así como para la calibración de otros dosímetros secundarios, por ejemplo, aquellos empleados anteriormente (PTR: películas de tinte radiocrómico y DTL: dosímetros termoluminiscentes).

2.- La semejanza de la Solución Fricke con el medio de cultivo en la que las células se colocan a irradiar dentro de los tubos Eppendorf, está relacionada con la densidad, ya que para la Solución Fricke $\rho = 1.024 \text{ g/cm}^3$, mientras que para el medio de cultivo $\rho \approx 1 \text{ g/cm}^3$ (ambas son principalmente agua). Además al ser semejantes ambas sustancias, no hubo ningún problema al colocarla dentro del tubo Eppendorf, contrario a los problemas (corregidos), que se tuvieron con los anteriores dosímetros {Bu 05} y {Ro 03}.

3.- La precisión que se reporta cuando se usa la Solución Fricke es entre el 1 y el 2 %, que es mucho mejor que la que se consigue al usar los otros dosímetros. Los resultados obtenidos experimentalmente son estadísticamente consistentes con aquellos determinados con PTR en {Ro 03}.

I.6.- CONCLUSIONES

Se determinó la dosis en agua y tasa de dosis impartida a células expuestas a un campo de radiación proveniente de una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ comprobando además, que el valor obtenido es consistente con el previsto (ec. I.4) usando los datos del trabajo {Ro 03}.

II.- DETERMINACIÓN, CON SOLUCIÓN FRICKE, DE LA DOSIS IMPARTIDA POR UNA FUENTE DE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ COMO FUNCIÓN DEL ESPESOR DEL BLANCO

La caracterización, de manera absoluta, de la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ perteneciente al Instituto de Física, UNAM, está relacionada con el objetivo fundamental de esta tesis debido a que ésta se usó para calibrar la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ del irradiador mencionado en la sección I de este trabajo.

La fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ del IFUNAM, para la geometría de irradiación (mostrada en la Figura II.1), fue calibrada en febrero de 1994, utilizando para ello dosímetros TL caracterizados e irradiados previamente en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), con una fuente de ^{60}Co calibrada y comparando su respuesta para dosis conocidas (de ^{60}Co), con las correspondientes, a tiempos conocidos, de exposición en la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. Por ello, la dosis que se asigna a la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, no es dosis de partículas β^- correspondientes a la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, sino dosis de radiación gamma correspondiente a la fuente de ^{60}Co que se usó para calibrar. Dicha calibración se ha usado desde principios de 1994 hasta principios de 2005, corrigiendo cada vez por el decaimiento radiactivo debido al tiempo transcurrido entre la calibración y el uso. El valor de la tasa de dosis determinado como se explicó anteriormente (sección I.2), en febrero de 1994 fue de: $0.427 \text{ rad/s} = 15.37 \text{ Gy/h}$. Corrigiendo por el decaimiento radiactivo, (ec. I.3, pero con 135 meses en lugar de 27), tendremos que la tasa de dosis actual (mayo del 2005) es de:

$$\dot{D}_r(\text{mayo del 2005}) = 0.326 \text{ rad/s} = 11.73 \text{ Gy/h.} \quad (\text{ec. II.1})$$

Como ya se explicó, determinar la tasa de dosis en agua, para cierto espesor de Solución Fricke, permitirá conocer la dosis en agua (ó tasa de dosis) de esta fuente a diferentes espesores del blanco, es decir, del detector acuoso, para el intervalo estudiado, lo que permitiría trabajar con dosímetros de dimensiones distintas a los comúnmente usados en el Laboratorio de Dosimetría. La razón por la que se hace a distintos espesores, es porque las fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ emite partículas β^- , cuya interacción con la materia es principalmente coulombiana y tienen un alcance determinado, para las partículas de mayor energía que son emitidas por la fuente. La forma en que la dosis es depositada por los electrones en la materia en función de la profundidad se muestra en la Figura III. 1.

II.1.- DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

La fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ estudiada en esta sección, se encuentra ubicada en el Laboratorio de Dosimetría, IFUNAM, tiene por blindaje un cilindro con paredes de aluminio, en cuyo interior se encuentra la fuente radiactiva. El cilindro se acopla a un soporte circular de lucita el cual a su vez sirve de base a otro cilindro de aluminio que tiene una zona plana circular en la parte superior, sobre la que se coloca el material por irradiar, generalmente dosímetros termoluminiscentes (DTL) de LiF (Figura II.1). Para determinar la dosis en agua, respecto de cierto espesor del blanco, de las partículas β^- emitidas por la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, se adaptó un contenedor de plástico, con dimensiones muy similares (tanto internas como externas) al soporte de aluminio original. En este contenedor de plástico se depositaría la Solución Fricke por irradiar.

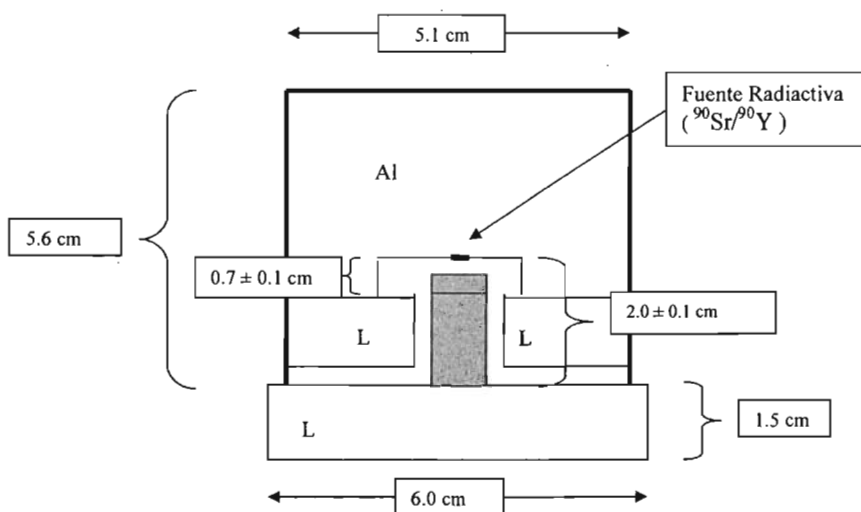


Figura II.1. Se muestran las dimensiones externas del blindaje de aluminio para la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, así como la distancia desde la fuente a la superficie interna del recipiente de aluminio (0.7 ± 0.1 cm), representado por el cilindro sombreado con un diámetro exterior de 1.0 cm, en donde se colocan los dosímetros termoluminiscentes, los cuales tienen una altura promedio de 0.9 mm {Ro 97}. La distancia de la fuente a la base de lucita es de 2.0 ± 0.1 cm. (Simbología: Al: Aluminio; L: Lucita).

