

Evaluación de la Dosis Equivalente Direccional $H'(0.07)$ para Dosímetros de Anillos

J. T Álvarez Romero y V.M. Tovar Muñoz

LSCD, Departamento de Metrología, ININ.

Carretera México Toluca S/N, la Marquesa, Ocoyoacac, México, CP 52750

jtar@nuclear.inin.mx

Resumen

EL laboratorio de dosimetría personal (LDP) del departamento de Metrología recibió una solicitud de un usuario de radiación beta, que incidentalmente había irradiado 14 pares de dosímetros de anillos para extremidades del tipo TLD-100 suministrados por el LDP. Esta muestra de 14 pares de anillos tentativamente se irradió en los meses de Julio-Agosto del año 2004, y solicitaba de manera expedita la evaluación de la dosis equivalente recibida. El LSCD construyó dos curvas de calibración en términos de la dosis equivalente direccional $H'(0.07)$ empleado dos fuentes patrones secundario de ^{90}Sr - ^{90}Y para radiación beta: una de 74 MBq y otra de 1850 MBq con trazabilidad al PTB. La primera curva en el intervalo de 0 a 5 mSv, la segunda en el rango de 5 a 50 mSv, tomando en cuenta efectos por posicionamiento de los anillos en el maniquí. Ambas curvas de calibración se validaron por falta de ajuste, simetría de residuos y normalidad de los mismos. Se evaluó y analizó la $H'(0.07)$ para estos 14 pares de anillos utilizando la prueba Tukey de medias de una sola vía para. Se encontró que las H' se podían clasificar en 4 grupos, y que la probabilidad de que hayan irradiado de manera aleatoria era menor al nivel $\alpha = 0.05$.

1. INTRODUCCIÓN

El LDP de Metrología, brinda el servicio de dosimetría personal con dosímetros TLD para cuerpo entero (tórax) y manos, así como la dosimetría de película para cuerpo entero.

En el caso particular de la dosimetría TLD para manos se usa un par de anillos, donde en cada uno de estos se encuentra un cristal de TLD-100 (LiF:Ti,Mg), estos dosímetros son calibrados en términos de la dosis equivalente direccional $H'(0.07)$ para radiación poco penetrante: fotones de baja energía o radiación beta. Sin embargo, el usuario debe especificar el tipo de radiación que es de su interés.

EL LDP del departamento de Metrología recibió una solicitud de un usuario de radiación beta, que incidentalmente había irradiado 14 pares de dosímetros de anillos para extremidades del tipo TLD-100 suministrados por el LDP. Esta muestra de 14 pares de anillos tentativamente se irradió en los meses de Julio-Agosto del año 2004, y solicitaba de manera expedita la evaluación de la dosis equivalente recibida.

1.1 El RGSR y los Índices de Dosis

Estrictamente el usuario de la dosimetría de anillos tiene que cumplir con lo establecido en la en el Reglamento General de Seguridad Radiológica RGSR vigente, [1]. Este señala en su Capítulo III de los Límites de Equivalente de Dosis para el caso de irradiación a cuerpo entero y el caso de órganos que:

“...Artículo 20.- Para el personal ocupacionalmente expuesto, el límite del equivalente de dosis efectivo anual $H_{E,L}$ para los efectos estocásticos es de 50 mSv (5 rem).

Artículo 21.- Para el personal ocupacionalmente expuesto el límite de equivalente de dosis anual para los efectos no estocásticos es de 500 mSv (50 rem), independientemente de si los tejidos son irradiados en forma aislada o conjuntamente con otros órganos. Este límite no se aplica al cristalino, para el cual se establece un límite de 150 mSv (15 rem)

Artículo 22.- El equivalente de dosis que reciba cualquier órgano o tejido como consecuencia de la irradiación, incluirá el equivalente de dosis debido a fuentes externas y el equivalente de dosis comprometido debido a fuentes internas incorporadas en el mismo intervalo de tiempo.

Artículo 23.- El límite para el control de los efectos estocásticos se expresa en función del equivalente de dosis efectivo, debiéndose cumplir que:

$$\sum_T W_T \cdot H_T \leq H_{E,L}$$

En donde $H_{E,L}$ es el límite de equivalente de dosis efectivo anual y cuyo valor es de 50 mSv (5 rem); $w(T)$ es el factor de ponderación del tejido T; y H_T es el equivalente de dosis anual del tejido T.

Artículo 24.- En el caso de que el personal ocupacionalmente expuesto se irradie interna y externamente y con el objeto de que no se sobrepasen los límites anuales de equivalente de dosis, se deberá cumplir con las dos condiciones siguientes:

$$\frac{H_{I,s}}{500 \text{ mSv}} \leq 1$$

$$\frac{H_{I,p}}{50 \text{ mSv}} + \sum_j \frac{I_j}{I_{j,L}} \leq 1$$

Siendo: $H_{I,s}$ el índice superficial de equivalente de dosis.

