



Desarrollo y Aplicación del Sistema de Dosimetría Fricke para el Estudio de la Distribución por Mapeo de Dosis en un Irradiador Industrial Gamma (γ)

Nandy Sharlin Reyes Patton¹, Rocío Griselda Choque², Luis Fernando Cáceres Choque^{3,*}

¹Escuela Industrial Superior Pedro Domingo Murillo, Carrera de Química Industrial, La Paz, Bolivia; ²Laboratorio de Química Analítica y Ambiental, Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia; ³Dirección de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear, Agencia Boliviana de Energía Nuclear, La Paz, Bolivia

Keys: Fricke dosimetry, Gamma irradiation, Dose mapping, Chemical stability, Dose distribution;
Claves: Dosimetría Fricke, Irradiación gamma, Mapeo de dosis, Estabilidad química, Distribución de dosis.

ABSTRACT

Development and Application of the Fricke Dosimetry System for the Study of Dose Distribution by Mapping in an Industrial Gamma (γ) Irradiator. The **Fricke dosimetric system** was implemented and evaluated with the aim of determining dose distribution in industrial gamma irradiators. The study comprised four experimental stages: initial system evaluation, batch irradiation, identification of the inflection point, and dose mapping in the irradiators. Results showed that the experimentally absorbed dose correlated well with theoretical values within the established operating range (20–400 Gy), with an inflection point identified at 450 Gy. Dose mapping revealed significant variations among different regions of the irradiator, highlighting the need to optimize its uniformity. In addition, irradiated dosimeters maintained chemical stability for at least one week under controlled conditions, supporting their applicability in the industrial sector. Overall, the findings confirm that the Fricke system is a reliable, economical, and valid technical alternative for dosimetric studies in gamma irradiators..

RESUMEN

Se implementó y evaluó el **sistema dosimétrico de Fricke** con el propósito de determinar la distribución de dosis en irradiadores gamma de uso industrial. El estudio comprendió cuatro etapas experimentales: la evaluación inicial del sistema, la irradiación en lote, la identificación del punto de inflexión y el mapeo de dosis en los irradiadores. Los resultados evidenciaron que la dosis absorbida experimental mostró una adecuada correlación con los valores teóricos dentro del rango operativo establecido (20–400 Gy), identificándose un punto de inflexión en 450 Gy. El mapeo de dosis puso de manifiesto variaciones significativas entre distintas regiones del irradiador, lo que resalta la necesidad de optimizar su uniformidad. Asimismo, los dosímetros irradiados conservaron estabilidad química durante al menos una semana bajo condiciones controladas, lo que respalda su aplicabilidad en el ámbito industrial. En conjunto, los hallazgos confirman que el sistema de Fricke constituye una alternativa técnica confiable, económica y válida para estudios dosimétricos en irradiadores gamma.

Revista Boliviana de Química, 2026, 43, 58-69
ISSN 0250-5460, Rev. Bol. Quim. Paper edition
ISSN 2078-3949, Rev. boliv. quim. e-edition, Jan-Jun
30 junio 2026, <https://doi.org/10.53287/pyii9560fa79p>
© 2026 Universidad Mayor de San Andrés,
Facultad de Ciencias Puras y Naturales,
Carrera Ciencias Químicas, Instituto de Investigaciones Químicas
<https://bolivianchemistryjournaliq.umsa.bo>

¹Received January 30, 2026, accepted June 3, 2026, published June 30, 2026. *Mail to: caceresluisfer@gmail.com

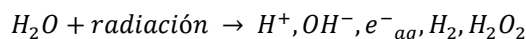
INTRODUCCIÓN

La Dosimetría Estándar de Referencia ASTM 1026 (Fricke) se fundamenta en la irradiación de la muestra junto con dosímetros y en el correspondiente mapeo dosimétrico dentro de la cámara de irradiación, con el propósito de establecer la tasa mínima y máxima de dosis absorbida, además de la uniformidad en la distribución de la dosis. Estos parámetros permiten calcular los tiempos de exposición requeridos para aplicar las dosis previstas, las cuales se verifican mediante dosímetros de rutina y su posterior análisis.

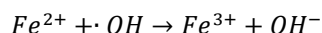
El sistema dosimétrico Fricke constituye un método confiable para cuantificar la dosis absorbida en agua, basado en la oxidación de iones ferrosos (Fe^{2+}) a iones férricos (Fe^{3+}) en solución acuosa ácida, inducida por radiación ionizante¹.

Este sistema representa una alternativa económica y precisa, sustentada en reacciones químicas bien caracterizadas. Utiliza una solución de sulfato ferroso amoniacal y ácido sulfúrico, donde la radiación ionizante interactúa con el agua generando radicales libres ($\text{H}\cdot$, $\text{OH}\cdot$) y moléculas (H_2 , H_2O_2), que finalmente provocan la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} :

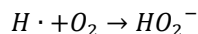
- Radiólisis del agua



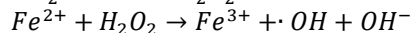
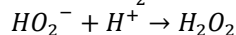
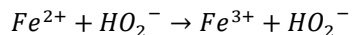
- Reacción con radicales hidroxilos



- Reacción con radicales hidrógeno y oxígeno



- Oxidación de iones de hierro adicionales



Basado en este principio químico, específico y selectivo, se desarrolla la oxidación de iones ferrosos (Fe^{2+}) a iones férricos (Fe^{3+}). La concentración de Fe^{3+} es directamente proporcional a la dosis absorbida, lo que permite determinar la distribución de dosis en el irradiador².