Dado que se desea medir la tasa de dosis para distintos espesores del dosímetro acuoso, el volumen de la Solución Fricke tiene que cambiar, pero la distancia fuente – superficie, permanecer constante. Por ello, el recipiente alterno debe de incrementar su altura cuando el volumen de la

Solución Fricke sea menor. Esto se logró simplemente colocando cuadritos de cartulina entre la base del soporte y la mesa de irradiación, hasta alcanzar la altura necesaria (Figura II.2).

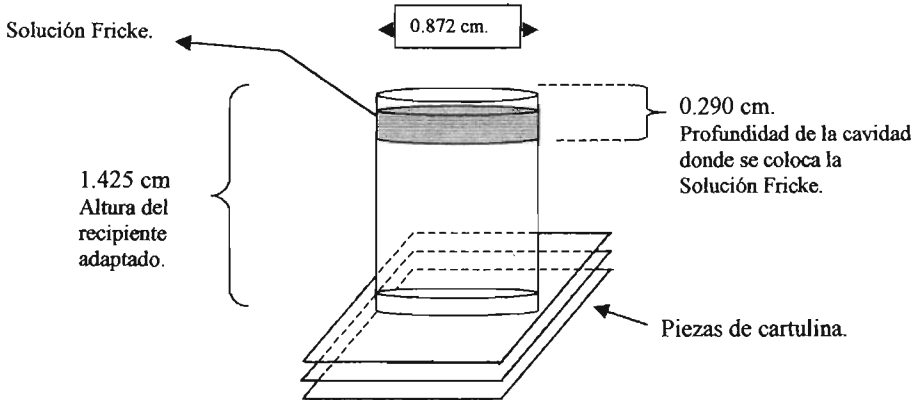


Figura II.2. Se muestran las dimensiones del recipiente de plástico que se adaptó para simular al soporte original de aluminio. La altura mostrada corresponde al volumen máximo irradiado (170 μ l); para volúmenes menores hay que elevar más aún al recipiente con cuadritos de cartulina, para mantener la distancia fuente – superficie como constante.

El volumen máximo de Solución Fricke depositado en el recipiente adaptado fue de 170 μ l, (2.85 mm de espesor) y el mínimo de 100 μ l, determinado por la capacidad mínima de lectura del espectrofotómetro. Dentro de este intervalo se lograron conseguir 2 medidas intermedias (120 μ l y 140 μ l). La dosis promedio que se impartió a los distintos volúmenes de Solución Fricke fue de alrededor de 100 Gy, ya que se consideró el intervalo de operación de la Solución Fricke (entre 40 y 400 Gy), por lo que, tomando en cuenta la tasa de dosis \dot{D}_r , como 11.73 Gy / h (ec. II.1), los intervalos de tiempo de exposición fueron de 6 h a 14 h. Estos datos se observarán con más detalle en la Tabla II.1.

II.2.- RESULTADOS

El espesor de la Solución Fricke irradiada viene dado por la siguiente relación:

$$h = \frac{Volumen}{\pi r^2} = \frac{Volumen}{0.597cm^2} \quad (\text{ec. II.2})$$

donde $r = 0.436 \text{ cm} \pm 0.001$ es el radio interno de la base circular del recipiente adaptado y “h” el espesor de la Solución Fricke para el “Volumen” irradiado. A continuación se muestran los espesores respectivos para cada volumen, así como los valores de la dosis y tasa de dosis obtenidos de las irradiaciones para 4 distintos volúmenes de Solución Fricke, durante la semana del 4 al 9 de mayo del 2005:

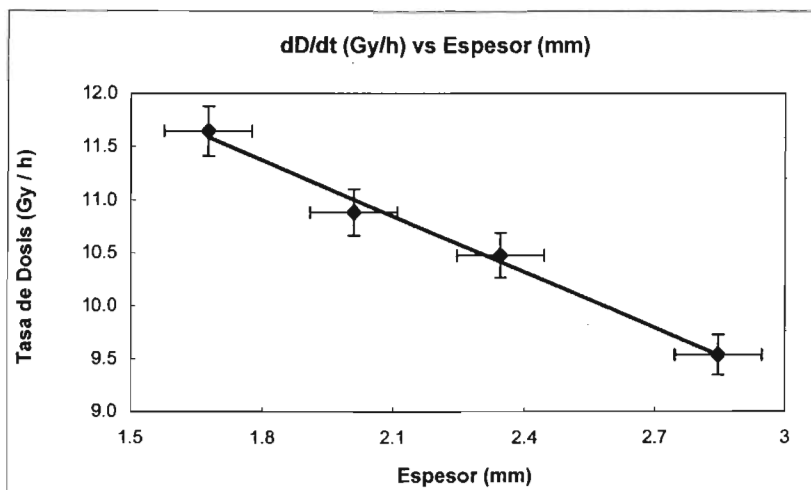
Volumen de la Solución Fricke ($\pm 10 \mu\text{l}$)	Espesor (± 0.02) (mm)	Δt (± 2) (minutos)	ΔA (± 0.002) (medido en el espectrofotómetro)	Dosis en agua ($\pm 2 \%$) (Gy)	dD/dt Tasa de Dosis ($\pm 2 \%$) (Gy/h)
170	2.85	835	0.474	133	9.5
140	2.35	840	0.524	147	10.5
120	2.01	355	0.230	64	10.9
100	1.68	825	0.572	160	11.6

Tabla II.1: Se muestran los volúmenes y espesores de Solución Fricke que fueron irradiados, así como el tiempo (en minutos) transcurrido en la irradiación. Se presenta la diferencia en la absorción medida con el espectrofotómetro del PIB cuya celda mide 1 cm de camino óptico. Finalmente también se muestra la dosis impartida, determinada mediante la fórmula: $D = 280 \cdot \Delta A$ (ec.I.2), así como la tasa de dosis en unidades de Gy/h.

La dependencia entre el espesor irradiado y la tasa de dosis es aproximadamente del tipo lineal (por lo menos, dentro del intervalo estudiado), y podemos ajustar, por el método de mínimos cuadrados, una línea recta a estos valores, la cual se muestra en la Gráfica II.1. Se empleó el programa Excel, Microsoft Office 2000, para la determinación de la ecuación de la recta ajustada por el método de mínimos cuadrados:

$$\dot{D} \text{ (Gy/h)} = -1.7494 \times \text{Espesor (mm)} + 14.54 \text{ (Gy/h)} \quad (\text{ec. II.3})$$

La relación es aproximada linealmente sólo para la región de 1.68 mm a 2.85 mm (100 μl a 170 μl). Para espesores mayores o inferiores, no necesariamente se tendría una dependencia de este tipo.



Grafica II.1: Valores (mostrados en la Tabla II.1) de la tasa de dosis de la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ para distintos espesores de Solución Fricke (Mayo del 2005). Se ajustó una recta por el método de mínimos cuadrados.