$H_{I,p}$ el índice profundo de equivalente de dosis.

I_j la incorporación anual debida a ingestión e inhalación del radioisótopo j.

$I_{j,L}$ el límite anual de incorporación para el radioisótopo j...”

Analizando estos artículos el problema a determinar es si se cumple el artículo 24, es decir el usuario en función de los resultados de la dosimetría de anillos debe concluir si excede o no el límite de los 500 mSv año establecido para el órgano de interés, en este caso manos.

Sin embargo, aquí surge una contradicción: estrictamente la calibración de los dosímetros de extremidades debería realizarse en términos de la $H_{I,s}$, sin embargo es conocido que este índice y el $H_{I,p}$ presentan el problema de la *no aditividad*. La *aditividad* consiste en la validez del principio de superposición: si varios campos de radiación son superpuestos, el valor numérico de la magnitud total es determinada por la suma de los valores de la magnitud asociada con cada campo, [2].

Por lo tanto el LSCD le calibra los dosímetros de extremidades en términos de la magnitud operativa dosis equivalente direccional $H'(0.07)$, magnitud dosimétrica recomendada por las Normas Básicas de Seguridad del OIEA, [3].

1.2 Magnitudes Operativas ICRU

Estas son empleadas para estimar la dosis equivalente efectiva H_E , la Dosis efectiva E o la dosis en órgano H_T .

Las magnitudes operativas para monitoreo de área son definidas en un maniquí matemático, conocido como esfera ICRU, éste es una esfera de 30 cm de diámetro con una densidad de 1 g/cm³ y compuesta de 76.2 % de O, 11.1 % de C, 10.1 % de H y 2.6 % de N, [2,4].

Las magnitudes operativas tienen la propiedad de *aditividad* que es lograda especificando dichas magnitudes en un punto d , para lo cual es necesario definir los conceptos de campo expandido y/o alineado.

Campo de radiación expandido. Es un campo de radiación en el cual la fluencia espectral y angular tiene los mismos valores en todos los puntos de un volumen de interés como en el del campo real en el punto de referencia.

La expansión de un campo de radiación asegura que cuando la totalidad del cuerpo receptor es expuesta a un campo de radiación homogéneo la fluencia, la distribución de energía y la distribución direccional son las mismas a través del volumen de interés que las del campo real sin cuerpo receptor, en el punto de referencia.

Campo de radiación alineado y expandido. Es un campo expandido unidireccional.

En la figura 1 se presenta una descripción gráfica de estos campos: la figura 1a representa un campo de radiación real en un punto de interés P, con tres componentes con diferentes direcciones simbolizadas por tres diferentes flechas. En la 1b se grafica el campo expandido del punto P, el círculo punteado indica el tamaño de la expansión del campo. Finalmente, la 1c se muestra el campo alineado y expandido del punto P, observe como todas flechas tiene la misma dirección.

Las siguientes magnitudes operativas son empleadas en el monitoreo de área:

Dosis equivalente Ambiental $H^(d)$* : En un punto de interés en un campo real de radiación, es el equivalente de dosis que sería producido por el correspondiente campo de radiación alineado y expandido en la esfera ICRU a una profundidad d , sobre el radio vector opuesto a la dirección de la radiación de incidencia.

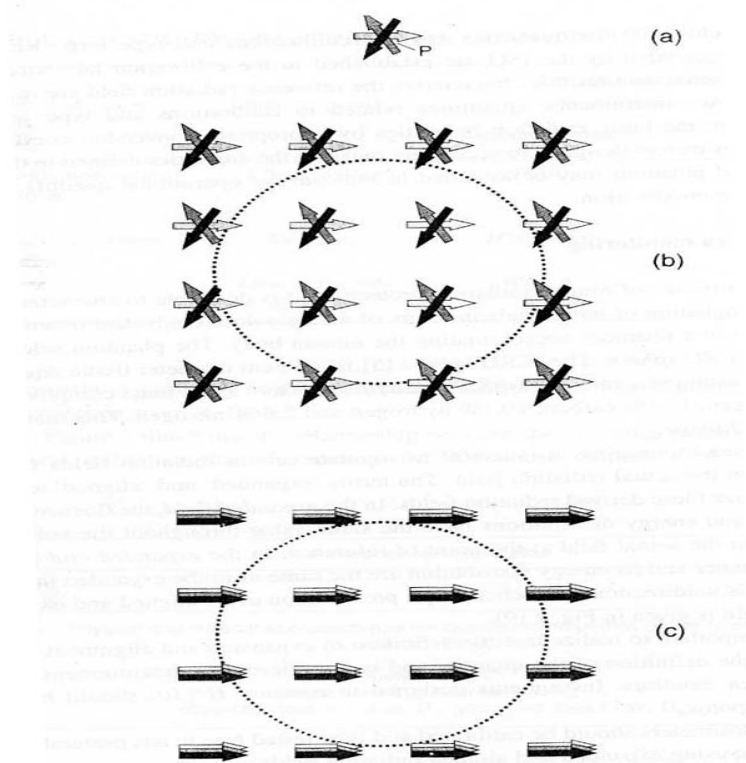


Figura 1. a) Campo real, b) expandido y, c) expandido y alineado[2].