En este trabajo se desarrolló y evaluó el sistema de dosimetría Fricke en irradiadores industriales gamma, posibilitando mapeos precisos de la distribución de dosis, considerando su estabilidad y fiabilidad bajo diferentes condiciones operativas.

EXPERIMENTAL

Material y equipamiento

La preparación de la solución Fricke se realizó de acuerdo a la Norma ASTM E 1026-04 en los Laboratorios de Química Analítica y Ambiental (LQAA) de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN-Viacha).

Se preparó una solución de H_2SO_4 0,4 M en agua bidestilada, agitada vigorosamente para favorecer su saturación con oxígeno. Se pesaron en balanza analítica las cantidades requeridas de NaCl (empleado para minimizar efectos adversos ocasionados por trazas de impurezas orgánicas) y de sal de Mohr, $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, disolviéndose ambos en una alícuota de la solución ácida. Posteriormente, la mezcla se aforó al volumen correspondiente con H_2SO_4 0,4 M y se almacenó en un frasco ámbar para evitar exposición a la luz, obteniéndose la Solución I.

Se verificó el cumplimiento de los límites establecidos por la norma ASTM (absorbancia $< 0,1$ en el intervalo 302–305 nm). Para ello, se tomó una muestra de la solución final y se midió su absorbancia en un espectrofotómetro Spectronic Unicam Helios, previamente calibrado y certificado^{3 4}.

La Solución I se distribuyó en viales de vidrio y plástico de 20 mL, recubiertos con papel aluminio para impedir interacción con la luz. Los dosímetros se irradiaron con rayos gamma provenientes de una fuente de ^{60}Co , en el Centro Multipropósito de Irradiación de la ABEN, abarcando un rango de dosis entre 19 Gy y 550 Gy. El objetivo fue comprobar el punto de inflexión y límite de uso del dosímetro, dado que la norma establece un rango operativo

de 20 a 400 Gy⁵. En cada ensayo se reservaron cinco dosímetros de control, empleados para calcular la absorbancia neta.

Para determinar la longitud de onda óptima se realizó un barrido espectral de dosímetros irradiados, registrándose el mayor pico en la gráfica Absorbancia vs. Longitud de Onda, a 302±3 nm, como se aprecia en la Figura 1.

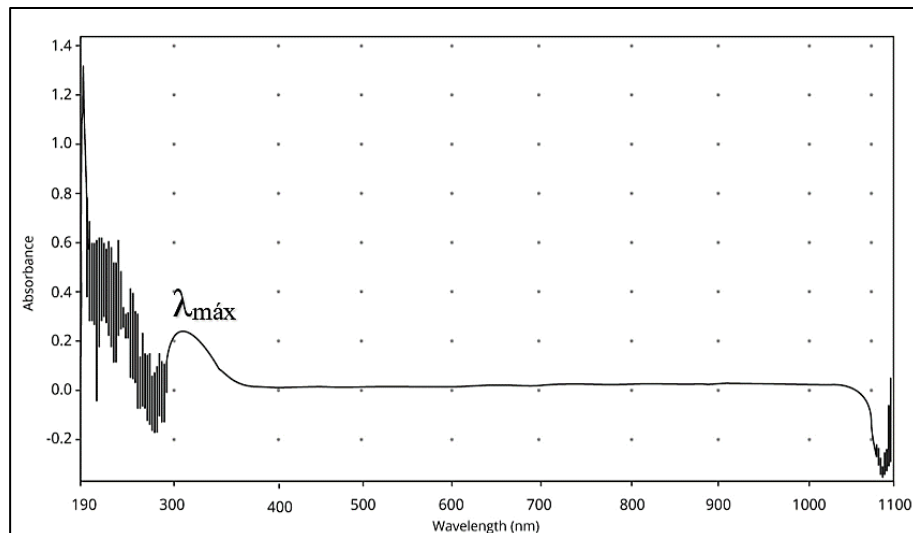


Figura 1. Barrido espectral de la solución Fricke

Se determinó la Dosis Absorbida de Fricke según la ecuación (1):

$$D_F = \frac{\Delta A [1 + 0,0069(25 - T_{read})] [1 + 0,0012(25 - T_{irrad})]}{\epsilon_{25} G_{25} \rho d} \dots (1)$$

Donde:

D_F = dosis absorbida en la solución (Gy),

ΔA = absorbancia neta a la longitud de onda óptima (302 a 305 nm),

ρ = densidad de la solución dosimétrica, igual a 1,024·10³ kg·m⁻³,

ε = coeficiente de absorción lineal molar de los iones férricos (Fe³⁺), m²·mol⁻¹, ε=219[m²·mol⁻¹] (25°C)

G = rendimiento químico de radiación de los iones férricos (Fe³⁺), mol·J⁻¹, G=1,61·10⁻⁶ [mol·J⁻¹]. (25°C), y

d = longitud del trayecto óptico de la solución dosimétrica en la cubeta, m.

El valor de ΔA puede calcularse utilizando la ecuación (2):

$$\Delta A = |A - A_0| \dots (2)$$

Donde:

ΔA = absorbancia neta

A = absorbancia del dosímetro irradiado

A₀ = absorbancia media de los dosímetros no irradiados

Pruebas de irradiación^{5 6}

Primera prueba de irradiación

En la prueba inicial se evalúa el funcionamiento de los dosímetros de Fricke, preparando 20 dosímetros, de los cuales 15 fueron irradiados y 5 se mantuvieron como blancos. La metodología incluyó la preparación de la solución y los dosímetros, su transporte al Centro Multipropósitos de Irradiación (CMI), la irradiación, el transporte de regreso al LQAA (Viacha a 10 Km), las lecturas de absorbancia en el espectrofotómetro y el cálculo de la dosis absorbida.