II.3.- COMENTARIOS ACERCA DE LOS RESULTADOS

El espesor de Solución Fricke, equivalente al espesor de un cristal termoluminiscente (DTL, los cuales son los más frecuentemente usados en el Laboratorio de Dosimetría del IFUNAM) corresponde a 2.3 ± 0.2 mm (ver apéndice II). En este experimento se ha obtenido la dosis promedio para la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ usando Solución Fricke como dosímetro. Observando la gráfica II.1, para el espesor mencionado, se encuentra que tiene una tasa de dosis de:

$$\dot{D} = 10.48 \text{ Gy/h} \pm 2\% = 0.290 \text{ rad/s} \pm 2\%, \quad (\text{ec. II.4})$$

Con la calibración hecha anteriormente en el ININ, se proporcionaba a la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ un valor de dosis promedio, triangulado con la dosis a la entrada correspondiente a rayos gamma; sin embargo, debido al dosímetro empleado, cristal termoluminiscente (de LiF), el valor puede ser considerado como dosis promedio por rayos gamma, puesto que el grosor del cristal es de 0.9 mm {Ro 97}.

Comparando ambos resultados (las dosis promedio por rayos gamma y por partículas β), encontramos que la diferencia porcentual entre ambos valores es del 11 %. Aunque no se trata de

una diferencia tan grande, cabe aclarar que no era de esperarse que ambos valores fueran idénticos ya que se trata de radiaciones distintas, tanto por su naturaleza como por su forma de interaccionar con la materia.

II.4.- CONCLUSIONES

Se observa en la Gráfica II.1 (Tasa de Dosis vs Espesor), que la tasa de dosis (y por tanto, también la dosis en agua para un tiempo dado), disminuye al aumentar el espesor irradiado. Además, para el intervalo estudiado (de 1.68 mm a 2.85 mm, equivalente a un volumen de 100 μ l a 170 μ l), se muestra un comportamiento lineal entre el espesor y tasa de dosis.

Podemos concluir que la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ubicada en el Laboratorio de Dosimetría de la Radiación, IFUNAM, proporciona una tasa de dosis promedio en agua de $10.48 \pm 2 \%$ Gy / h (correspondiente a mayo del 2005) a dosímetros termoluminiscentes de LiF, de dimensiones: $3.2 \times 3.2 \times 0.9 \text{ mm}^3$, a la distancia normal de operación.

III.- DETERMINACIÓN DE LA DOSIS, COMO FUNCIÓN DEL ESPESOR, DE PELÍCULAS DE TINTE RADIOCRÓMICO, EXPUESTAS A UNA FUENTE DE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

La determinación de la dosis promedio, como función del espesor del detector acuoso, impartida por una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, para la geometría de irradiación (mostrada en la Figura II.1), se realizó anteriormente con Solución Fricke (sección II), obteniéndose, entre otros resultados, que la dosis disminuye conforme el espesor de la Solución Fricke aumenta y, por lo menos dentro del intervalo en el que se evaluó la dosis (1.68 mm a 2.85 mm), la variación es lineal.

Curvas de Dosis a profundidad por electrones.

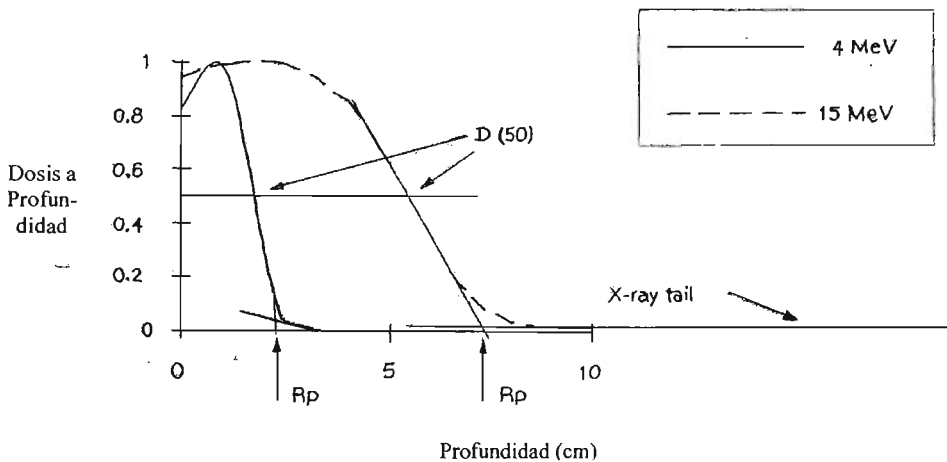


Figura III.1: Curva de dosis, en función de la profundidad en el blanco, para electrones de 4 y 15 MeV, que inciden en un medio {St 96}.

El volumen mínimo de Solución Fricke empleado, 100 μl , (limitado por la capacidad de las celdas del espectrofotómetro y por el control y manejo complicado de la cantidad de Solución Fricke), corresponde a un espesor de 1.68 mm, (Tabla II.1). Para espesores menores que ese límite, no se tiene conocimiento del valor de la dosis entregada en agua por la fuente radiactiva, la cual debe ser semejante a la forma mostrada en la Figura III.1. Es por ello que se decidió determinar la

dosis promedio entregada en agua, empleando ahora como dosímetros a las películas de tinte radiocrómico (PTR), las cuales se caracterizan por presentar una coloración directa como resultado de la absorción de radiación ionizante.

III.1.- RESPUESTA ÓPTICA DE LAS PTR

Las PTR empleadas en este experimento son películas GafChromic XR tipo T. Éstas tienen un límite superior de dosis de exposición de 10 Gy (determinado con un densitómetro radiocrómico modelo 37 – 443 {Bu 03}), y la respuesta es casi lineal con la dosis. Este límite superior puede ser extendido con el uso de un densitómetro con un ancho de banda más amplio o una longitud de onda distinta, que no se encuentre cerca del pico de absorción visible de este producto {Bu 03}. Se midió un grosor promedio de $235 \pm 6 \mu\text{m}$, el cual es equivalente a un espesor de 0.30 mm de Solución Fricke (bajo una misma área transversal de 59.7 mm^2 , ver el apéndice II).

El incremento de la coloración de las películas se puede determinar por dos métodos y su respuesta óptica se define según cuál se elija: el primer método consiste en utilizar un espectrofotómetro para medir la densidad óptica de las películas antes (DO_i , inicial) y después de ser irradiadas (DO_f , final). La respuesta óptica de las PTR se define como la diferencia entre estas dos cantidades:

$$R = | DO_f - DO_i | \quad (\text{ec. III.1})$$

El segundo método consiste en obtener imágenes digitalizadas de las películas, empleando un escáner, y entonces medir la intensidad de color de las imágenes adquiridas de películas no irradiadas (I_0) e irradiadas (I). La respuesta óptica es el logaritmo base 10, del cociente entre estas dos cantidades:

$$R^* = \log_{10} (I_0 / I) \quad (\text{ec. III.2})$$

Este método permite tener una amplia resolución espacial. Se pueden analizar pequeñas áreas de las imágenes digitalizadas para obtener un promedio de la dosis absorbida en una región determinada, lo que permite obtener una distribución espacial de la dosis absorbida.