Es la magnitud utilizada para vigilancia de área de la radiación penetrante con $d= 10$ mm.

Dosis Equivalente Direccional $H'(d, \Omega)$.- En un punto de interés en un campo real de radiación, es el equivalente de dosis que sería producido por el correspondiente campo de radiación expandido sobre un radio en una dirección especificada Ω .

Es la magnitud utilizada para monitoreo de área de la radiación de baja penetración a $d = 0.07$ mm para la piel, (3 mm en el caso del cristalino en el ojo).

En el caso de monitoreo individual tenemos:

Dosis Equivalente personal $H_p(d)$.- es el equivalente de dosis en tejido blando, a una apropiada profundidad d , debajo de un punto especificado de el cuerpo.

Para radiación penetrante se recomienda una profundidad de 10 mm. Para radiación de bajo poder de penetración se propone $d = 0.07$ mm, y para el caso especial de vigilancia de equivalente de dosis del cristalino del ojo se propone $d = 3$ mm.

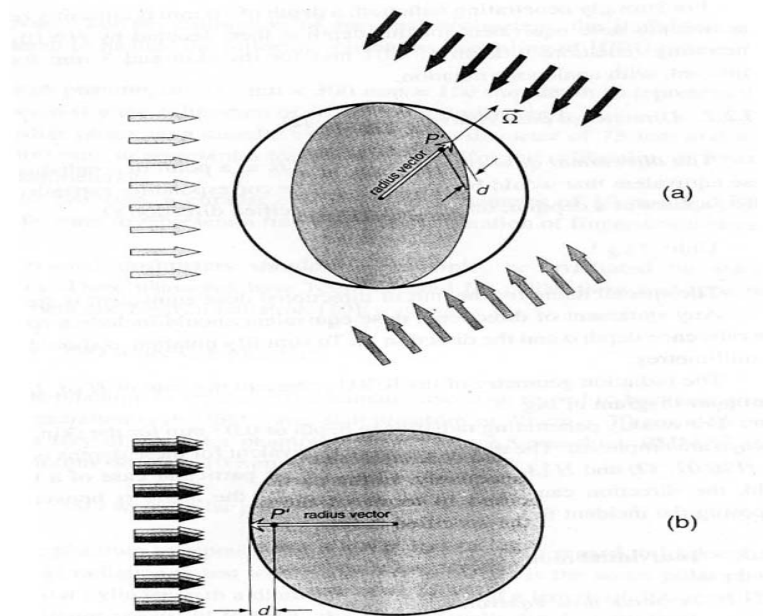


Figura 2. Magnitudes operativas: a) dosis equivalente direccional $H'(d, \Omega)$, b) dosis equivalente ambiental $H^*(d)$, [2].

1.3 Realización de la $H_p(0.07;0)$ y $H'(0.07;0)$ para Campos Beta

La realización de las magnitudes operativas para campos de radiación beta se efectúa con campos de referencia calibrados en términos de dosis absorbida en aire y el auxilio de coeficientes de conversión, a continuación se presenta algunas definiciones importantes para la calibración de los dosímetros personales, [4]:

1.3.1 Dosis absorbida de referencia D_R

Es la dosis absorbida personal $D_p(0,07)$ en un maniquí de bloque hecho de tejido ICRU con una orientación del maniquí tal que la normal de su superficie coincide con la dirección media de la radiación incidente.

El maniquí de bloque, es equivalente con suficiente precisión, al maniquí inherente que contiene la cavidad de aire en la cámara de extrapolación (instrumento patrón) usado para medidas de campos de radiación beta.

1.3.2 Coeficiente de conversión dosis absorbida- dosis equivalente h_D

Es el cociente de la dosis equivalente H y la dosis absorbida de referencia D_R ,

$$h_D = \frac{H}{D_R} \quad (1)$$

Cualquier declaración sobre el coeficiente de conversión requiere especificar el tipo de dosis equivalente de interés. Por ejemplo: dosis equivalente direccional o personal. El coeficiente h_D depende del valor medio de la energía y para las magnitudes $H'(0,07, \bar{\Omega})$ y $H_p(0,07)$ de la distribución direccional de la radiación incidente.