Segunda prueba de irradiación

Se utilizó un diseño experimental 3x3 para evaluar dosímetros irradiados de forma individual y en grupos de tres, con un total de 82 dosímetros preparados a partir de 1000 mL de solución de Fricke. Se realizaron múltiples mediciones de absorbancia en el espectrofotómetro a 302 y 305 nm, incluyendo un barrido espectral inicial para determinar la longitud de onda óptima.

Tercera prueba de irradiación

En esta prueba, se buscó identificar el punto de inflexión en la curva Dosis vs. Tiempo utilizando intervalos de irradiación más largos y comparar el comportamiento de los dosímetros en viales de vidrio y plástico. Las lecturas de absorbancia se realizaron por espectrofotometría UV/Vis, promediando tres réplicas por medición, sin reutilizar la solución de los dosímetros.

Las condiciones experimentales consideraron el uso de un Irradiador Auto blindado IAG, longitudes de onda específicas y temperaturas. Por motivos logísticos, los dosímetros se prepararon un día antes, y las lecturas se priorizaron el mismo día de la irradiación.

La posición referencial de los dosímetros para la primera, segunda y tercera prueba se aprecia en la Figura 2.

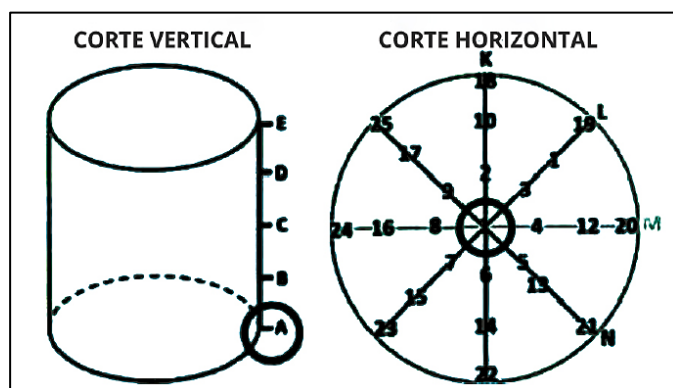


Figura 2. Posición de dosímetros en IAG⁷

Cuarta prueba de irradiación

En esta prueba se realizó un mapeo de radiación utilizando el Irradiador Industrial Gamma (IIG) del Centro Multipropósitos de Irradiación (CMI) para evaluar su funcionamiento y la distribución de radiación.

Mapeo de Irradiación en Irradiador Industrial IIG

Para el experimento en el IIG se replicó la irradiación realizada con los expertos del OIEA en 2023, dosimetría de aire. Con la finalidad de realizar una comparación de resultados, se distribuyeron dosímetros en distintas regiones del irradiador para evaluar la uniformidad de la dosis, como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Ubicación de contenedores a ser evaluados, literas resaltadas en azul IIG (16, 18, 20, 23, 25, 27)⁷

La ubicación de los dosímetros dentro los contenedores, se muestra en la Figura 4. Las posiciones encerradas en círculos rojos son los puntos de estudio para determinar la distribución de dosis absorbida en los contenedores del IIG.

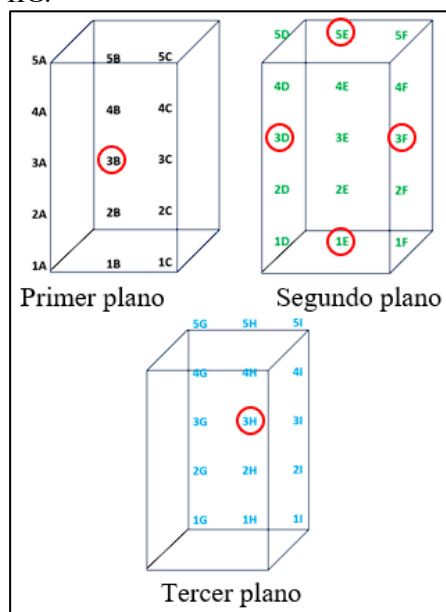


Figura 4. Ubicación de dosímetros dentro del contenedor IIG⁷

Evaluación de estabilidad

Los dosímetros irradiados se almacenaron bajo condiciones controladas de temperatura 4 °C y en ausencia de luz. Se realizaron mediciones periódicas de absorbancia periódicamente para evaluar cambios en la concentración de Fe^{3+} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primera prueba con estimación de dosis

Con los datos de absorbancia obtenidos de los dosímetros en la primera prueba (ver Anexo A) se calculó la Dosis Absorbida en [Gy] y se comparan con la estimación de dosis por el irradiador autoblandado IAG, mostrado en la Figura 5.

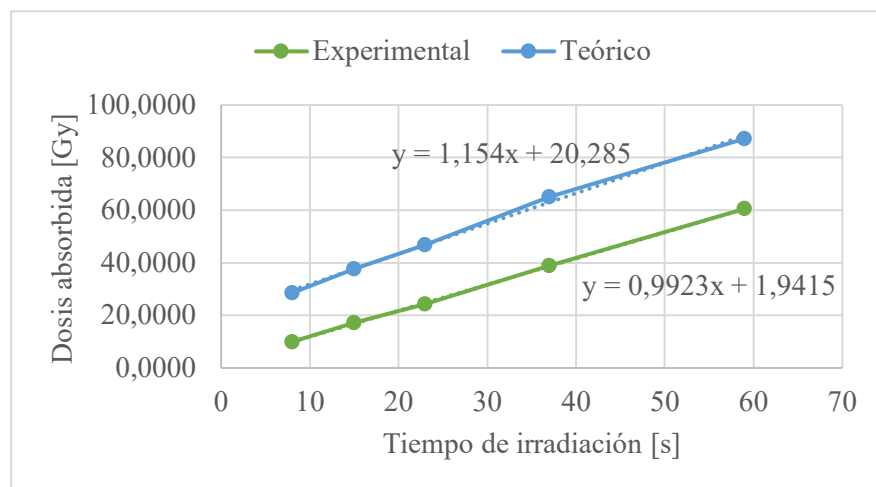


Figura 5. Comparación Teórico – Experimental Dosimetría de Fricke

El comportamiento inicial del sistema mediante la irradiación de dosímetros de forma individual, indica una discrepancia significativa entre la dosis absorbida experimental y la dosis teórica estimada en tiempos cortos de irradiación, pero esta diferencia se redujo a medida que aumentó el tiempo de exposición. Sin embargo, la correlación general entre ambas mediciones valida la capacidad del sistema para estudios de irradiación gamma.

Segunda prueba – irradiación en grupo

Este proceso mostró una variación en las dosis absorbidas según el tiempo de irradiación y el método de agrupamiento de los dosímetros, como en la Figura 6.

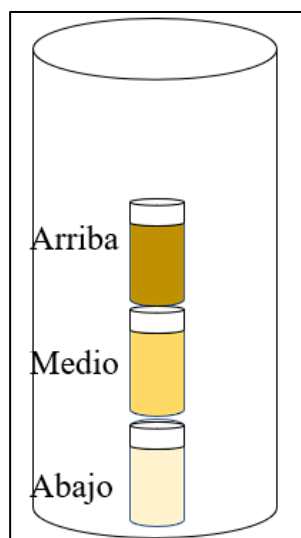


Figura 6. Posición de dosímetros irradiados en grupo

Al irradiar dosímetros en diferentes posiciones dentro de un grupo, se observaron variaciones en las dosis absorbidas (Figura 7). La posición central mostró la dosis más uniforme, mientras que las posiciones periféricas presentaron mayores desviaciones (Ver Anexo B). Esto evidencia la influencia de la geometría del irradiador y su impacto en uniformidad de la distribución de dosis. Los resultados refuerzan la importancia de un diseño optimizado para garantizar que la irradiación sea homogénea, especialmente en aplicaciones industriales.

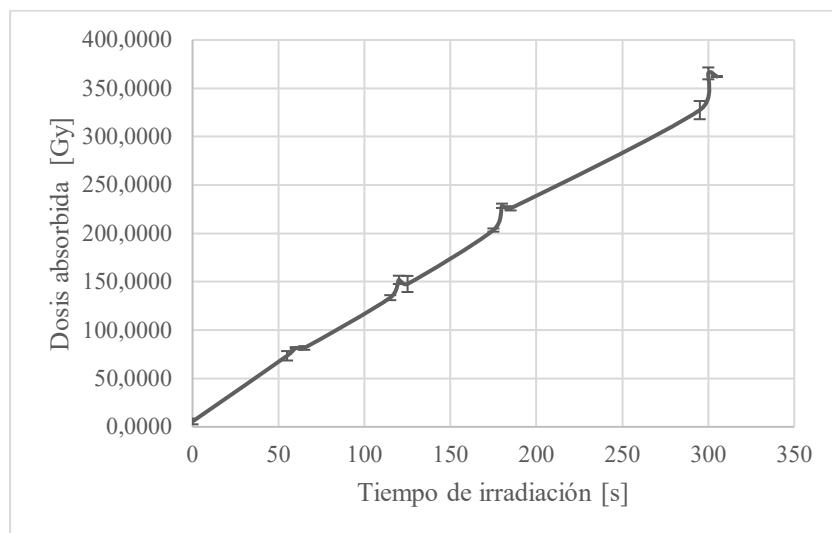


Figura 7. Dosis vs. Tiempo de dosímetros irradiados en grupo

Tercera prueba – identificación del punto de inflexión

Los resultados de la tercera prueba mostraron una similitud en la dosis absorbida entre ambos materiales vidrio (borosilicato Tipo I) y plástico (HDPE de alta densidad), sugiriendo que el tipo de vial no tiene un impacto significativo en la irradiación. Además, se aprecia una desviación de la curva, a una dosis de 450 [Gy] en la Figura 8.

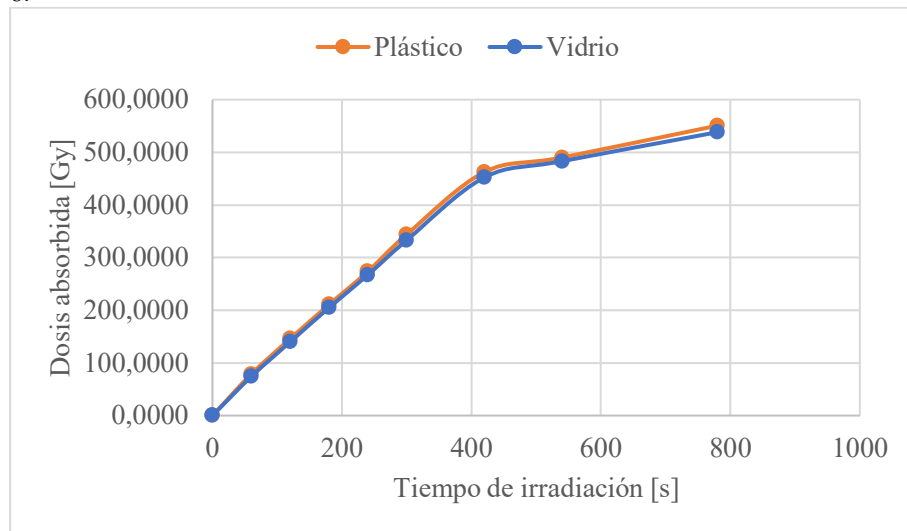


Figura 8. Comparación de Dosis absorbida en Viales de Vidrio y Plástico, y punto de inflexión en la curva.

La curva Dosis vs. Tiempo permitió identificar un punto de inflexión en aproximadamente 450 Gy, con correlación a los límites especificados por la norma ASTM 1026-04, sin embargo, se comprobó que puede aplicarse hasta 450 Gy. Adicionalmente, el envase plástico es igualmente efectivo, ampliando las posibilidades de elección para futuras aplicaciones, sin comprometer la precisión de los resultados.

Cuarta prueba – aplicación en distribución de la dosis en Irradiador Industrial Gamma IIIG

En el irradiador industrial se empleó un rango más amplio, limitado entre 33 Gy y 2230 Gy de acuerdo al Estudio Dosimétrico del Irradiador Industrial, en la Figura 9, se presenta los resultados de la distribución de tasa de dosis en el aire dentro de la sala en cuestión de acuerdo a modelado a la fecha de irradiación.

En el IIIG se irradió por 20 minutos en las posiciones indicadas de acuerdo a la Figura 3 y 4. La temperatura de exposición de los dosímetros para la prueba se estableció como 23,4°C con dosímetros en frascos de vidrio.

Según los datos obtenidos de dosis absorbida en el mapeo del irradiador IIG (ver Anexo C), se grafican los promedios de las dosis absorbidas de los 6 dosímetros ubicados en cada litera indicada, mostrando el porcentaje distribución de la irradiación según la mayor dosis absorbida, se observa el promedio de las dosis absorbidas según la posición en común ubicada en cada litera en la posición distribuida, mostrando el porcentaje distribución de la irradiación según la mayor dosis absorbida, por posición.

Se realiza el cálculo de la tasa de dosis absorbida de cada dosímetro irradiado en el mapeo. En la comparación con los resultados del OIEA como se aprecia en la Figura 9, los valores de dosis absorbida fueron ajustados con el decaimiento de la fuente de ^{60}Co para poder ser comparados⁶.

El mapeo realizado en el irradiador industrial reveló diferencias significativas en las dosis absorbidas entre distintas literas y posiciones dentro de estas. Las regiones centrales y superiores presentaron mejores distribuciones, mientras que las inferiores mostraron menores dosis. Estos resultados reflejan que se debe ajustar el diseño del irradiador para mejorar la uniformidad de la irradiación. Además, la comparación con los resultados de OIEA confirma la confiabilidad del sistema dosimétrico de Fricke como herramienta para mapeos de dosis.

Estabilidad de dosímetros post-irradiación

Las mediciones de estabilidad indicaron que no hubo cambios significativos en la absorbancia durante el periodo de evaluación, confirmando que las condiciones de almacenamiento propuestas son adecuadas. La oxidación de la

solución de Fricke en el tiempo no fue significativa en los dosímetros no irradiados e irradiados, por tanto, se aprecia una estabilidad de al menos una semana.

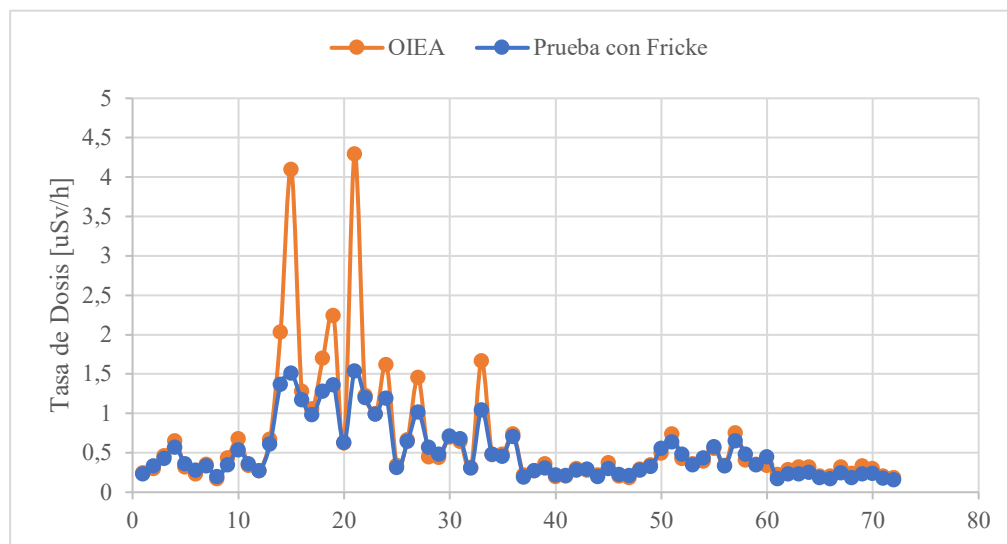


Figura 9. Gráfica de Comparación de Tasa de Dosis Absorbida medida con Fricke y según OEIA

Análisis ANOVA de resultados

Dentro de los resultados obtenidos de los experimentos mencionados, se realizó un análisis ANOVA a partir de las variables respuesta, para ver la significancia y el efecto que tiene los resultados con los parámetros controlados. Estos se dividieron en tres bloques de experimentos:

a. Análisis por efecto del tiempo de análisis y dosis absorbida

Las variables utilizadas en este experimento son tiempo de Análisis (tiempo en el que se demora en analizar las muestras irradiadas) y la dosis de irradiación estimada, teniendo como respuesta la dosis absorbida en el dosímetro Fricke. En la siguiente Figura 10 se muestra el análisis ANOVA de la segunda prueba.

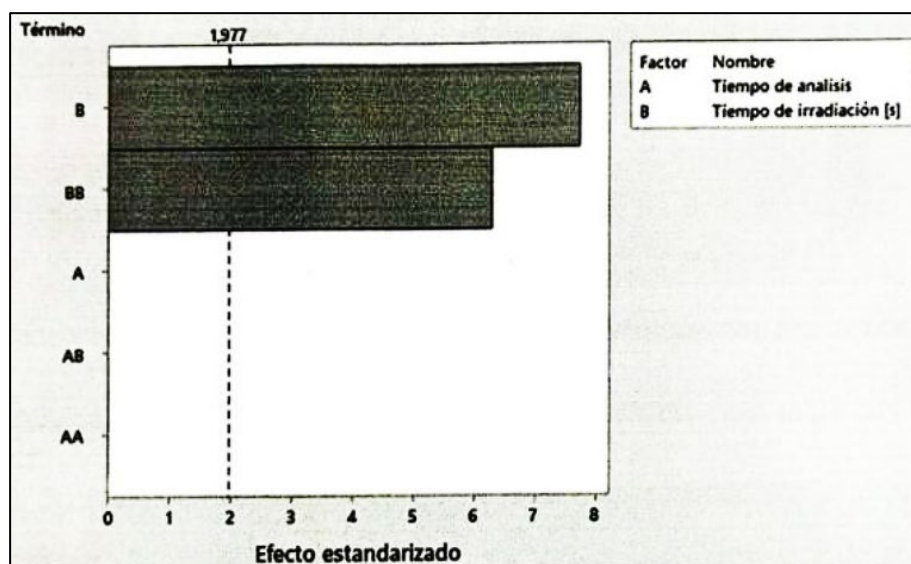


Figura 10. Diagrama de Pareto de tiempo de análisis y tiempo de irradiación, datos tabulados en el Anexo D.

Dentro de los resultados de nivel de significancia indica que el tiempo de análisis de los dosímetros Fricke no son significativos. Sin embargo, el tiempo de irradiación de los dosímetros si es significativo, por lo que la dosis

absorbida por el dosímetro tiene efecto al tiempo de irradiación. El diagrama de Pareto muestra los efectos del tiempo de irradiación y el tiempo de análisis.

b. Análisis por nivel de irradiación (3 niveles)

La irradiación de los dosímetros se realizó en tres niveles diferentes. El nivel más bajo, denominado nivel A, se encuentra a una altura de 0 mm en el origen del cilindro, correspondiente al punto 1 como se vio en la Figura 2. El segundo nivel, nivel B, está ubicado a una altura de 58 mm, también en el origen del cilindro y en el punto 1. Finalmente, el tercer dosímetro se encuentra a una altura de 116 mm, en el mismo punto de referencia. El análisis ANOVA evalúa el efecto de la irradiación en los diferentes niveles. Los niveles no son significativos, sin embargo, una desviación en el nivel 1 tal como se observa en la siguiente Figura 11.

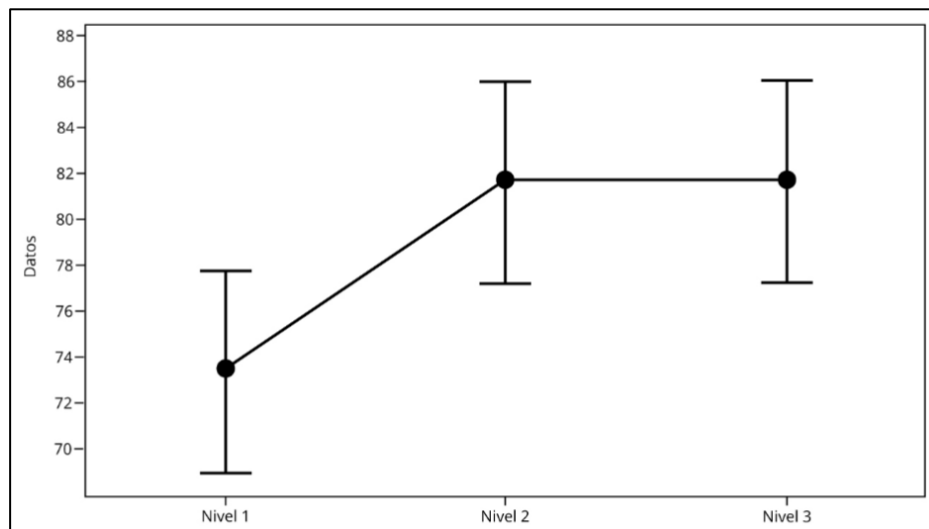


Figura 11. Gráfica de Intervalos de Nivel.

c. Análisis por material utilizado en el dosímetro Fricke (Vidrio y Plástico)

Como parte de los experimentos realizados con los dosímetros Fricke, se comparó la respuesta dosimétrica obtenida en frascos de vidrio y plástico. El análisis estadístico mediante ANOVA mostró que el tipo de material utilizado no presenta una influencia significativa sobre la dosis absorbida. La comparación de medias confirma este resultado, tal como se observa en la Figura 13, donde no se evidencian diferencias estadísticamente significativas entre ambos materiales. En consecuencia, para estudios posteriores, cualquiera de los dos tipos de frascos puede emplearse sin afectar la precisión de las mediciones dosimétricas.

Adicionalmente, se calcularon las medias, desviaciones estándar y coeficiente de varianza por los resultados obtenidos de las 9 muestras obtenidas por cada tiempo de irradiación, los resultados se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. ANOVA de materiales utilizados para dosímetros Fricke

λ [nm]	Tiempo irradiación [s]	Media	Desviación estándar	CV (%)
Abs. (302 nm)	60	60,85	2,20	1,6
	120	131,35	2,20	1,7
	180	190,97	5,79	3,0
	300	311,88	3,30	1,1
Abs. (305 nm)	60	61,14	1,02	1,7
	120	130,80	2,22	1,7
	180	191,24	5,81	3,0
	311,79	3,54	1,1	

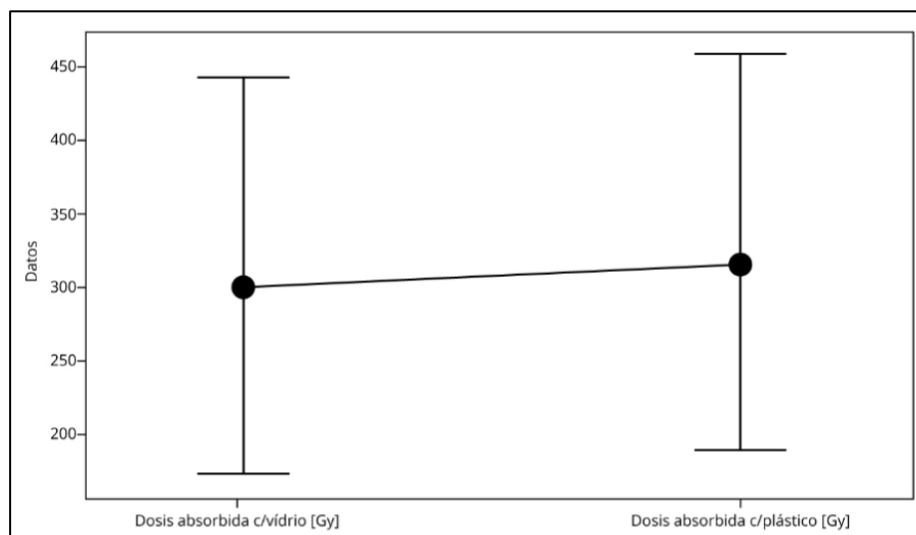


Figura 13. Gráfica de intervalos de dosis absorbida utilizando frasco de vidrio y plástico.

Se puede apreciar los promedios (media) de 9 ítems irradiados por cada tiempo de irradiación, así mismo la desviación estándar que permite conocer la dispersión de los datos alrededor de la media y el coeficiente de variación en porcentaje para conocer la dispersión relativa entre diferentes conjuntos de datos.

CONCLUSIONES

El sistema dosimétrico de Fricke demostró ser confiable, aunque las diferencias iniciales resaltan la importancia de controlar las condiciones experimentales. Las variaciones en la distribución de dosis dentro de un grupo destacan la influencia de la posición de los dosímetros y la geometría del irradiador. Estos hallazgos subrayan que se debe optimizar la configuración espacial para garantizar una irradiación más uniforme.

El sistema demostró precisión dentro del rango de dosis especificado por la norma ASTM 1026-04, identificando correctamente el punto de inflexión hasta 450[Gy] con tiempo de irradiación de 420[s]. Además, la equivalencia en el desempeño entre viales de vidrio y plástico proporciona flexibilidad para futuras aplicaciones. El mapeo de dosis permitió identificar variaciones significativas en la distribución de radiación, lo que resalta la necesidad de optimizar el diseño del irradiador. La comparación con los datos del OIEA valida la precisión y fiabilidad del sistema dosimétrico de Fricke para estudios industriales.

Los resultados confirman que la dosimetría de Fricke es una alternativa viable al sistema dosimétrico del CMI en el IAG y IIIG, demostrando alta reproducibilidad y precisión en el rango de 20 a 400 Gy, según la norma ASTM E1026-04e1. La distribución de dosis resalta la influencia de la posición y geometría del irradiador, subrayando la necesidad de optimizar la configuración espacial. La equivalencia entre viales de vidrio y plástico amplía sus aplicaciones, y su validación con datos del OIEA refuerza su confiabilidad. Además, se propone la implementación del sistema dosimétrico de dicromato de plata para medir dosis superiores a 2 kGy en irradiación industrial.

Se recomienda continuar con la recolección de datos experimentales para optimizar y validar el método, considerando mediciones en tiempos definidos tras la irradiación para evaluar posibles factores de corrección.

Se sugiere realizar lecturas inmediatamente después y a intervalos regulares durante 24 horas, además de identificar parámetros que puedan influir en la lectura dosimétrica. Para garantizar la trazabilidad metrológica, se recomienda la utilización de dosímetros de alanina como sistema de referencia, considerando su aplicación en rangos de dosis superiores (10–100 kGy), permitiendo la comparación y validación del sistema de Fricke dentro de su rango de operación.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear y al Centro Multipropósito de Irradiación de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear por el respaldo y facilidades otorgadas para la realización del presente estudio.



ANEXOS

Anexo A. Tablas de dosis absorbida medida en laboratorio (teórico y experimental)

Longitud Óptima = 302 Nm		
Tiempo de Irradiación [S]	Dosis Absorbida [Gy] Experimental	Desviación Estándar
8	9,9319	0,7762
15	17,1172	1,7502
23	24,2415	0,8800
37	38,8078	2,0557
59	60,5140	2,0065
Tiempo de Irradiación [S]	Dosis Absorbida Teórica Calculada [Gy]	Dosis Experimental [Gy]
8	28,50	9,9319
15	37,75	17,1172
23	46,85	24,2415
37	65,00	38,8078
59	87,20	60,514

Anexo B. Tabla de resultados de Dosis Absorbida de Dosímetros irradiados en grupo (segunda prueba)

Longitud Óptima 302 Nm				
Posición	Tiempo de Irradiación [S]	Dosis Absorbida [Gy]	Desviación Estándar	Porcentaje de Irradiación [%]
Arriba	60	81,57	1,90	99,96
Medio	60	81,60	0,85	100,00
Abajo	60	73,48	4,87	90,04
Arriba	120	147,76	8,32	97,22
Medio	120	151,99	4,29	100,00
Abajo	120	133,58	2,57	87,89
Longitud Óptima 302 Nm				
Posición	Tiempo de Irradiación [S]	Dosis Absorbida [Gy]	Desviación Estándar	Porcentaje de Irradiación [%]
Arriba	180	225,93	2,18	98,85
Medio	180	228,56	2,23	100,00
Abajo	180	203,47	1,66	89,02
Arriba	300	362,17	0,50	99,10
Medio	300	365,45	6,15	100,00
Abajo	300	327,48	9,43	89,61

Anexo C. Resultados de la Dosis Absorbida por Literas (General y por Posición)

Dosis Absorbida General por Literas			
Litera	Prom.Dosis Absorbida [Gy]	Desviación Estándar	Distribución [%]
L16/ Superior	122,723	40,761	31,64
L16/ Inferior	114,311	38,015	29,47
L18/ Superior	387,873	108,353	100,00
L18/ Inferior	386,477	105,710	99,64
L20/ Superior	208,666	79,431	53,80
L20/ Inferior	205,362	87,077	52,95
L23/ Superior	81,867	15,068	21,11
L23/ Inferior	84,180	14,796	21,70
L25/ Superior	155,180	40,562	40,01
L25/ Inferior	158,532	41,706	40,87
L27/ Superior	68,932	11,951	17,77
L27/ Inferior	68,979	11,876	17,78
Dosis Absorbida por Posición En Literas			
Posición	Prom.Dosis Absorbida [Gy]	Desviación Estándar	Distribución [%]
Litera superior			
5E	102,575	53,930	44,46



1E	190,186	142,960	82,43
3B	230,732	165,768	100,00
3D	182,509	116,164	79,10
3H	143,316	98,439	62,11
3F	175,923	139,796	76,25
Litera Inferior			
5E	205,913	153,922	82,91
1E	248,351	178,943	100,00
3B	180,617	129,772	72,73
3D	147,900	109,340	59,55
3H	192,561	149,508	77,54
3F	211,688	150,452	85,24

Anexo D. Datos tabulados del análisis ANOVA de Tiempo de Análisis y Dosis Absorbida

Fuente	Gl	Sc Ajust.	Mc Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	5	929,00	185,800	18,19	0,000
Lineal	2	613,00	306,498	30,00	0,000
Tiempo de análisis	1	0,00	0,000	0,00	1,000
Tiempo de irradiación [s]	1	612,52	612,516	59,96	0,000
Cuadrado	2	405,20	202,598	19,83	0,000
Tiempo de análisis	1	0,00	0,000	0,00	1,000
Tiempo de irradiación[s]	1	405,20	405,195	39,66	0,000
Interacción de 2 factores	1	0,00	0,000	0,00	1,000
Tiempo de análisis *Tiempo de irradiación[s]	1	0,00	0,000	0,00	1,000
Error	138	1409,74	10,216		
Falta de ajuste	10	2,01	0,201	0,02	1,000
Error puro	128	1407,73	10,998		
Total	143	2338,74			

REFERENCIAS

- ¹ Instituto Peruano de Energía Nuclear, *Dosimetría de alta dosis*, disponible en: <http://www.ipen.gob.pe/index.php/servicios/industria-e-ingenieria/dosimetria-de-alta-dosis>, 2024.
- ² J. P. Gómez, 2013, *Diseño de un modelo digital en el programa MCNP para la simulación de la dosimetría de la fuente de Cobalto-60 de la EPN y validación del modelo mediante dosimetría Fricke* (BSc tesis), Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- ³ F. S. Martínez Osorio and I. de los A. Pérez Espinoza, 2009, *Calibración de un espectrofotómetro UV/Vis y evaluación de la incertidumbre* (BSc tesis), Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-León), Departamento de Química, León, Nicaragua.
- ⁴ L. F. Cáceres Choque, *Términos químicos ambientales y nucleares*, La Paz, Bolivia, 2022, pp. 212–214.
- ⁵ L. F. Cáceres Choque, *Términos químicos ambientales y nucleares*, La Paz, Bolivia, 2022, pp. 212–214.
- ⁶ International Atomic Energy Agency, *Use of Chlorobenzene Dosimetry Systems for Radiation Processing*, disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1578_S_web.pdf, 2024.
- ⁷ Agencia Boliviana de Energía Nuclear, 2024, *Centro Multipropósito de Irradiación: Reporte de pasantía – Integración de métodos determinísticos y de Monte Carlo en el estudio dosimétrico del irradiador industrial*, informe institucional, Autor: Elmer Efraín Alanoca Condori, La Paz, Bolivia.