La relación entre la dosis absorbida de una fuente calibrada y la respuesta de las películas puede ser determinada y graficada como una curva, conocida como curva de calibración, la cual proporciona la información necesaria para determinar la dosis absorbida en función de la respuesta de las películas {AA 98}.

III.2.- DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

En este experimento complementario a la evaluación de la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (sección II), se mantuvieron las mismas condiciones de irradiación que las usadas para la calibración de ésta, con Solución Fricke. La geometría de irradiación empleada se puede observar en la Figura II.1.

Para determinar la dosis promedio, como función del espesor del dosímetro plástico, de las partículas β^- emitidas por la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, usando PTR, se empleó el mismo contenedor de plástico que se utilizó con Solución Fricke (Figura II.2). En este contenedor de plástico se colocaron las PTR, recortadas circularmente, a un área igual a la del interior del soporte, de tal manera que su volumen simulara 100 μl de Solución Fricke. Dado que una PTR tiene un grosor promedio de $235 \pm 6 \mu\text{m}$, y densidad de 1.3 g/cm^3 , una PTR es equivalente a 0.3 mm de espesor de Solución Fricke (ver apéndice II), por lo que se necesitan 6 películas para asemejar un espesor de 1.7 mm (aproximadamente) de Solución Fricke. Además, se recortó una película extra, que no se irradió, a la cual llamaremos “control” y será empleada en el momento de medir la respuesta en el escáner. Se realizaron dos formas de irradiación:

- a) En una, las 6 películas se colocaron en columna dentro del recipiente durante 30 min para que se recibiera una dosis promedio aproximada de 6 Gy (tomando en cuenta la tasa de dosis como de 11.65 Gy / h, determinada previamente para 100 μl de Solución Fricke). De esta manera se tendría que las películas superiores recibirían una dosis mayor que las inferiores, ya que los electrones (y partículas β^-) depositan su energía, en un material dado, en forma semejante a la descrita en la Figura III.1. Nótese que, a menor energía, el pico se hace más pronunciado, para un haz monoenergético.
- b) En la otra forma de irradiación, cada cinco minutos la película que se encontraba en la parte inferior de la columna era colocada ahora en la parte superior, es decir, se hacía una rotación de las películas, tratando de que todas las películas recibieran la misma dosis (en promedio, 6 Gy).

La respuesta de las películas se analizó con ayuda de un escáner y una computadora, en donde se digitalizaron las películas (para 3 colores: azul, verde y rojo), incluyendo la película

control (sin irradiar), para obtener los tonos de color. Se tomaron los valores de la lectura en rojo, ya que presenta con más claridad los resultados.

III.3.- RESULTADOS

A continuación se muestran los valores de la respuesta de las películas, los cuales se determinaron usando un escáner de reflexión Microtek ScanMaker E3, con el que se obtuvieron imágenes digitalizadas de las PTR. El programa de adquisición de imágenes empleado fue Paint Shop Pro versión 4.1 (Psi y Pi, determinan la intensidad de color de la película sin irradiar e irradiada respectivamente).

No. de Película	Grosor ($\pm 5 \times 10^{-5}$) (mm.)	Tono de color rojo (± 2)	Espesor ($\pm 1 \times 10^{-4}$) (mm)	Respuesta: Log(Psi/Pi) ($\pm 6 \times 10^{-3}$)
1	0.2334	155	0.1175	0.121
2	0.2440	155	0.3525	0.121
3	0.2326	154	0.5875	0.124
4	0.2346	154	0.8225	0.124
5	0.2388	154	1.0575	0.124
6	0.2284	155	1.2925	0.121

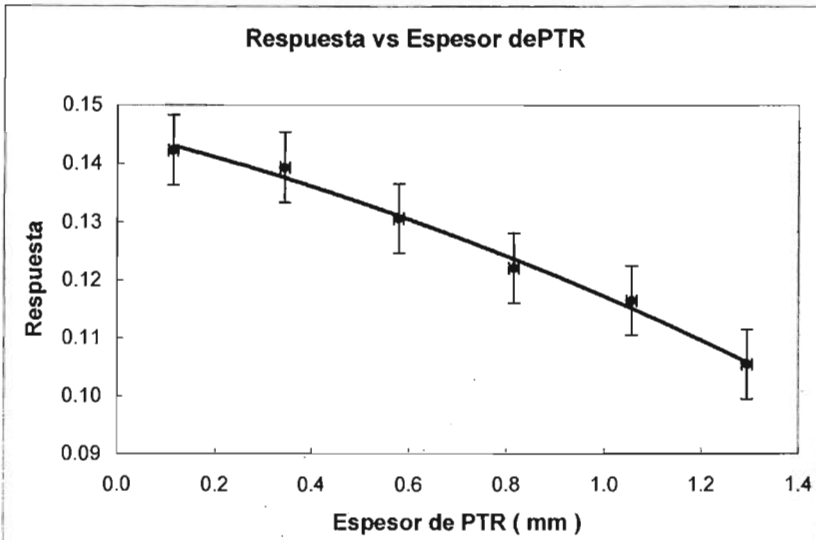
Tabla III. 1: Datos de las PTR, en que la película superior se movía al inferior de la pila de PTR cada 5 minutos, de tal forma que cada película recibiera una dosis promedio aproximada de 6 Gy, al cabo de 30 min de irradiación. El tono de color de la película sin irradiar es de 205, analizado con rojo.

No. de Película	Grosor ($\pm 5 \times 10^{-5}$) (mm)	Tono de color rojo (± 2)	Espesor ($\pm 1 \times 10^{-4}$) (mm)	Respuesta: Log(Psi/Pi) ($\pm 6 \times 10^{-3}$)
1	0.2250	147	0.1125	0.142
2	0.2342	148	0.3421	0.139
3	0.2376	151	0.5780	0.131
4	0.2376	154	0.8156	0.122
5	0.2412	156	1.0550	0.117
6	0.2356	160	1.2934	0.106

Tabla III. 2: Se muestran los datos del grosor, valor promedio de coloración (determinado por el escáner), así como el espesor asignado a cada película dependiendo de su posición, y la Respuesta, según la ec. III.2. Se analizó en rojo. El tono de color rojo de la película sin irradiar es de 204.