1.3.3 Dosis equivalente direccional

Esta se define bajo condiciones de calibración como,

$$H'_t(0,07; \bar{\Omega}) = h'_D(0,07; E; \alpha) D_R \quad (2)$$

donde la E denota la energía media de la radiación de referencia y α es el ángulo de la partícula beta bajo condiciones de calibración.

1.3.4 Dosis equivalente personal

La dosis equivalente personal se define como,

$$H_{p,t}(0,07) = h_{p,D}(0,07; E; \alpha) D_R \quad (3)$$

A continuación se describe el tipo de maniqués empleados en la calibración de dosímetros personales.

1.4 Maniqués para calibración

En el caso de calibración de dosímetros personales en términos de magnitudes operativas para radiación beta, el Reporte 16 de la serie de Seguridad del OIEA [2] y la norma ISO /CD 6980-3.6 [4], indica que hay tres maniqués para la calibración:

- a) Maniqué de bloque ISO: lleno de agua de 30x30x15 cm con 2.5 mm de PMMA de espesor en la parte frontal,

- b) Maniquí de poste ISO: cilindro recto de 73 mm de diámetro lleno de agua, con 300 mm de longitud PMMA con espesor de pared frontal de 2.5 mm y 10 mm en los extremos,
- c) Maniquí de barra ISO: cilindro circular recto de 19 mm de diámetro y 300 mm de longitud.

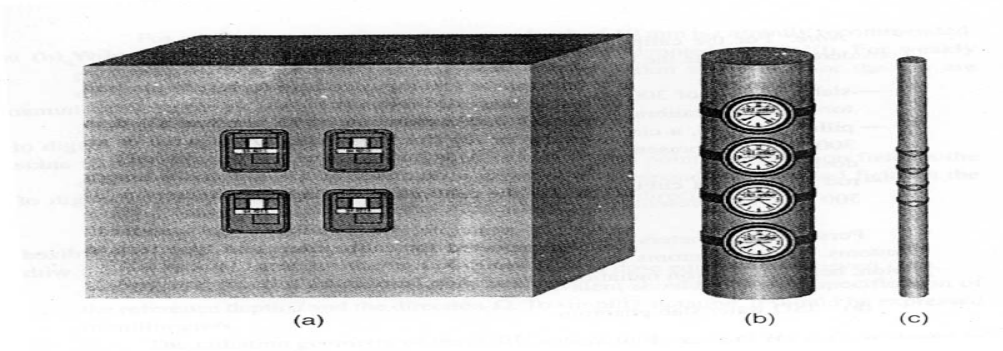


Figura 3. Maniqués para calibración

Dos aspectos importantes en la dosimetría para radiación beta de acuerdo con la norma ISO 6980 parte 3 son, [4]:

- a) Los coeficientes de conversión $h_{p,D}(0.07;E,\Omega)$ y $h'_D(0.07;E,\Omega)$ son aproximadamente iguales
- b) El tamaño de maniquí no tiene influencia significativa en el valor de los coeficientes de conversión, por lo tanto los valores de estos coeficientes medidos en el maniquí de bloque pueden usarse para los otros maniqués.

2. DESARROLLO

La evaluación de la $H'(0.07)$ de los dosímetros recibidos consistió en dos etapas:

- Construcción de la curva de calibración y evaluación de la $H'(0.07;0)$,
- Análisis de varianza de los resultados obtenidos.

2.1. Construcción de las Curvas de Calibración en Términos de $H'(0.07,0)$

En el LSCD se construyen dos curvas de calibración CC en términos de la respuesta del TLD $R(nC)$ vs $H'(0.07)$, empleando los 14 pares de dosímetros del usuario.

En la primer curva en el intervalo de 0 a 5 mSv se usa una fuente patrón secundario de ^{90}Sr - ^{90}Y de 74 MBq calibrada en $H'(0.07)$ con trazabilidad al PTB. Se Irradian cuatro dosímetros TLD para cada uno de los siguientes niveles de $H'(0.07)$: 0.0, 0.30, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 y 5.00 mSv.

La respuesta se ajusta por mínimos cuadrados pesados mediante un modelo de regresión lineal con el software Minitab, [5].

En la segunda CC en el rango de 5 a 50 mSv, se emplea una fuente patrón secundario de ^{90}Sr - ^{90}Y de 1850 MBq calibrada en $H'(0.07)$ con trazabilidad al PTB. Irradiando cuatro dosímetros TLD para cada uno de los siguientes niveles de $H'(0.07)$: 5, 10, 20, 30, 40, 50 y 100 mSv. Análogamente a la primer CC, la respuesta se ajusta por mínimos cuadrados pesados mediante un modelo de regresión lineal con el software Minitab, [5].