El espesor se considera como la distancia desde la superficie de la PTR superior hasta la parte sensible de la película en cuestión, esto es, hasta su centro geométrico axial, porque la parte

sensible de la PTR se encuentra precisamente a la mitad {Bu 03}. A continuación, se muestra una gráfica de Respuesta vs Espesor para los datos de la Tabla III.2:



Gráfica III. 1: Respuesta vs Espesor de PTR. Empleando el programa de Excel, Microsoft Office 2000, se ajustó un polinomio de segundo grado cuya ecuación se muestra a continuación:

$$Respuesta = -0.008 (espesor)^2 - 0.020 (espesor) + 0.145 \quad (\text{ec. III.3})$$

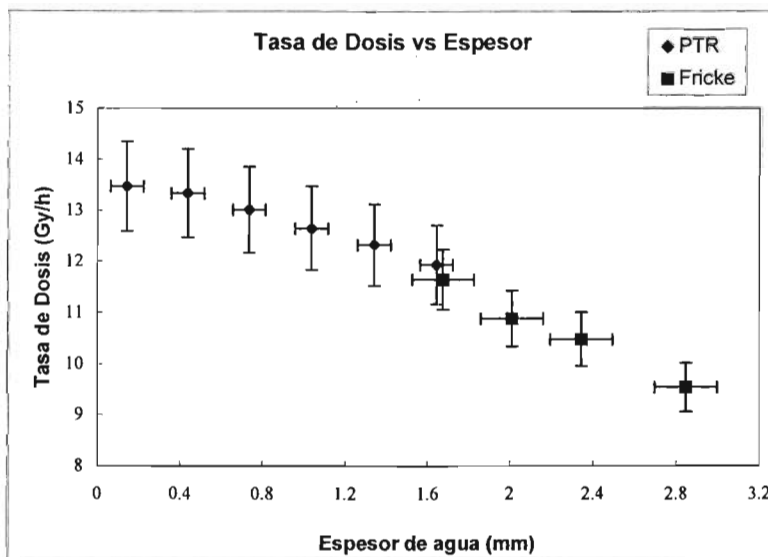
III.4.- COMENTARIOS ACERCA DE LOS RESULTADOS

Las respuestas de las PTR, en rojo, mostradas en la última columna de la Tabla III.1 tienen un valor promedio de $0.123 \pm 6 \times 10^{-3}$ y se puede decir que es consistente con el promedio de los valores similares de las películas que no fueron rotadas durante la irradiación (Tabla III.2), las cuales tienen una respuesta promedio, en rojo, de $0.126 \pm 6 \times 10^{-3}$.

El espesor asignado a las 6 PTR irradiadas, es de $1.2934 \pm 1 \times 10^{-4}$ mm, el cual es equivalente a un espesor de 1.64 mm de Solución Fricke, y consultando el resultado ec. II.3, el cual nos proporciona la tasa de dosis en función del espesor irradiado de Solución Fricke, tendremos que la

tasa de dosis correspondiente a dicho espesor es de 11.7 ± 0.2 Gy/h. Y considerando los 30 min de irradiación de las PTR, se asocian 5.8 Gy de dosis promedio al valor de respuesta promedio: $0.123 \pm 6 \times 10^{-3}$, de las 6 películas que se rotaron durante la irradiación. Con esta información, se puede asignar a cada valor de respuesta promedio de la Tabla III.1 una tasa de dosis (o dosis promedio, considerando un tiempo de irradiación de 30 min) de una manera lineal, tomando en cuenta que la respuesta promedio para cada espesor (de PTR), es el promedio de la respuesta de las películas apiladas que determinan ese espesor.

Anexando los valores obtenidos de esta manera a aquellos de la Gráfica II.1, anteriormente determinados con Solución Fricke, se observa que los resultados de la tasa de dosis en las unidades correspondientes (Gy / h) entre ambos dosímetros (Solución Fricke y PTR), se empatan en el valor cercano a 1.68 mm (equivalente a 100 μ l de Solución Fricke), ver Gráfica III.2.



Gráfica III. 2: Tasa de dosis (Gy/h) vs Espesor de agua (mm). Para determinar la tasa de dosis recibida, se emplearon como dosímetros a la Solución Fricke ($> 100 \mu$ l ~ 1.68 mm de espesor de agua) (cuyos datos se presentaron en la sección II) y PTR ($< 100 \mu$ l). El espesor se refiere un material de densidad equivalente a la del agua (1 g/cm^3).

III.5.- CONCLUSIONES

En ambas formas de irradiación (películas sin rotación y películas rotadas) se obtuvieron valores consistentes, con respecto al promedio de los valores de respuesta.

Se pudo comprobar que el empleo de las PTR permite determinar la tasa de dosis promedio, en agua, impartida por la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, como función del espesor de la muestra, para espesores menores que el límite (100 μl) establecido por las características del espectrofotómetro que se usa para medir el cambio en la densidad óptica de la Solución Fricke. Además, el comportamiento de la Gráfica III.2, asemeja a la curva mostrada en la Figura III.1, que nos indica la forma como los electrones de una fuente emisora de partículas β^- compuesta por dos decaimientos, depositan su energía en la materia: disminuyendo la tasa de dosis conforme el espesor aumenta, pero alrededor de cierto espesor (dependiendo de la energía de los electrones), se presenta un codo esto es, un punto máximo, indicando la región de mayor tasa de dosis (o dosis) impartida.

IV.- DETERMINACIÓN DE LA DOSIS IMPARTIDA, EMPLEANDO CÁMARA DE IONIZACIÓN, A CÉLULAS EXPUESTAS A UN CAMPO DE RADIACIÓN DE UN TUBO DE RAYOS X.

Dentro de este mismo trabajo se ha determinado (con Solución Fricke) la dosis en agua impartida a células expuestas a un irradiador de partículas β^- , emitidas por una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. Los experimentos que se realizan en el Laboratorio de Genómica y Toxicología Ambiental del IIB, requieren irradiar células, a bajas dosis (0.02, 0.04, 0.08 y 0.12 Gy), para estudiar los efectos que la radiación ionizante tiene sobre éstas.

En esta última parte, se midió la dosis impartida a células por un tubo de rayos x, y con ello se pretende dar elementos para saber si los efectos que la radiación pudiera tener sobre las células expuestas, son independientes o no del tipo de radiación ionizante a la cual se exponen:

IV.1.- CÁMARA DE IONIZACIÓN

La cámara de ionización (CI) es el dosímetro más ampliamente usado para hacer mediciones precisas de dosis impartida por un tubo de rayos x, como las requeridas en medicina. Existe gran variedad de diseños para distintas aplicaciones y adaptadas para las necesidades requeridas: las llamadas de aire libre son dosímetros absolutos, y aquéllas llamadas de cavidad son dosímetros secundarios y requieren una calibración radiológica.

Una CI de cavidad tiene como base el funcionamiento de una cámara de aire libre (como la mostrada en la Figura IV. 1). Consiste principalmente en que un haz de rayos x originados en un punto focal S, colimado por el diafragma D y que pasa centralmente entre un par de placas paralelas ioniza al aire del interior de la cámara. Al aplicarse alto voltaje (del orden de 100 V/cm) entre las placas, se colectan los iones producidos en el aire que se encuentre entre dichas placas. La ionización es medida para una longitud L (y por tanto también para un volumen) definida por las líneas limitantes de fuerza a orillas de la placa colectora C. Las cargas positivas y negativas se

mueven hacia las placas negativa y positiva respectivamente, produciendo una corriente. La carga colectada de cualquier signo puede ser medida por un electrómetro y de ahí, determinar la ionización producida {Kh 03}.

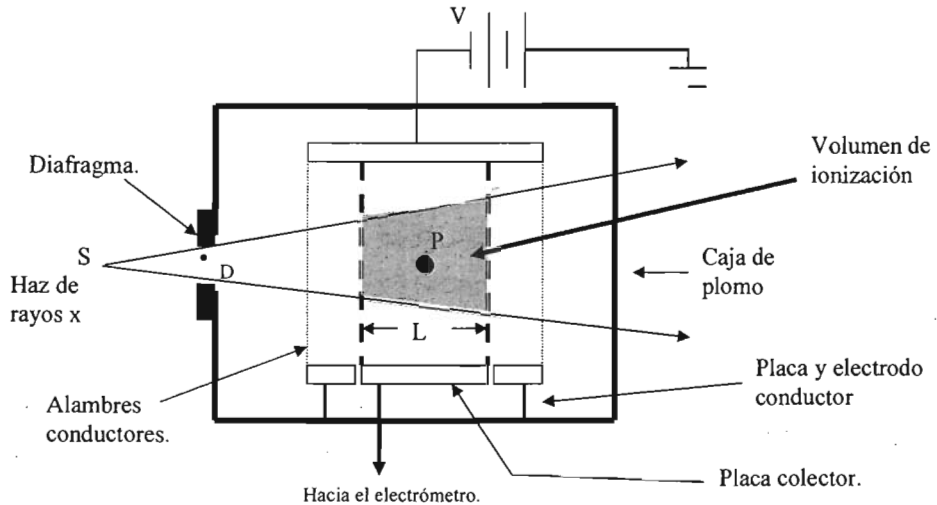


Figura IV.1: Diagrama esquemático de una cámara de ionización de aire libre.

IV.1.1.- Calibración de un haz de rayos x en términos del kerma de colisión en espacio libre o dosis absorbida

Para rayos x de 300 kV o menores, y considerando condiciones de Equilibrio de Partícula Cargada, la relación entre Dosis absorbida para agua (expresada en rad) en el espacio libre y Exposición (expresada en Roentgen) viene dada por la siguiente ecuación {At 86}:

$$D_{\text{agua}}^{EPC} = 0.876 X \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{aire}}^{\text{agua}} \quad (\text{ec. IV.1})$$

IV.2.- DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El día jueves 19 de mayo del 2005 se llevaron a cabo mediciones de exposición, producida por un tubo de rayos x (Philips Diagnost 15 (mesa), # I090000182007 NBV08087) propiedad del INCan, ubicado en la sala # 3 de dicho Instituto, con una cámara de ionización (CI) (RadCal Mod: 20X6 – 6 y No. de inventario UNAM: 2072361; No. de referencia: I4471). La irradiación se produjo bajo las siguientes condiciones:

Campo (cm x cm)	10 x 10
Distancia foco-mesa	97.0 cm \pm 0.2 cm
Distancia centro de CI – mesa	1.8 cm \pm 0.05 cm
Voltaje de operación del tubo de r – x (kVp)	120 kV

Tabla IV.1: Condiciones de irradiación por el tubo de rayos x ubicado en el INCan.

Se realizaron 7 mediciones de la exposición, para distintos valores de mAs, bajo un mismo voltaje de operación, de 120 kVp.

IV.3.- RESULTADOS

Considerando un voltaje de operación de 120 kVp, se encontró una energía promedio del haz de fotones, de 54 keV, la cual fue calculada con el programa XCOMP3 v 3.3 (gracias a la colaboración de la Dra. Isabel Gamboa de Buen, del Instituto de Ciencias Nucleares), bajo las condiciones siguientes:

- Blanco del tubo de rayos x: Tungsteno (Z = 74)
- Distancia foco-cámara de ionización: 95 cm.
- Voltaje de operación: 120 kVp.
- Grosor y material del filtro: 2.5 mm de Aluminio (Z = 13).

y consultando el apéndice D.3 de {At 86}; que permite asociar un valor del coeficiente másico de absorción de energía, a una energía dada, en este caso, para 54 keV, se obtuvo:

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{\text{agua}}^{54\text{keV}} = 0.0379 / 0.0366 = 1.0361 \quad (\text{ec. IV.2})$$

Otra forma de determinar la energía equivalente de un haz de rayos x es midiendo el valor de la capa hemirreductora (CHR). Se procede midiendo la exposición (X), con la CI de cavidad, conforme se van agregando placas de aluminio de distinto grosor entre el haz y la CI. Cuando el valor de X se reduce a la mitad de su valor sin interponer placa alguna, se dice que el grosor de aluminio constituye una CHR del haz de rayos x. El valor que se determinó experimentalmente[‡] fue de: 4.7 mm. Dado que la energía equivalente de los fotones está relacionada con el cociente $(\mu/\rho)_{\text{eq}}$, determinado por la siguiente relación {At 86, Cap.: 9, p.: 227}:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{eq}} = \frac{0.6931}{\rho \cdot \text{CHR}} \text{ cm}^2 / \text{g} \quad (\text{ec. IV.3})$$

se encuentra que $(\mu/\rho)_{\text{eq}} = 0.5462 \text{ cm}^2/\text{g}$. Consultando el apéndice D.3 de {At 86}, para asociar una energía equivalente de fotones al valor de $(\mu/\rho)_{\text{eq}}$ en aluminio, se tiene que:

$$E_{\text{eq}} = 42 \text{ keV} \quad (\text{ec. IV.4})$$

Este valor puede asociarse a valores de $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)$ en otros materiales como agua y aire, realizando el cociente del valor en agua entre el valor en aire:

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{\text{agua}}^{42\text{keV}} = 0.0655 / 0.0641 = 1.0145 \quad (\text{ec. IV.5})$$

Se observa que entre ambos resultados (ec. IV.2 y ec. IV.5), existe poco más del 2 % de diferencia (respecto al valor menor), y sustituyendo estos valores en la ec. IV.1, para calcular la dosis, (usando ambos métodos), se observa que los valores de dosis (en rads), mantienen esa misma diferencia, ya que simplemente se multiplican por valores constantes.