El maniquí empleado en la irradiación es el mostrado en la Figura 3 a) para evaluar los posibles efectos por posicionado de los anillos, para las siguientes posiciones: 1= superior derecha, 2= superior izquierda, 3= inferior derecha, 4= inferior izquierda.

Ambas CC se validaron por falta de ajuste LOF y prueba de normalidad de Anderson-Dar AD, para un nivel de significancia $\alpha=0.05$, [5].

La evaluación de la respuesta del TLD del usuario en términos de la $H'(0,07)$ se efectúa empleando la primer CC, ya que la respuesta correspondía a un bajo rango de $H'(0.07)$.

Finalmente tratando de encontrar alguna correlación en la respuestas se grafica la $H'(0,07)$ respecto a el numero de dosímetro determinado que existían 4 grupos de irradiación.

2.2. Pruebas de Tukey para los Valores de $H'(0.007)$

Dado que el usuario reporta que la irradiación de sus TLD había sido accidental, para descartar cualquier correlación en los grupos encontrados en la evaluación de la H' se procedió a realizar la prueba de medias de Tukey para una vía con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

La prueba de medias de una vía consiste en probar simultáneamente que las medias de varias poblaciones son iguales (en este caso de los grupos). Puesto que la irradiación había sido accidental era de esperarse que los cuatro grupos que contienen a los catorce pares de dosímetros no presentaran diferencias significativas entre ellos. Por lo tanto la prueba de hipótesis consiste de lo siguiente:

- $H_0: H'_i = H'_j$ para cada par i, j
- $H_1: H'_i \neq H'_j$ para cada par i, j

Debido a que los dosímetros se irradiaron en campos poco intensos su respuesta es cercana al nivel del ruido y por lo tanto había que elegir la técnica de comparación adecuada. La prueba de Tukey permite reducir la probabilidad de cometer un error de tipo I (rechazar una hipótesis H_0 cuando es verdadera) para el conjunto entero de comparaciones, para lo cual usa la denominada tasa de error de la familia, ξ].

Los resultados son presentados como un conjunto de intervalos de confianza para las diferencias entre pares de medias, estos se usan para determinar si las medias son diferentes:

- Si el intervalo no contiene al cero. Hay una diferencia estadísticamente significativa entre las medias correspondientes.
- Si el intervalo contiene cero. La diferencia entre las medias no es estadísticamente significativa.

3. RESULTADOS Y SU DISCUSION

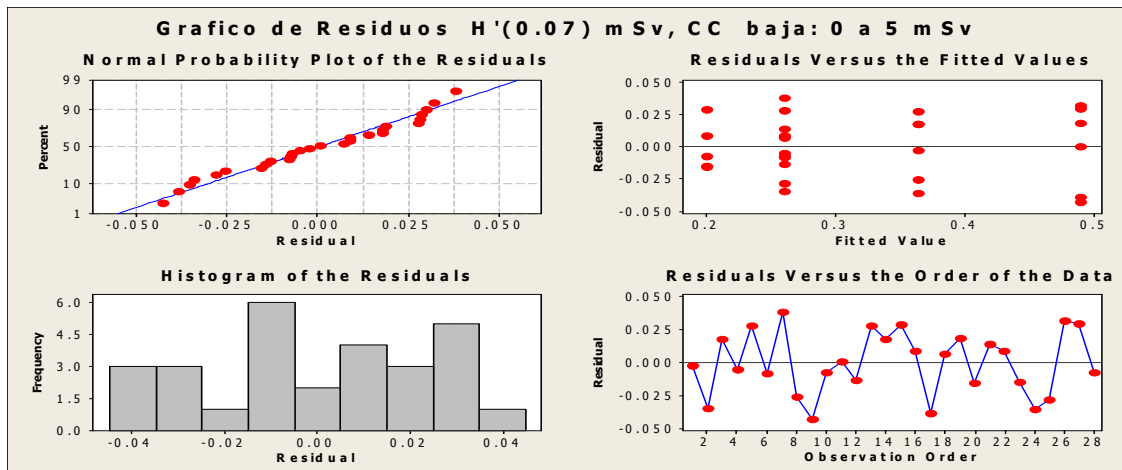
3.1. Curvas de Calibración: R(nc) vs H'(0.07)

Los parámetros de regresión y el resultado de las pruebas LOF y de normalidad se muestran en la tabla I. En esta se observa ambos los modelos pasan la prueba por LOF ($P > 0.05$); la prueba de normalidad solo es aceptable para el modelo de bajo rango que es el empleado en la evaluación, no obstante la literatura reporta que los límites de confianza de los valores ajustados son robustos a la falla de normalidad, [6].