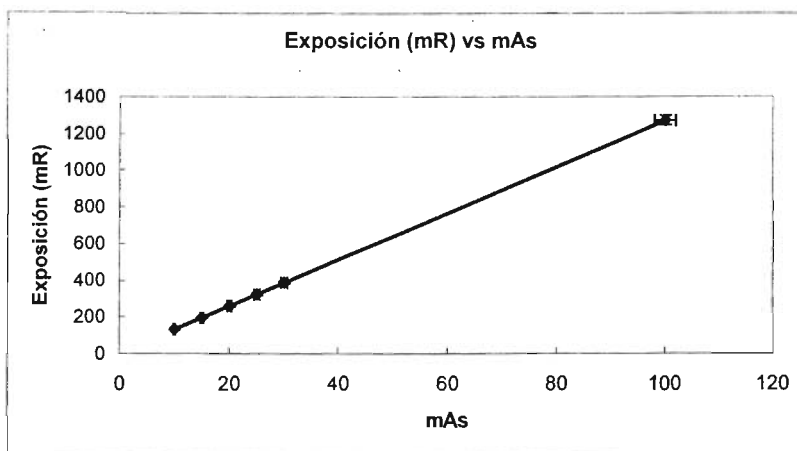
Los datos obtenidos, (para un voltaje de operación de 120 kVp considerando ec. IV.1, ec. IV.2 y ec. IV.5), fueron los siguientes:

[‡] La medición fue realizada por: Fabiola Valencia y Héctor Galván, alumnos de la Maestría en Física Médica de la UNAM.

mAs	Exposición (mR)	Tiempo de Exposición (ms)	Dosis en agua (rad) (XCOMP3)	Dosis en agua (rad) (CHR)	Tasa de dosis en agua (rad/min) (XCOMP3)	Tasa de dosis en agua (rad/min) (CHR)
10	133.1	24	0.121	0.118	302.01	295.72
15	196.9	36	0.179	0.175	297.85	291.64
20	259.9	48	0.236	0.231	294.86	288.72
25	324.1	60	0.294	0.288	294.16	288.03
30	387.5	72	0.352	0.344	293.09	286.98
100	1271	270	1.154	1.130	256.35	251.01

Tabla IV.2: Se muestran los datos de mAs, Exposición (mR), Tiempo de Exposición, valor de Dosis (calculada a partir de la ec. IV.1), y la Tasa de dosis, (empleando para los cálculos: XCOMP3, (ec. IV.2) y CHR (ec. IV.5).

Se observa que el cociente mAs / tiempo, el cual proporciona la corriente en el tubo de rayos x, adquiere un valor constante (0.42 Ampere) para un mAs entre 10 y 30. La gráfica de Exposición contra mAs, se muestra a continuación:



Gráfica IV.1: Exposición (mR) vs mAs.

En esta gráfica, se nota que la relación de Exposición y mAs es lineal. Ajustando una recta por el método de mínimos cuadrados (empleando el programa de Excel, Microsoft Office 2000), se obtiene la siguiente ecuación:

$$X \text{ (mR)} = 12.64 * (\text{mAs}) + 7.5 \quad (\text{ec. IV.6})$$

IV.4.- CONCLUSIONES

Se determinó la tasa de dosis para diferentes valores de mAs, usando 2 métodos para cuantificar el valor de la energía (promedio y equivalente), que permiten calcular la dosis que recibirían en esta ocasión, las células bajo estudio, al ser irradiadas en un tubo de rayos x, en las condiciones descritas anteriormente (Tabla IV.1).

Las dosis proporcionadas por el tubo de rayos x, para un voltaje de operación de 120 kVp, en las condiciones descritas en la Tabla IV.1, se encuentran por debajo del orden de aquellas de interés para el Laboratorio de Genómica y Toxicología Ambiental del Instituto de Investigaciones Biomédicas (2, 4, 8 y 12 rads). Por ejemplo, para 100 mAs (que representa el valor máximo de dosis promedio en agua impartida), se le adjudica una dosis promedio en agua de 1.14 rads.

La tasa de dosis en agua de la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ubicada en el IIB tenía un valor de: $1.1 \pm 2\%$ rads / min (ec. I.9), (resultado obtenido en la Sección I). Se observa que este valor es 2 órdenes de magnitud menor que los datos mostrados en la Tabla IV.2, pero también, los tiempos de irradiación del tubo de rayos x, son de 2 a 3 órdenes de magnitud menores que con la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, por lo que resulta una dosis impartida del mismo orden de magnitud en ambos casos, que es, efectivamente, lo que se desea.

La linealidad mostrada (Gráfica IV.1) entre Exposición y mAs se observó para valores dentro del intervalo de 10 mAs a 100 mAs.

Es de notar que, para este caso particular, al calcular la Dosis en agua (ec. IV.1), no existe diferencia considerable entre emplear la energía equivalente calculada midiendo la CHR ó la energía promedio, calculada mediante el programa XCOMP3 v 3.3, ya que a pesar de la diferencia

entre ambos valores, (30 % de diferencia), el cociente: $\left(\frac{\overline{\mu_{en}}}{\rho} \right)_{\text{aire}}^{\text{agua}}$ tiene sólo una variación del 2 %, respecto a emplear uno u otro método.

CONCLUSIONES GENERALES

Se determinó la tasa de dosis (y dosis en agua) entregada tanto por la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ del IIB como por un tubo de rayos x, para determinadas condiciones de irradiación, empleando como dosímetros Solución Fricke y cámara de ionización, respectivamente.

Al comparar los resultados de la tasa de dosis entregada por la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ del IIB, determinados con solución Fricke en este trabajo con aquellos reportados en {Ro 03}, se observa que ambos son consistentes y existe una diferencia porcentual entre ambos del 2 %.

Con el empleo de la Solución Fricke y del equipo de medición adecuado, se calibró por primera vez de manera absoluta la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ del Instituto de Física, UNAM, obteniéndose mediciones de la dosis en agua entregada a distintos espesores, abarcando un intervalo desde los 0.3 mm (con el empleo de las PTR) hasta 2.8 mm de agua. Esta calibración será de gran utilidad para futuras irradiaciones realizadas con dicha fuente.