Tabla I. Parámetros de regresión y estadísticos de las CC

CC	b nC	m mSv nC ⁻¹	LOF		Normalidad	
			F	P	AD	P
Bajo rango: 0 a 5 mSv	7.412 ± 2.305	99.886 ± 2.874	2.00	0.123	0.234	0.774
Alto rango: 5 a 50 mSv	149.79 ± 80.13	83.868 ± 8.670	0.12	0.987	0.808	0.032

Como información adicional se muestran las graficas de los residuos para los modelos de regresión, observe la simetría de los residuos respecto a los valores ajustados.



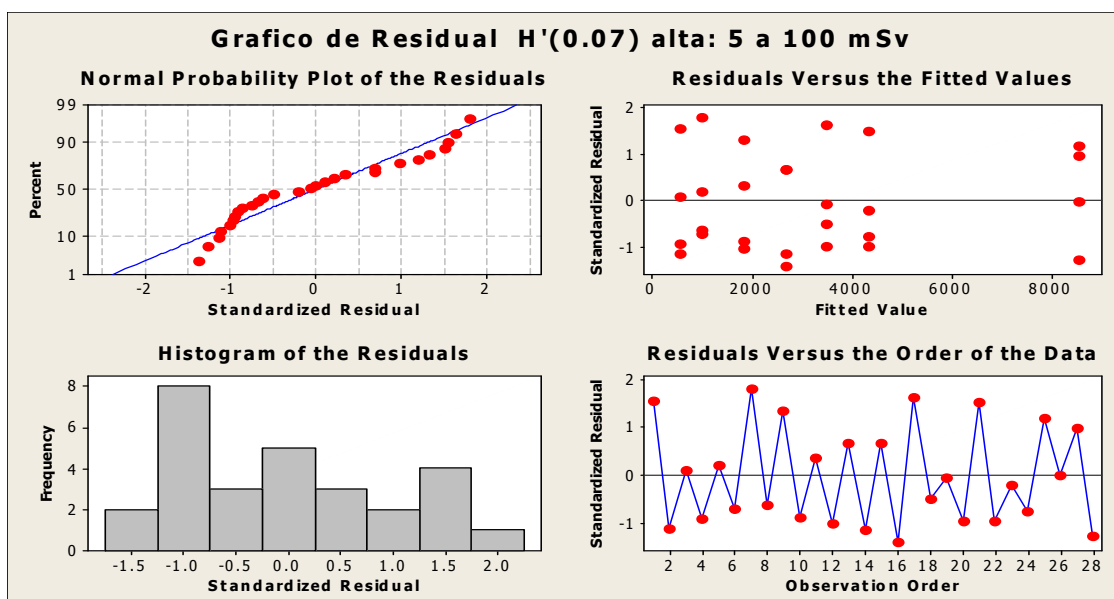
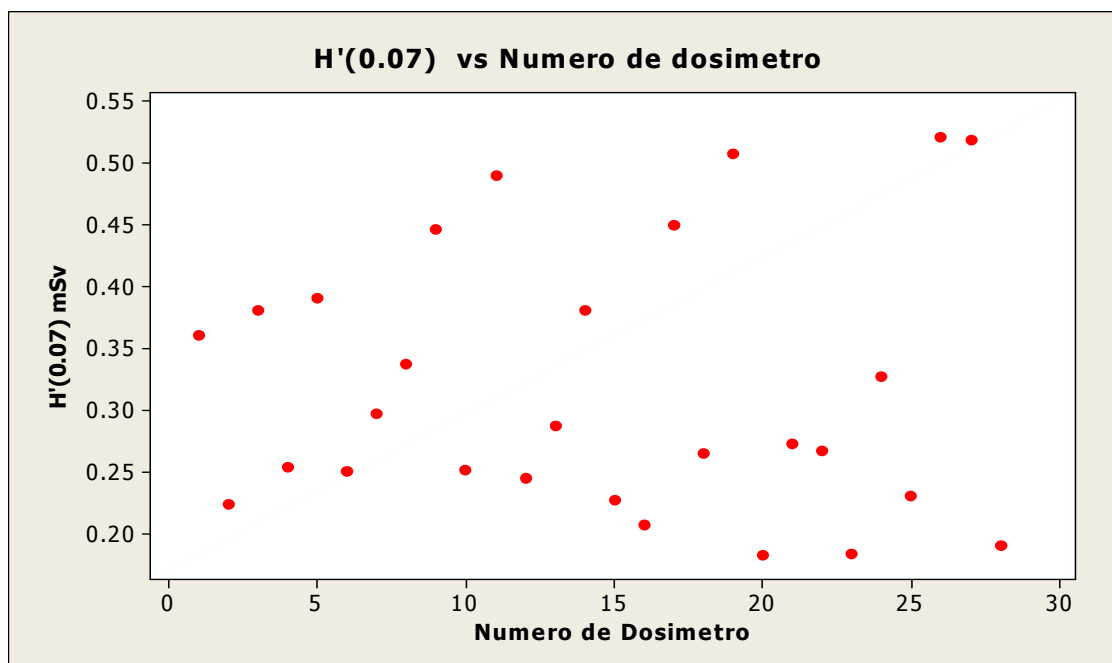


Figura 4. Graficas de los residuos del ajuste para los modelos de regresión.

3.2. Evaluación de la $H'(0.07)$

Una vez determinado el modelo de regresión este se empleo para evaluar los valores de $H'(0.07)$ para los meses de Julio y Agosto, los valores se grafican la figura 5 donde se muestra que los valores se pueden resumir en 4 grupos.



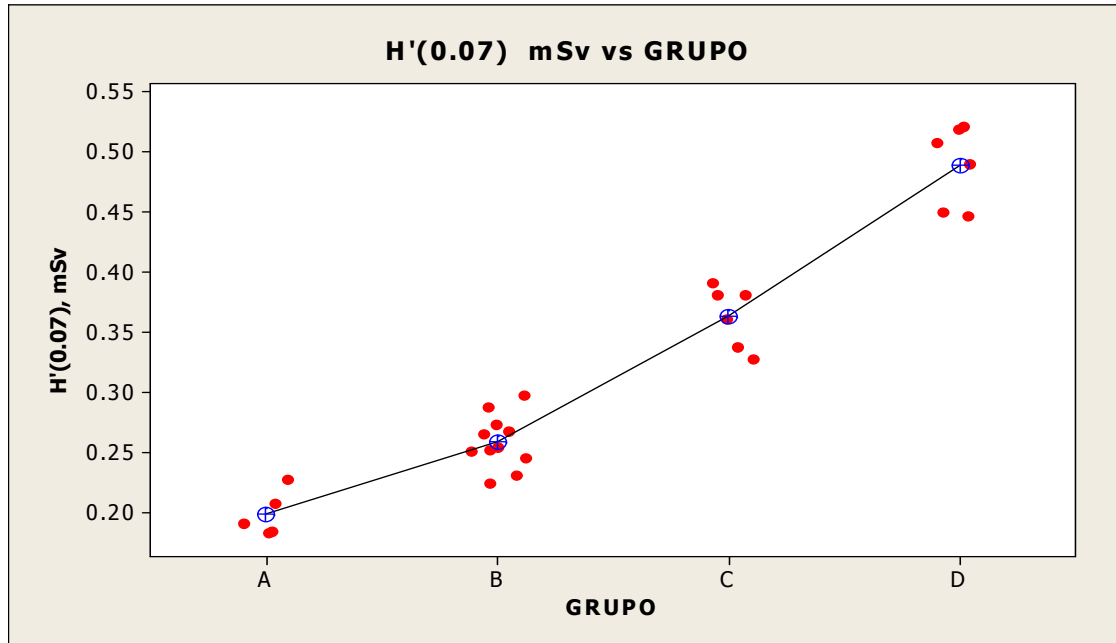


Figura 5. a) H' vs dosímetro y b) H' vs Grupo

3.3 Pruebas de Medias

Los resultados de la prueba de medias de Tukey para una vía muestran a continuación:

Prueba de una vía ANOVA: H'(0.07) mSv versus GRUPO

Source	DF	SS	MS	F	P
GRUPO	3	0.289074	0.096358	155.94	0.000
Error	24	0.014830	0.000618		
Total	27	0.303905			

S = 0.02486 R-Sq = 95.12% R-Sq(adj) = 94.51%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----
A	5	0.24093	0.01832	(-*-)
B	11	0.29969	0.02162	(-*-)
C	6	0.40199	0.02550	(-*-)
D	6	0.52713	0.03335	(-*-)
				-----+-----+-----+-----+-----
				0.30 0.40 0.50 0.60

Pooled StDev = 0.02486

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals. All Pairwise Comparisons among Levels of GRUPO. Individual confidence level = 98.90%

GRUPO = A subtracted from:

GRUPO	Lower	Center	Upper	
B	0.02179	0.05876	0.09573	(--*-)
C	0.11955	0.16106	0.20257	(--*--)
D	0.24469	0.28620	0.32771	(--*--)

-0.15 0.00 0.15 0.30

GRUPO = B subtracted from:

GRUPO	Lower	Center	Upper	
C	0.06751	0.10230	0.13709	(-*--)
D	0.19265	0.22744	0.26223	(-*--)

-0.15 0.00 0.15 0.30

GRUPO = C subtracted from:

GRUPO	Lower	Center	Upper	
D	0.08556	0.12514	0.16472	(-*--)

-0.15 0.00 0.15 0.30

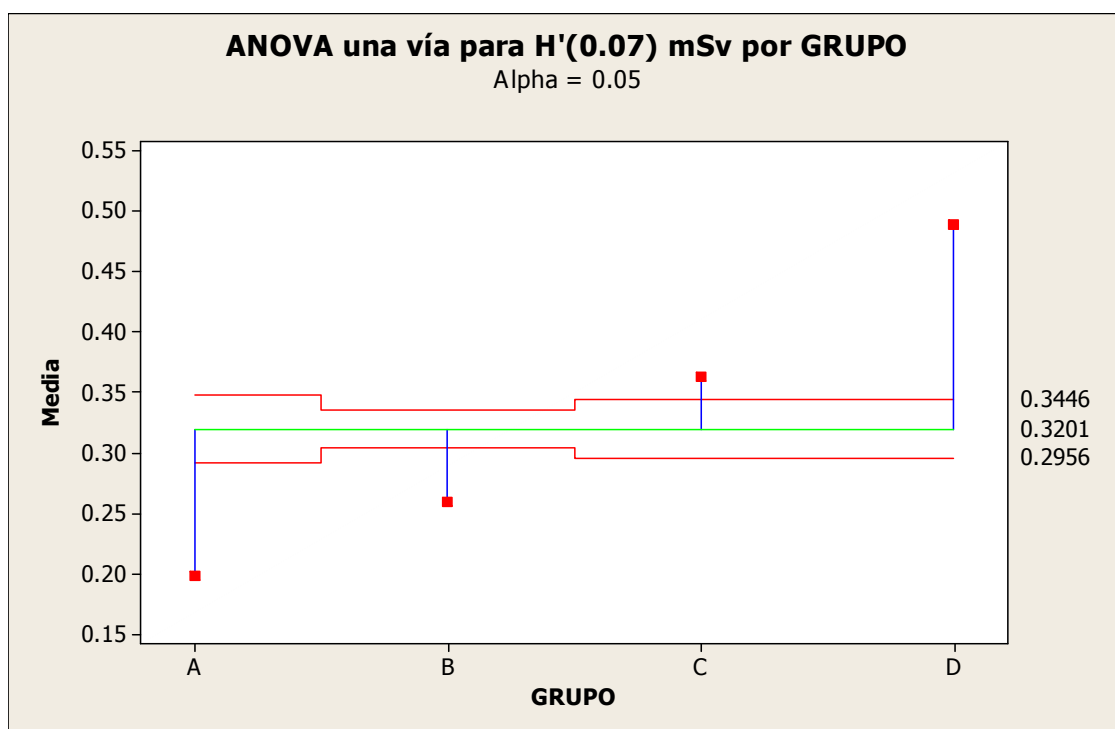


Figura 6. Pruebas de Media para valores de H' en función del Grupo.

Los resultados de las pruebas de Tukey, y graficas 5 y 6, permiten concluir que los grupos de dosímetros son estadísticamente significativos. Por lo tanto, la probabilidad que hayan sido

irradiados accidentalmente es menor a un 5%. En otras palabras el usuario los irradia intencionalmente tratando de reconstruir una curva de calibración.

4. CONCLUSIONES

El RGSR vigente es obsoleto tanto en los límites para exposición anual como en el uso de los índices de dosis para la estimación de la H_E , por lo que es urgente actualizarlo para hacerlo coherente con las recomendaciones de las NBS.

Los coeficientes de conversión $h_{p,D}(0.07; E, \Omega)$ y $h'_D(0.07; E, \Omega)$ son aproximadamente iguales para radiación beta por lo que para evaluar H_p es suficiente determinar H' .

El tamaño de maniquí no tiene influencia significativa en el valor de los coeficientes de conversión, por lo tanto los valores de estos coeficientes medidos en el maniquí de bloque pueden usarse para los otros maniqués.

Los valores de $H'(0,07)$ para los dosímetros corresponden en 4 grupos, cuyos valores son estadísticamente significativos.

La probabilidad que hayan sido irradiados accidentalmente es menor a un 5%. En otras palabras el usuario los irradia intencionalmente tratando de reconstruir una curva de calibración.

REFERENCIAS

1. Secretaria de Energía Minas e Industria Paraestatal CNSNS, *Reglamento General de Seguridad Radiológica*. Diario Oficial de la Federación, México (1988).
2. IAEA, *Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments*, Safety Report Series 16, IEAE Vienna, (2000).
3. International Agency Energy Atomic, *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna, (1996).
4. ISO 6980 part 3, *Reference beta particle radiations- Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence*, International Standardization Organization.
5. Minitab Release 14, Statistical Software. USA (2003).
6. <http://www.stat.wisc.edu/~shanhong/st333/disc/d5/d5.pdf>, (2003).