REFERENCIAS:

- AA 98 AAPM Task Group 55, Radiation Therapy Committee, "Radiochromic film dosimetry", Med. Phys. **25** (1998).
- At 86 Attix, F.H., "Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry" John Wiley & Sons, Inc, 1986, New York.
- Bu 03 Butson, Martin J., Yu, Peter K. N., Tsang C., "Radiochromic Film for Medical Radiation Dosimetry" Materials Science and Engineering R **41**, 2003, pp.: 61 – 121.
- Bu 05 Buenfil Ana Elena, Iturbe Fernando, Mata Dorys, Brandan M. Ester "Reporte de los resultados de la evaluación del irradiador de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ubicado en el Laboratorio de Genómica y Toxicología Ambiental del Instituto de Investigaciones Biomédicas". Reporte interno FE036, Instituto de Física, UNAM, México, 2005.
- Fr 66 Fricke H., Hart E. J., "Chemical Dosimetry" in Radiation Dosimetry (H. Attix and W. G. Roech, eds), Academic, New York, **1**, 167. (1966).
- Kh 03 Khan, Faiz M. "The Physics of Radiation Therapy" Lippincott Williams and Wilkins, 2003, Philadelphia.
- Ma 04 Mata López D. "Susceptibilidad Genética a Dosis Bajas de Radiación Ionizante", Programa de Doctorado en Ciencias Biomédicas. Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM, México, 2004. Tutor: Dra. Patricia Ostrosky S.
- Pe 60 M. Peisach, J. Steyn, "Radiolytic Oxidation of Ferrous Solutions with Standardized Internal Sources of Phosphorus – 32", Nature, July 2, **187**, 58 – 59. (1960).

- Ro 97 M. Rodríguez-Villafuerte, I. Gamboa-deBuen and M.E. Brandan, "Monte Carlo Simulation of Depth – Dose Distributions in TLD-100 under $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ Irradiation", *Health Phys.* **72** (4), 574-578, (1997).
- Ro 03 Rodríguez Laguna Alejandro, "Diseño, construcción y caracterización dosimétrica de un Irradiador de baja dosis para muestras biológicas", tesis para obtener grado de Físico, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 2003. Director de Tesis: Fernando Iturbe Hermann.
- Sc 62 Scharf K. and Lee R.M., "Investigation of the Spectrophotometric Method of Measuring the Ferric Ion Yield in the Ferrous Sulphate Dosimeter"; *Rad. Res.*, **16**, 115, (1962).
- St 96 Stanton, R., Stinson, D., "Applied Physics for Radiation Oncology", Medical Physics Publishing, 1996, Madison Wisconsin.
- Vu 86 N. Vulpis and G. Scarpa, "Induction of chromosome aberrations by ^{90}Sr β -particles in cultured human lymphocytes", *Mutation Research*, **163**, 227-283, (1986).

APÉNDICE I

A continuación se muestra un diagrama de algunos componentes básicos del irradiador de partículas β^- empleado en la sección I de este trabajo.

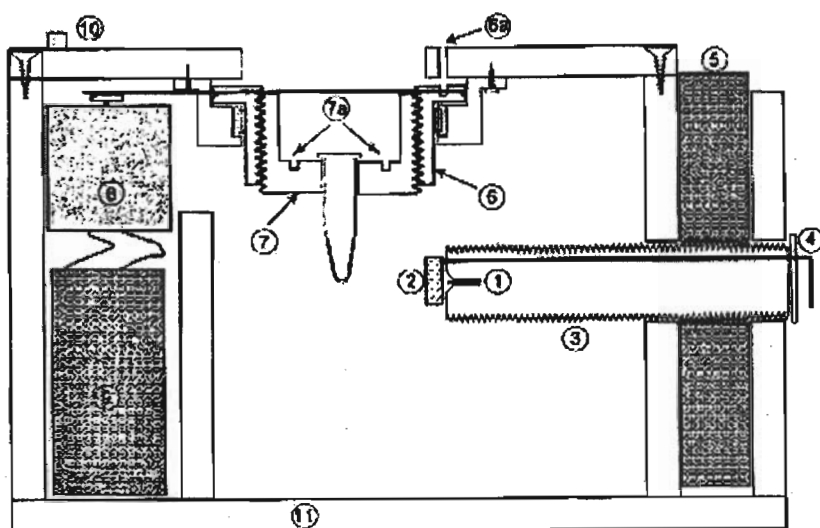


Figura I.1: Diagrama del irradiador visto lateralmente. A continuación se explican sus componentes:

1.- Fuente radiactiva de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$; 2.- Obturador, 3.- Tornillo donde se encuentra alojada la fuente radiactiva; 4.- Manija del obturador; 5.- Disco de nylon; 6.- Tuerca del porta muestra; 7.- Tornillo del porta muestra; 8.- Motor; 9.- Pilas; 10.- Interruptor; 11.- Paredes del irradiador; 12.- Tubo Eppendorf.

Imagen tomada de {Ro 03}.

La distancia de 1.6 cm corresponde a la distancia mostrada en la figura 1, la cual va desde el frente de la muestra radiactiva hasta el eje axial simétrico del tubo Eppendorf. La distancia es regulada con ayuda del tornillo (3).

APÉNDICE II

Si queremos conocer el grosor h_m de cierto material equivalente a la profundidad h_f de Solución Fricke, tomemos en cuenta que el número de electrones atómicos por cm^2 en el material de grosor h_m , será el mismo que una cantidad h_f , siempre y cuando cuenten con la misma área transversal {At 86}. Esto es:

$$h_m N_A \rho_m \left(\frac{Z}{A} \right)_m = h_f N_A \rho_f \left(\frac{Z}{A} \right)_f \quad (\text{ec. AII.1})$$

donde N_A es la constante de Avogadro y ρ_m, ρ_f la densidad del material y de la Solución Fricke respectivamente. Z es el número atómico y A es la masa atómica.

Si suponemos que la Solución Fricke y el material en cuestión (m) cuentan con las razones Z/A muy similares {At 86}, entonces, la ec. AII.1 queda como:

$$h_f = \frac{h_m \rho_m}{\rho_f} \quad (\text{ec. AII.2})$$

Considerando: $\rho_f = 1.024 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{DTL}} = 2.64 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{PTR}} = 1.3 \text{ g/cm}^3$, $h_{\text{DTL}} = 0.9 \text{ mm}$, y $h_{\text{PTR}} = 0.235 \pm 0.006 \text{ mm}$, como las densidades correspondientes a Solución Fricke (F), dosímetros termoluminiscentes (DTL) y películas de tinte radiocrómico (PTR) respectivamente, tendremos que la altura y el volumen de Solución Fricke, (en un cilindro con una base de área circular de 59.7 mm^2 , ya que cuenta con un diámetro de $8.72 \pm 0.01 \text{ mm}$), equivalente para cada material es:

Material	Altura (mm)	Volumen (μl)
DTL	2.3 ± 0.2	138.6 ± 0.3
PTR	0.30 ± 0.02	17.82 ± 0.03

Tabla AII.1: Valores equivalentes de la altura y volumen en Solución Fricke de DTL y PTR, con sus respectivas incertidumbres.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA