

Intercomparación de medidas de niveles de radiación ambiental 2019

Julio 2019

INTERCOMPARACIÓN DE MEDIDAS DE NIVELES DE RADIACIÓN AMBIENTAL

Irradiación en el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes

- 2019 -

INFORME FINAL

Elaborado por: N. A. Cornejo Díaz

Revisado por: C. García Mulas

Aprobado por: M. Embid Segura

Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes

CIEMAT

Junio de 2019

CONTENIDO

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS
2. CARACTERÍSTICAS DEL HAZ DE RADIACIÓN Y DE LA MAGNITUD RADIOLÓGICA DE INTERÉS USADA EN LA COMPARACIÓN
3. DESARROLLO OPERACIONAL DE LA CAMPAÑA
4. ELECCIÓN DE LOS VALORES DE LA DOSIS EQUIVALENTE AMBIENTAL
5. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS POR PARTE DE LOS LABORATORIOS PARTICIPANTES
6. PROCEDIMIENTO EMPLEADO EN LA EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS
 - 6.1. Criterios de evaluación de la norma ISO 14146 (2018)
 - 6.2. Criterios de evaluación de la norma ANSI/HPS 13.11 (2015)
7. RESULTADOS
 - 7.1. Presentación conforme a la norma ISO 14146
 - 7.2. Presentación conforme a la norma ANSI/HPS 13.11
8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS
9. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DE LAS INTERCOMPARACIONES DE LOS AÑOS 2001, 2007 Y 2013
10. CONCLUSIONES
11. REFERENCIAS

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha organizado cinco ejercicios de comparación entre laboratorios de dosimetría ambiental con el fin de verificar, para cada uno de los laboratorios participantes, el grado de trazabilidad de sus conjuntos dosímetros-lector a la referencia nacional de la magnitud de interés en la energía del ^{137}Cs . Para llevar a cabo esta campaña, al igual que en las anteriores, el CSN solicitó al Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) la realización de las irradiaciones en la citada energía.

En las instrucciones para la comparación [1] se detalla la magnitud de interés, su determinación en el laboratorio, las características del laboratorio de referencia para la radiación gamma en niveles de protección del CIEMAT, las condiciones de irradiación y la incertidumbre de la dosis equivalente ambiental a asignar a los dosímetros. Este documento se entregó con antelación a los 11 laboratorios participantes en la intercomparación.

En el presente informe se recoge un resumen del desarrollo operacional del ejercicio de comparación y un análisis de los resultados obtenidos por los laboratorios participantes, a partir de los requisitos establecidos en la norma ISO 14146 [2], orientada a las evaluaciones periódicas de los servicios de dosimetría ambiental.

Los sistemas de dosimetría ambiental han de ser homologados y los servicios acreditados respecto a las normas que establecen los requisitos de diseño y desempeño pertinentes, como la norma IEC 62387 [3] o la norma ANSI/HPS 13.37 [4]. La superación del presente ejercicio de comparación por los servicios de dosimetría no es, por tanto, condición suficiente para su aprobación o acreditación.

2. CARACTERÍSTICAS DEL HAZ DE RADIACIÓN Y DE LA MAGNITUD RADIOLÓGICA DE INTERÉS USADA EN LA COMPARACIÓN

Para las irradiaciones de todos los dosímetros se utilizó el mismo haz de radiación, cuyas características fundamentales se indican en la tabla 1. A efectos prácticos este haz puede considerarse como procedente de una fuente puntual, de tal modo que actuando sobre la distancia a la fuente se puede conseguir un campo de radiación con una fluencia suficientemente homogénea sobre una sección recta suficientemente extensa y perpendicular al eje del haz. La elección del tamaño de esa sección recta donde existe una fluencia uniforme depende del número de dosímetros que se irradian simultáneamente.

TABLA 1

Características del haz de referencia utilizado en la comparación

RADIONUCLEIDO	^{137}Cs
ACTIVIDAD NOMINAL (01-01-2019)	0,644 TBq
ÁNGULO NOMINAL DE APERTURA DEL COLIMADOR	7°
ZONA ÚTIL DEL HAZ (m)	1 – 10
DIÁMETRO DEL HAZ ÚTIL (cm)	14 – 140
RANGO DE TASAS DE KERMA EN AIRE, $\dot{K}_{\text{air}}$ (Gy/s) (para el 01/01/2019)	$2,09 \cdot 10^{-5}$ - $1,94 \cdot 10^{-7}$
INCERTIDUMBRE TÍPICA DE $\dot{K}_{\text{air}}$	0,85 %
CONTRIBUCIÓN DE DISPERSOS (Evaluada según la norma ISO 4037-1 [5]).	< 1 %

La magnitud radiológica objeto de la intercomparación es la dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$, cuya relación con la tasa de kerma en aire, $\dot{K}_{\text{air}}$, a través del tiempo efectivo de irradiación, t_{ef} , se obtiene como:

$$H^*(10) \text{ (Sv)} = \dot{K}_{\text{air}} \text{ (Gy/s)} \cdot h_K^*(10) \text{ (Sv/Gy)} \cdot t_{\text{ef}} \text{ (s)}$$

El coeficiente de conversión, $h_K^*(10)$, para la energía del ^{137}Cs es igual a 1,20 Sv/Gy, según la norma ISO 4037-3 [6].

Excepto en el caso del laboratorio 5, cuyos dosímetros tienen geometría esférica, el haz de radiación incidió de forma perpendicular a la superficie de la cara frontal del dosímetro (lado con el código del dosímetro), es decir, con un ángulo de incidencia igual a 0°. El valor nominal de la dosis equivalente ambiental a asignar a los dosímetros se estableció de acuerdo con el CSN. El número de dosímetros por laboratorio y los laboratorios participantes fueron aspectos definidos por el CSN, quien se encargó a su vez de la logística de la recogida y envío de los dosímetros desde los laboratorios al CIEMAT y viceversa.

El término “dosis equivalente ambiental” empleado en la denominación de la magnitud: $H^(10)$, es conceptualmente incorrecto, siendo su expresión correcta “equivalente de dosis ambiental” [7]. No obstante, en el presente informe se adopta la denominación primera por ser la recogida en la legislación española [8].*

3. DESARROLLO OPERACIONAL DE LA CAMPAÑA

En la campaña han participado 11 Laboratorios de Dosimetría Ambiental, uno de los cuales presentó dos sistemas dosimétricos diferentes. La identificación de los participantes fue: 1(A), 1(B), 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11. Los dosímetros llegaron al LMRI el día 8 de abril de 2019, excepto los correspondientes al laboratorio 11, que se recibieron el 9 de abril del 2019. Las irradiaciones de todos los dosímetros tuvieron lugar el 9 de abril del 2019.

Todos los laboratorios, excepto el 11, aportaron 25 dosímetros por cada sistema dosimétrico: 10 para ser irradiados, 10 para estimar la dosis de fondo y 5 de reserva por si debía repetirse alguna irradiación. Las irradiaciones se llevaron a cabo en dos tandas de cuatro y una de dos dosímetros. No fue necesario irradiar los dosímetros de reserva, por lo que éstos fueron utilizados también para obtener la media de la dosis de fondo.

El laboratorio 11 envió sólo 5 dosímetros, con 5 detectores cada uno: dos dosímetros para ser irradiados, dos dosímetros para las medidas del fondo y un dosímetro de reserva. En este caso las irradiaciones se realizaron en dos tandas de un dosímetro (5 detectores) cada una y fue necesario utilizar el dosímetro de reserva. El laboratorio informó los 10 valores de dosis equivalente ambiental determinados a partir de las lecturas de los 10 detectores de los dos dosímetros irradiados.

Las irradiaciones se realizaron en aire, para lo cual, los dosímetros se colocaron en un bastidor de hilos de nylon entrecruzados, suficientemente tensos y sujetos en un marco de plexiglás, quedando centrados en el campo de radiación. Como punto de referencia de los dosímetros se tomó el definido por su centro geométrico. El punto de referencia de los dosímetros quedó ubicado en un plano perpendicular al eje del haz donde la fluencia de fotones era suficientemente uniforme y el valor de $\dot{K}_{\text{air}}$ bien conocido. La distancia de ese plano a la cara frontal de la fuente fue de 2,962 m, disponiendo de un diámetro del haz útil igual a 41,5 cm.

El traslado de los dosímetros fue organizado por el CSN. Una vez efectuadas las irradiaciones, el CIEMAT devolvió los dosímetros al CSN en los embalajes originales con la relación de los números de identificación de los 10 dosímetros irradiados, la fecha de irradiación, la dosis asignada y los números de identificación de los 15 dosímetros no irradiados.

El 16 de mayo de 2019, el CSN envió al CIEMAT los resultados de los laboratorios participantes, según se detalla en el apartado 5.

4. ELECCIÓN DE LOS VALORES DE LA DOSIS EQUIVALENTE AMBIENTAL

Todos los dosímetros de los laboratorios participantes se irradiaron con una misma tasa de kerma en aire ($\dot{K}_{\text{air}} = 10 \text{ mSv/h}$), es decir, a la misma distancia de la fuente.

El valor de la dosis equivalente ambiental para cada sistema dosimétrico se eligió el mismo día de la irradiación y fue un valor comprendido entre los límites: $H^*(10)_{\text{max.}} = 0,65 \text{ mSv}$ y $H^*(10)_{\text{min.}} = 0,35 \text{ mSv}$, fijados con anterioridad y comunes a todos los Laboratorios, es decir: $H^*(10) = 0,5 \text{ mSv} \pm 30 \%$. El procedimiento que se siguió se basa en la generación de números aleatorios mediante un algoritmo de tipo logarítmico, similar al que se indica en la norma ANSI 13.11 [9]:

$$\log H^*(10) = \log H^*(10)_{\text{min.}} + \rho [\log H^*(10)_{\text{max.}} - \log H^*(10)_{\text{min.}}],$$

donde ρ es un número aleatorio uniformemente distribuido en el intervalo entre 0 y 1.

Tal como se detalla en las instrucciones para la comparación [1], la incertidumbre relativa de los valores convencionalmente verdaderos de la dosis equivalente ambiental es igual a 4,9 %, para una probabilidad de cobertura del 95% ($k = 2$).

5. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS POR PARTE DE LOS LABORATORIOS PARTICIPANTES

Todos los laboratorios presentaron los resultados de forma muy completa, en los que se incluyen además de las fechas de borrado, envío de los dosímetros al CSN y lectura de los dosímetros en el laboratorio, los siguientes datos:

- ❑ Identificación de los dosímetros de tránsito, con su fondo acumulado, el valor medio correspondiente y su desviación típica.
- ❑ Identificación de los dosímetros de reserva y su fondo acumulado.
- ❑ Identificación de los dosímetros irradiados, con la lectura bruta de cada uno y la correspondiente lectura neta, obtenida al restar de la lectura bruta el valor medio del fondo acumulado durante el periodo de tránsito. También se incluyó el valor medio de las lecturas netas y su desviación típica.

Los laboratorios 1 y 4 no indicaron correctamente las unidades de medida, por lo que fueron instados a revisar sus informes. Los resultados corregidos se recibieron el mismo día en el LMRI.

El laboratorio 7 no realizó la substracción de las dosis de fondo recibidas por los dosímetros porque su límite de determinación es 0,036 mSv y este valor es superior a la dosis acumulada durante los cuatro días transcurridos entre el borrado y la lectura de los dosímetros.

6. PROCEDIMIENTO EMPLEADO EN LA EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

El hecho de que un dosímetro ambiental, calibrado en unidades de dosis equivalente ambiental, sirva para poder estimar de manera razonablemente conservadora las magnitudes limitadoras de ICRP, no lo hace muy diferente, en su objetivo final, a un dosímetro personal. De ahí que en las comparaciones anteriores, a falta de normas específicas, haya resultado perfectamente plausible emplear procedimientos de evaluación análogos a los empleados para la dosimetría personal.

En la nueva versión de la norma ISO 14146 de 2018 se ha dado cuenta de la necesidad de incorporar criterios específicos para la evaluación periódica del desempeño de los servicios de dosimetría ambiental y se han incluido apartados dedicados a la vigilancia radiológica ambiental con dosímetros pasivos o activos. Por otra parte, el título de la norma dejó de hacer referencia exclusiva a los sistemas de dosimetría personal [2].

El procedimiento seguido en la presente comparación, tanto en los aspectos organizativos como en la evaluación de los resultados, está en correspondencia con la norma ISO 14146 [2]. Adicionalmente se han calculado los parámetros de evaluación establecidos en la norma ANSI/HPS 13.11 [9], sólo con el fin de comparar los resultados de los laboratorios con los obtenidos en las comparaciones anteriores.

6.1. Criterios de evaluación de la norma ISO 14146 (2018)

Para la energía del ^{137}Cs y para la radiación ambiental, la norma establece que para cada dosímetro “i” del laboratorio, irradiado a un valor convencionalmente verdadero $H^*(10)_{\text{REF}}$, el cociente R_i del valor neto de la dosis equivalente ambiental $H^*(10)_i$ determinada con el dosímetro y el valor convencionalmente verdadero $H^*(10)_{\text{REF}}$, debe cumplir con el siguiente criterio:

$$R_i = \frac{H^*(10)_i}{H^*(10)_{\text{REF}}} \quad (1)$$

$$0,80 \leq R_i \leq 1,33 \quad (2)$$

Se acepta que como máximo el 10 % de las estimaciones de dosis de cada sistema de dosimetría evaluado se encuentre fuera de los límites indicados, es decir, en el caso de 10 dosímetros irradiados, para que el resultado se considere satisfactorio sólo uno de los valores de R_i podrá situarse fuera de los límites. La norma precisa que la consideración anterior es consistente con una probabilidad de cobertura del 95%, pues si bien la probabilidad del 95% correspondería a una tasa de fallo de 1/20, la tasa tolerada de 1/10 permite un margen adicional para incluir la incertidumbre inherente al valor convencionalmente verdadero.

Según la norma, el valor de la dosis equivalente ambiental de referencia para la evaluación periódica de los sistemas de dosimetría ambiental deberá estar entre 0,01 mSv y 10 Sv.

6.2. Criterios de evaluación de la norma ANSI/HPS 13.11 (2015)

En esta norma se define el sesgo relativo B , como el valor promedio de las desviaciones relativas P_i de las lecturas netas de los dosímetros, siendo P_i y B definidos según:

$$P_i = \frac{H^*(10)_i - H^*(10)_{\text{REF}}}{H^*(10)_{\text{REF}}}; \quad B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

donde: $H^*(10)_{\text{REF}}$ y $H^*(10)_i$ tienen el mismo significado que en la ecuación (1) y n es el número total de dosímetros evaluados para cada laboratorio (en nuestro caso $n = 10$). El parámetro B es, en consecuencia, un estimador del defecto de “ajuste” o desviación relativa promedio del laboratorio respecto al valor de referencia.

Otro parámetro de importancia es la repetibilidad de las medidas efectuadas sobre el grupo de dosímetros irradiados a la misma dosis equivalente ambiental de referencia. Como estimador de la repetibilidad o grado de variación de los resultados se considera la desviación típica, S , del conjunto P_i ($i = 1, \dots, 10$) de desviaciones relativas de las medidas individuales:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B - P_i)^2}{n - 1}} \quad (4)$$

La norma ANSI/HPS 13.11 (2015) [9] no hace distinción sobre el origen o causa de la incertidumbre y define un estimador de la desviación global del laboratorio, denotado como Q , que se obtiene mediante la combinación cuadrática de la desviación relativa promedio B y la desviación típica S , según:

$$B^2 + S^2 = Q^2 \quad (5)$$

Al parámetro Q se le aplica un límite de tolerancia o de aceptación, L , de tal modo que los resultados de un laboratorio cumplirán con la norma siempre que $Q \leq L$. Para los fotones, en el rango de las dosis asociadas a condiciones normales de exposición, se establece que $L = 0,3$.

En la versión anterior de la norma ANSI/HPS 13.11, el parámetro Q se obtenía como la suma del valor absoluto de B y la desviación típica S . El nivel de tolerancia se fijaba en $L = 0,4$.

7. RESULTADOS

En las siguientes tablas se presentan los resultados de cada laboratorio¹. En ellas se indica:

- La fecha de borrado de los dosímetros y su envío al CSN.
- La fecha de irradiación de los dosímetros en el LMRI del CIEMAT.
- La fecha de lectura de los dosímetros en el laboratorio.
- Los días transcurridos desde la fecha de borrado de los dosímetros hasta su lectura.
- La dosis equivalente ambiental acumulada en los dosímetros de tránsito, por día.
- El porcentaje de corrección debida a la dosis equivalente ambiental acumulada en los dosímetros de tránsito.
- La dosis equivalente ambiental de referencia, $H^*(10)_{\text{REF}}$, asignada en el LMRI del CIEMAT.
- La identificación de los dosímetros irradiados.
- La lectura neta de los dosímetros irradiados, $H^*(10)_i$.
- Las respuestas relativas, R_i , calculadas según la fórmula (1).
- Las desviaciones relativas de las lecturas netas, P_i , según la fórmula (3).
- El valor medio de las lecturas netas obtenidas por el laboratorio, $\bar{H}^*(10)$.
- La desviación típica relativa de las lecturas netas, $s/\bar{H}^*(10)$, considerando la desviación típica del valor medio de las lecturas del fondo.
- El valor medio de R_i , es decir, la respuesta promedio de los 10 dosímetros, denotada como $\bar{R}$.
- El valor máximo de $R_i = \frac{H^*(10)_i}{H^*(10)_{\text{REF}}}$ correspondiente a los 10 dosímetros, denotado como: $(R_i)_{\text{max}}$.
- El valor mínimo de $R_i = \frac{H^*(10)_i}{H^*(10)_{\text{REF}}}$ correspondiente a los 10 dosímetros, denotado como: $(R_i)_{\text{min}}$.
- El límite superior de tolerancia para la respuesta relativa, según la ecuación (2).
- El límite inferior de tolerancia para la respuesta relativa, según la ecuación (2).
- Si se cumple o no con los límites de tolerancia de norma ISO 14146 (2018). Entre paréntesis se indica el número de valores de R_i que están fuera de los límites especificados.
- Los parámetros: B , S y Q , calculados de acuerdo con las expresiones (3), (4) y (5), respectivamente.
- Si el sistema cumple o no con los requisitos de la norma ANSI 13.11 (2015).

¹ El laboratorio 1 ha participado con dos sistemas dosimétricos, por lo que se ha adicionado la letra "A" o "B" para diferenciarlos, según corresponda. De esta forma, los dos sistemas quedan identificados como: laboratorio 1(A) y laboratorio 1(B).

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 1(A)

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	05/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	08/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	12/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	7
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	2,24
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	3,5

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,430
---	-------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
1A-1	0,441	1,03	0,03	0,436	3,1 %
1A-2	0,436	1,01	0,01		
1A-3	0,425	0,99	-0,01		
1A-4	0,416	0,97	-0,03		
1A-5	0,440	1,02	0,02		
1A-6	0,457	1,06	0,06		
1A-7	0,453	1,05	0,05		
1A-8	0,417	0,97	-0,03		
1A-9	0,433	1,01	0,01		
1A-10	0,434	1,01	0,01		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
1,01	1,06	0,97	1,33	0,80	SI (0)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
0,013	0,032	0,034	0,300	SI

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 1(B)

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	05/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	08/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	11/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	6
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	2,35
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	3,6

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,370
---	-------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
1B-1	0,379	1,02	0,02	0,380	1,8 %
1B-2	0,372	1,01	0,01		
1B-3	0,385	1,04	0,04		
1B-4	0,387	1,05	0,05		
1B-5	0,384	1,04	0,04		
1B-6	0,369	1,00	0,00		
1B-7	0,389	1,05	0,05		
1B-8	0,372	1,01	0,01		
1B-9	0,382	1,03	0,03		
1B-10	0,378	1,02	0,02		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
1,03	1,05	1,00	1,33	0,80	SI (0)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
0,026	0,019	0,032	0,300	SI

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 2

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	05/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	05/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	11/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	6
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	6,12
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	7,4

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,470
--	--------------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
1	0,452	0,96	-0,04	0,459	4,6 %
2	0,503	1,07	0,07		
3	0,452	0,96	-0,04		
4	0,442	0,94	-0,06		
5	0,442	0,94	-0,06		
6	0,473	1,01	0,01		
7	0,462	0,98	-0,02		
8	0,442	0,94	-0,06		
9	0,483	1,03	0,03		
10	0,442	0,94	-0,06		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
0,98	1,07	0,94	1,33	0,80	SI (0)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
-0,023	0,045	0,050	0,300	SI

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 3

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	08/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	08/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	12/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	4
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	2,35
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	1,8

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,500
--	--------------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
3-D1	0,505	1,01	0,01	0,512	1,2 %
3-D2	0,512	1,02	0,02		
3-D3	0,510	1,02	0,02		
3-D4	0,509	1,02	0,02		
3-D5	0,508	1,02	0,02		
3-D6	0,512	1,02	0,02		
3-D7	0,509	1,02	0,02		
3-D8	0,513	1,03	0,03		
3-D9	0,516	1,03	0,03		
3-D10	0,527	1,05	0,05		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
1,02	1,05	1,01	1,33	0,80	SI (0)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
0,024	0,012	0,027	0,300	SI

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 4

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	08/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	08/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	11/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	3
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	4,03
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	2,0

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,580
--	--------------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
17006	0,633	1,09	0,09	0,602	14,7 %
17007	0,457	0,79	-0,21		
17011	0,538	0,93	-0,07		
17015	0,597	1,03	0,03		
17025	0,754	1,30	0,30		
17027	0,563	0,97	-0,03		
17030	0,714	1,23	0,23		
17035	0,554	0,96	-0,04		
17042	0,553	0,95	-0,05		
17044	0,654	1,13	0,13		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
1,04	1,30	0,79	1,33	0,80	SI (1)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
0,038	0,153	0,157	0,300	SI

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 5

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	05/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	05/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	11/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	6
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	2,87
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	3,7

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,450
--	--------------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
A941	0,453	1,01	0,01	0,449	2,0 %
A942	0,461	1,02	0,02		
A943	0,462	1,03	0,03		
A944	0,449	1,00	0,00		
A945	0,434	0,97	-0,03		
A946	0,454	1,01	0,01		
A947	0,441	0,98	-0,02		
A948	0,443	0,99	-0,01		
A949	0,444	0,99	-0,01		
A950	0,451	1,00	0,00		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
1,00	1,03	0,97	1,33	0,80	SI (0)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
-0,002	0,020	0,020	0,300	SI

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 6

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	04/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	05/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	11/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	7
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	3,21
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	3,5

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,630
---	-------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
6/D1	0,610	0,97	-0,03	0,618	1,2%
6/D2	0,613	0,97	-0,03		
6/D3	0,615	0,98	-0,02		
6/D4	0,616	0,98	-0,02		
6/D5	0,627	0,99	-0,01		
6/D6	0,610	0,97	-0,03		
6/D7	0,610	0,97	-0,03		
6/D8	0,622	0,99	-0,01		
6/D9	0,629	1,00	0,00		
6/D10	0,628	1,00	0,00		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
0,98	1,00	0,97	1,33	0,80	SI (0)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
-0,019	0,012	0,023	0,300	SI

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 7

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	08/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	08/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	12/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	4
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	-
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	0 ⁽²⁾

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,460
---	-------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
1500	0,361	0,78	-0,22	0,372	3,8%
1502	0,358	0,78	-0,22		
1503	0,380	0,83	-0,17		
1504	0,363	0,79	-0,21		
1515	0,363	0,79	-0,21		
1516	0,398	0,87	-0,13		
1518	0,382	0,83	-0,17		
1521	0,372	0,81	-0,19		
1524	0,354	0,77	-0,23		
1525	0,384	0,83	-0,17		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
0,81	0,87	0,77	1,33	0,80	NO (5)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
-0,192	0,031	0,195	0,300	SI

² El laboratorio consideró iguales a cero las lecturas de los dosímetros de tránsito, por ser inferiores al $LD = 0,036$ mSv.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 8

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	05/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	05/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	11/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	6
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	6,67
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	24,7

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,450
---	-------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
1	0,100	0,22	-0,78	0,122	16,0%
2	0,098	0,22	-0,78		
3	0,111	0,25	-0,75		
4	0,104	0,23	-0,77		
5	0,114	0,25	-0,75		
6	0,154	0,34	-0,66		
7	0,131	0,29	-0,71		
8	0,143	0,32	-0,68		
9	0,131	0,29	-0,71		
10	0,131	0,29	-0,71		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
0,27	0,34	0,22	1,33	0,80	NO (10)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
-0,730	0,042	0,731	0,300	NO

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 9

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	05/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	05/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	11/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	6
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	2,68
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	2,8

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,620
---	-------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
1052	0,576	0,93	-0,07	0,580	0,5%
1053	0,582	0,94	-0,06		
1056	0,579	0,93	-0,07		
1290	0,582	0,94	-0,06		
1610	0,578	0,93	-0,07		
1611	0,580	0,93	-0,07		
1633	0,580	0,94	-0,06		
1634	0,580	0,94	-0,06		
1663	0,578	0,93	-0,07		
1664	0,586	0,95	-0,05		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
0,94	0,95	0,93	1,33	0,80	SI (0)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
-0,064	0,005	0,065	0,300	SI

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 10

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	05/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	05/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	11/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	6
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	1,10
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	2,3

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,390
---	-------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
0000367	0,285	0,73	-0,27	0,282	6,0%
0000368	0,290	0,74	-0,26		
0000381	0,296	0,76	-0,24		
0000382	0,295	0,76	-0,24		
0000383	0,298	0,76	-0,24		
0000384	0,298	0,76	-0,24		
0000385	0,277	0,71	-0,29		
0000393	0,263	0,67	-0,33		
0000397	0,269	0,69	-0,31		
0000399	0,249	0,64	-0,36		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
0,72	0,76	0,64	1,33	0,80	NO (10)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
-0,277	0,044	0,281	0,300	SI

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO 11

MAGNITUD RADIOLÓGICA OBJETO DE LA MEDIDA: $H^*(10)$

Fecha de borrado de los dosímetros	05/04/2019
Fecha de envío de los dosímetros al CSN	08/04/2019
Fecha de irradiación de los dosímetros	09/04/2019
Fecha de lectura de los dosímetros en el Laboratorio	12/04/2019
Días transcurridos desde el borrado a la lectura	7
Dosis de tránsito acumulada en los dosímetros por día ($\mu\text{Sv/día}$)	7,43
Corrección debida a la dosis acumulada en los dosímetros de tránsito (%)	8,1

Dosis equivalente ambiental de referencia (mSv)	0,520
--	--------------

DOSÍMETROS IRRADIADOS					
IDENTIFICACIÓN	$H^*(10)_i$ / mSv	R_i	P_i	$\bar{H}^*(10)$ (mSv)	$s/\bar{H}^*(10)$
INTER-1/D1	0,555	1,07	0,07	0,589	11,0%
INTER-1/D2	0,568	1,09	0,09		
INTER-1/D3	0,692	1,33	0,33		
INTER-1/D4	0,497	0,96	-0,04		
INTER-1/D5	0,509	0,98	-0,02		
INTER-3/D11	0,603	1,16	0,16		
INTER-3/D12	0,607	1,17	0,17		
INTER-3/D13	0,592	1,14	0,14		
INTER-3/D14	0,688	1,32	0,32		
INTER-3/D15	0,573	1,10	0,10		

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO 14146 (2018)					
PARÁMETROS EVALUADORES					
$\bar{R}$	$(R_i)_{\max}$	$(R_i)_{\min}$	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	CUMPLE
1,13	1,33	0,96	1,33	0,80	SI (0)

EVALUACIÓN SEGÚN LA NORMA ANSI/HPS 13.11 (2015)				
PARÁMETROS EVALUADORES				
B	S	Q	L	CUMPLE
0,132	0,124	0,181	0,300	SI

7.1. Presentación conforme a la norma ISO 14146

En la figura 1 se representa el gráfico que ilustra el cumplimiento de los laboratorios de dosimetría ambiental con los niveles de tolerancia establecidos en la norma ISO 14146 [2]. Se muestra la ubicación de las respuestas relativas, R_i , de los 10 dosímetros de cada laboratorio, calculadas según la ecuación 1 del apartado 6.1. Los límites de tolerancia de la respuesta relativa se representan con líneas de puntos. Para que el resultado de un laboratorio se considere satisfactorio, al menos 9 valores de R_i deben estar dentro de los límites de tolerancia. Para poder distinguir los resultados de cada participante se han utilizado diferentes símbolos y colores, cuya indicación aparece en la leyenda de la parte inferior de la figura.

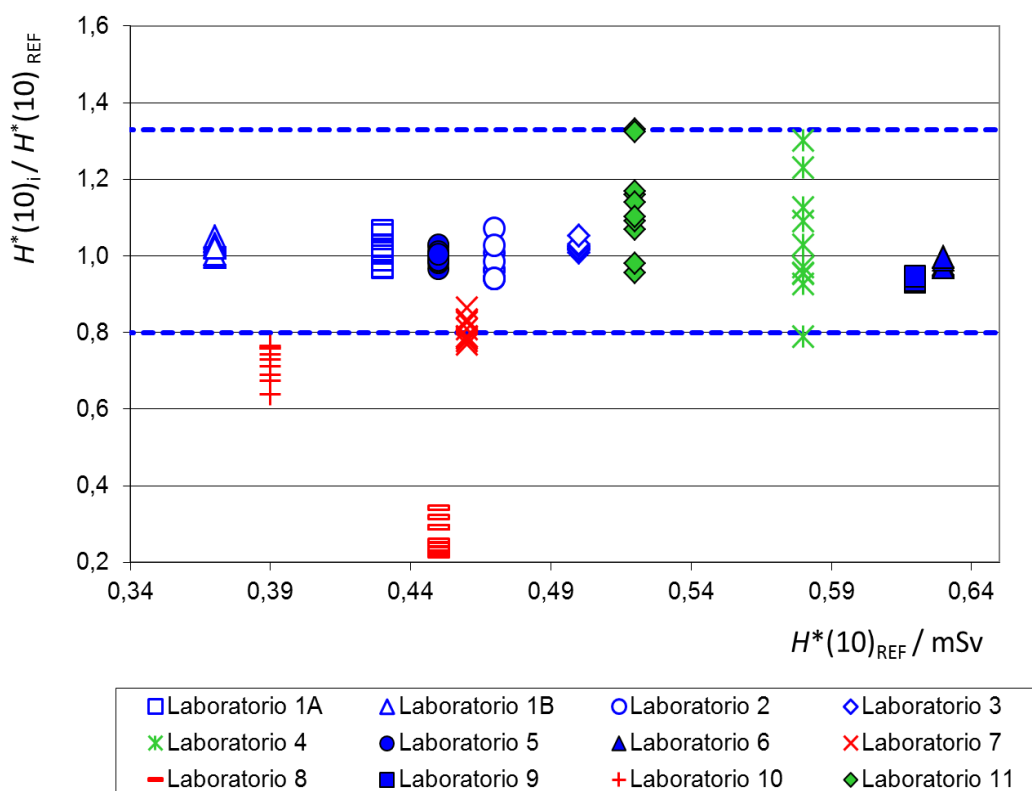


Figura 1: Resultados de los laboratorios participantes, según la norma ISO 14146 (2018)

Como complemento del gráfico anterior, la tabla 2 recoge los valores medios, máximos y mínimos ($\bar{R}$, $R_{\min}$ y $R_{\max}$, respectivamente) de las respuestas relativas del conjunto de dosímetros de cada laboratorio. Se indican además los rangos de variación de las respuestas, ΔR , los límites de tolerancia establecidos por la norma ISO 14146, así como el total de valores de R_i que está fuera de estos límites, denotado como N_f . En la tabla se han sombreado, con color rojo, los valores que no cumplen con los criterios de aceptación de la norma. En la última columna se han marcado, con color anaranjado, las celdas de los laboratorios con el 10 % de los resultados fuera de los límites de tolerancia y con color rojo las celdas correspondientes a los laboratorios con más del 10 % de los resultados fuera de los límites de tolerancia. Se han subrayado los valores de ΔR superiores al 10 %.

TABLA 2

Respuesta relativa de los sistemas de dosimetría participantes en la comparación

Laboratorio	$\bar{R}$	$R_{\min}$	$R_{\max}$	ΔR	L_{inferior}	L_{superior}	N_f
1A	1,01	0,97	1,06	0,09	0,80	1,33	0
1B	1,03	1,00	1,05	0,05			0
2	0,98	0,94	1,07	<u>0,13</u>			0
3	1,02	1,01	1,05	0,04			0
4	1,04	0,79	1,30	<u>0,51</u>			1
5	1,00	0,97	1,03	0,06			0
6	0,98	0,97	1,00	0,03			0
7	0,81	0,77	0,87	0,10			5
8	0,27	0,22	0,34	<u>0,12</u>			10
9	0,94	0,93	0,95	0,02			0
10	0,72	0,64	0,76	<u>0,12</u>			10
11	1,13	0,96	1,33	<u>0,37</u>			0

Los laboratorios 8 y 10 tienen todos los puntos fuera de la banda de aceptación, como se puede apreciar también en la figura 1, mientras que el laboratorio 7 tiene 5 resultados fuera de los límites de tolerancia. El laboratorio 4 tiene un solo valor ligeramente fuera de los límites de tolerancia, con una mayor dispersión de los resultados ($\Delta R = 0,51$). La dispersión de los resultados es también importante en el caso del laboratorio 11 ($\Delta R = 0,37$).

Los resultados de los laboratorios 1A, 1B, 2, 3, 4, 5, 6, 9, y 11 son satisfactorios en el marco de la norma ISO 14146.

7.2. Presentación conforme a la norma ANSI/HPS 13.11

La tabla 3 resume los resultados obtenidos por los diferentes laboratorios. En la segunda columna se recogen los valores del sesgo relativo promedio, B , según la ecuación (3). La tercera columna contiene la desviación típica de los resultados, S , calculada según la ecuación (4) y en la cuarta columna aparecen los valores de la desviación global, Q , calculados a partir de la fórmula (5). Se han sombreado con color anaranjado los valores de los parámetros B y S que merecen mayor atención por parte de los laboratorios correspondientes. La desviación del laboratorio 8 supera el nivel de tolerancia global establecido por la norma, por lo que se ha marcado con color rojo.

En la figura 2, para una mejor visualización de los resultados, se muestran los valores del sesgo relativo, B , de cada laboratorio. Las barras de error corresponden a las desviaciones típicas correspondientes (Valores de S en la tercera columna de la tabla 3).

TABLA 3

Resultados de los laboratorios participantes, según los parámetros establecidos en la norma ANSI 13.11

Laboratorio	B	S	Q
1A	0,013	0,032	0,034
1B	0,026	0,019	0,032
2	-0,023	0,045	0,050
3	0,024	0,012	0,027
4	0,038	0,153	0,157
5	-0,002	0,020	0,020
6	-0,019	0,012	0,023
7	-0,192	0,031	0,195
8	-0,730	0,042	0,731
9	-0,064	0,005	0,065
10	-0,277	0,044	0,281
11	0,132	0,124	0,181

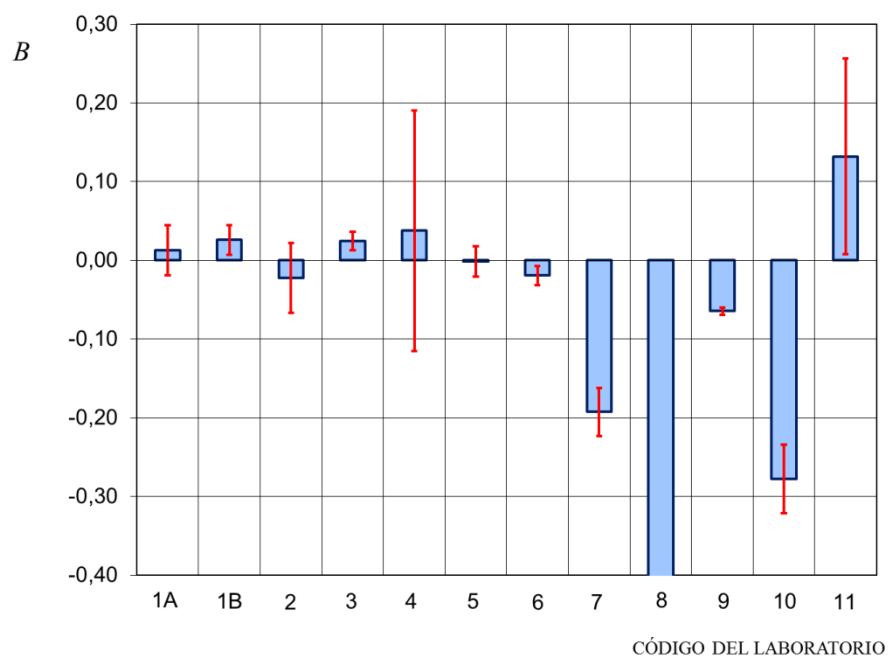


Figura 2: Resultados de los diferentes laboratorios, según los indicadores de la norma ANSI 13.11(2015)

8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los valores de H^* (10) impartidos a los dosímetros de los diferentes centros estuvieron comprendidos entre 370 y 630 μSv . Las correcciones debidas a la dosis equivalente ambiental acumulada durante el período de tránsito representaron entre el 1,8 % y el 8,1 % ⁽³⁾ de las lecturas, con una corrección promedio del 3,9 % ⁽⁴⁾. El tiempo entre el borrado de los dosímetros y la lectura en los laboratorios estuvo entre 3 y 7 días, con un promedio de 6 días. La dosis equivalente ambiental acumulada por día de tránsito varió entre 1,1 μSv y 7,4 μSv , con un valor promedio de 3,7 μSv .

Los resultados recogidos en la figura 1 y en la tabla 2 indican que tres laboratorios (Laboratorios 7, 8 y 10) no cumplen con los requisitos de la norma ISO 14146 (2018). En estos laboratorios, la **respuesta relativa** está fuera del margen de tolerancia en más del 10 % de los dosímetros. La causa de tales desviaciones puede ser el diseño inadecuado de los dosímetros. El laboratorio 8 envió detectores termoluminiscentes en sobres delgados de plástico, sin carcasa exterior. Por otro lado, los laboratorios 7 y 10 enviaron los detectores en sus bandejas o soportes, pero sin la carcasa exterior que debe conformar el dosímetro. En el año 2013 el laboratorio 10 había mostrado desviaciones importantes, como puede apreciarse en la tabla 4 del apartado 9.

Uno de los sistemas dosimétricos (Laboratorio 4) tiene sólo 1 resultado fuera de los límites de tolerancia, por lo que cumple con el criterio de aceptación de la norma ISO 14146, aunque su desempeño es susceptible de mejora. En particular, la reducción de la desviación típica de los resultados es muy recomendable. La diferencia entre los valores máximo y mínimo de las respuestas relativas de los dosímetros (ΔR) resultó 0,51 (Ver la tabla 2.), con una desviación típica de las lecturas (parámetro S en la tabla 3) superior al 15 %. Por otro lado, en el caso del laboratorio 11, el intervalo de variación de la respuesta relativa, ΔR , resultó 0,37 (Ver la tabla 2.), con S superior al 12% (Ver la tabla 3.). Estos dos laboratorios son los que presentan peor repetibilidad en los resultados. Debe señalarse que el laboratorio 11 sólo envió dos dosímetros para irradiar, con cinco detectores cada uno, por lo que cada valor reportado corresponde a la medición realizada con un solo detector.

En relación con el **parámetro de desviación global**, Q , siete de los doce sistemas de dosimetría presentaron valores inferiores a 0,1 (el 58 %), mientras que en diez de los sistemas estos valores resultaron inferiores a 0,2 (el 83 %).

La **repetibilidad** de las medidas puede considerarse buena, ya que diez de los doce laboratorios presentaron valores de $S < 0,05$. Sin embargo, en dos de los casos resultó que $S > 0,10$. Son precisamente los sistemas dosimétricos 4 y 11, sobre los que ya se comentó, en relación con el cumplimiento de los requisitos de la norma ISO 14146.

³ La corrección del laboratorio 8 representó el 24,7 %, debido a que las dosis evaluadas resultaron excesivamente bajas. Este valor extremo no se incluyó en la estadística.

⁴ El laboratorio 7 no realizó tales correcciones, según se indicó en el apartado 5.

En cuanto al **defecto de ajuste del sistema dosimétrico** para la energía del ^{137}Cs , se puede considerar bueno en general, ya que para ocho de los doce laboratorios se cumple que $|B| < 0,10$ (el 67 %), mientras que en nueve de los doce participantes resultó que $|B| < 0,15$ (el 75%). Los tres laboratorios restantes (laboratorios 7, 8 y 10) presentaron valores de $B = -0,192$, $-0,730$ y $-0,277$, respectivamente. Como se analizó en los párrafos anteriores, estos laboratorios no cumplen con los requisitos de la norma ISO 14146.

9. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DE LAS INTERCOMPARACIONES DE LOS AÑOS 2001, 2007 y 2013

La mayoría de los laboratorios participantes lo hicieron también en las comparaciones de los años 2001, 2007 y 2013. En la tabla 4 se comparan los valores de B y S obtenidos en estas comparaciones. Para facilitar la interpretación de los datos, las celdas se han sombreado siguiendo los siguientes criterios:

- Para resaltar una mejoría con relación al ejercicio anterior, las celdas correspondientes se han sombreado con color verde.
- Para resaltar un empeoramiento del parámetro con relación al ejercicio anterior, la celda correspondiente se ha sombreado con diferentes tonos de color amarillo, con progresión hacia el anaranjado en la medida en la que el empeoramiento haya sido continuado.

TABLA 4

Comparación de los valores de B y S obtenidos en los diferentes ejercicios

Código	B				S			
	2019	2013	2007	2001	2019	2013	2007	2001
1(A)	0,013	-0,037	0,047	-0,030	0,032	0,070	0,022	0,027
1(B)	0,026	0,017	-0,001	0,042	0,019	0,014	0,023	0,015
2	-0,023	0,005	0,097	-	0,045	0,066	0,043	-
3	0,024	-0,138	-0,038	-0,088	0,012	0,016	0,024	0,013
4	0,038	-0,239	-	-	0,153	0,024	-	-
6	-0,019	0,033	0,022	-	0,012	0,026	0,014	-
7	-0,192	-0,123	0,030	-0,001	0,031	0,059	0,058	0,060
9	-0,064	-0,069	-0,023	-0,013	0,005	0,016	0,055	0,007
10	-0,277	-0,313	-	-	0,044	0,088	-	-
11	0,132	-0,182	-0,237	-0,088	0,124	0,038	0,055	0,145

Nota: Los laboratorios 5 y 8 participan por primera vez.

Como puede comprobarse en la tabla 4, la **desviación relativa promedio**, B , ha mejorado en siete de los diez sistemas dosimétricos analizados, con respecto al ejercicio anterior. Estos sistemas son: 1(A), 3, 4, 6, 9, 10 y 11. La mejora ha sido significativa en los sistemas 3 y 4. El parámetro B ha

empeorado, sin embargo, en el laboratorio 7. En los sistemas 1(B) y 2 las diferencias en el parámetro B no son significativas en el marco de la desviación típica de los resultados.

La **repetibilidad** de las medidas ha mejorado en siete de los diez laboratorios y ha empeorado notablemente en los laboratorios 4 y 11.

Las variaciones registradas en los parámetros B y S en el transcurso de las diferentes comparaciones se representan gráficamente en la figura 3, a continuación.

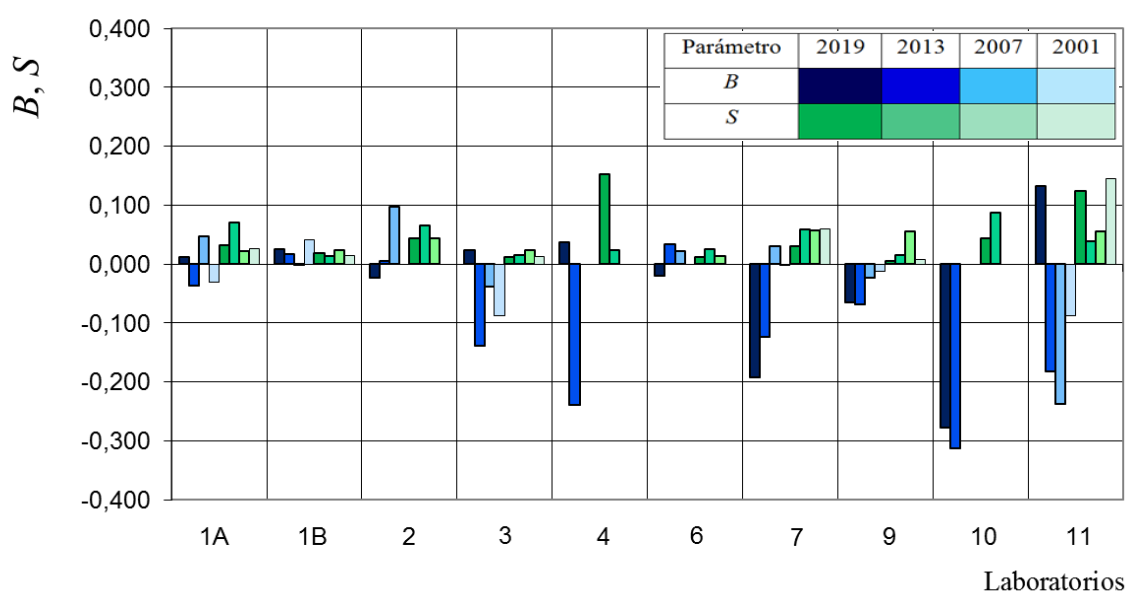


Figura 3: Comparación de los resultados de las campañas del 2019, 2013, 2007 y del 2001

La tabla 5, a continuación, resume los tiempos transcurridos entre el borrado de los dosímetros y su lectura, así como los porcentajes de las correcciones del fondo respecto a las lecturas brutas de los dosímetros, para cada uno de los laboratorios participantes. Se aprecia una mejora sostenida en cuanto al tiempo de tránsito de los dosímetros. Además, el porcentaje de corrección de la dosis de fondo respecto a la lectura de los dosímetros se ha reducido notablemente, debido fundamentalmente a la disminución del tiempo de tránsito de los dosímetros y en este último ejercicio, como consecuencia además del incremento de los valores convencionalmente verdaderos de la dosis equivalente ambiental.

TABLA 5

Días transcurridos desde la fecha de borrado de los dosímetros hasta la fecha de su lectura y porcentaje de la corrección de la lectura de fondo en las comparaciones del 2019, 2013, 2007 y 2001

Laboratorios	2019		2013		2007		2001	
	Días	Corrección (%)	Días	Corrección (%)	Días	Corrección (%)	Días	Corrección (%)
1(A)	7	3	8	11	10	6	35	39
1(B)	6	4	7	9	10	7	35	36
2	6	7	9	12	10	12	-	-
3	4	2	14	12	15	11	48	36
4	3	2	7	7	-	-	-	-
5	6	4	-	-	-	-	-	-
6	7	4	9	17	13	18	43	52
7	4	-	8	-	8	-	39	42
8	6	25 ⁽⁵⁾	-	-	-	-	-	-
9	6	3	8	6	9	7	14	10
10	6	2	14	23	-	-	-	-
11	7	8	10	13	16	15	43	36
Promedios	6	6 ⁽⁶⁾	9	12	11	11	37	36

10. CONCLUSIONES

- Se ha realizado un ejercicio de intercomparación entre 11 laboratorios de dosimetría ambiental, de los cuales, uno participó con dos sistemas dosimétricos diferentes. Los dosímetros de cada sistema dosimétrico se irradiaron con un mismo valor de la magnitud dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$. Sin embargo, los valores impartidos a cada sistema de dosimetría fueron diferentes y estuvieron comprendidos entre 370 y 630 μSv . La energía utilizada fue la del ^{137}Cs .
- La presentación de los resultados por parte de los laboratorios ha sido adecuada y uniforme, acorde con las instrucciones técnicas del ejercicio. El tiempo entre el borrado de los dosímetros y su lectura en los laboratorios se ha reducido notablemente con relación a la comparación del 2013, con una corrección promedio del 6 % debida a la dosis equivalente ambiental acumulada en los dosímetros de tránsito.
- Para la evaluación de los resultados se ha utilizado el procedimiento establecido en la norma ISO 14146 de 2018 [2]. Para el análisis de los resultados y su comparación con los obtenidos en años anteriores se utilizaron además los parámetros definidos en la norma ANSI / HPS 13.11 [9]. La superación del presente ejercicio de comparación por los servicios de dosimetría no es condición suficiente para su aprobación o acreditación.
- Nueve de los doce sistemas de dosimetría participantes cumplen con los criterios de aceptación establecidos. Es decir, los resultados de los sistemas 1A, 1B, 2, 3, 4, 5, 6, 9, y 11 son satisfactorios en el marco de la norma ISO 14146.

⁵ La corrección del laboratorio 8 representó el 24,7 %, porque las dosis evaluadas resultaron excesivamente bajas.

⁶ Si no se considera el porcentaje de corrección del laboratorio 8, la corrección promedio resulta del 4 %.

- e. Los laboratorios 7, 8 y 10 no cumplen con los criterios establecidos en la norma ISO 14146. El diseño inadecuado de estos dosímetros es la causa más probable.
- f. La repetibilidad de las medidas ha sido buena en general puesto que 10 de los 12 sistemas participantes presentan valores de $S < 0,05$. En los laboratorios 4 y 11 este parámetro superó el 10 % y necesita ser revisado.
- g. El ajuste de los sistemas dosimétricos para la energía del ^{137}Cs ha sido bueno en general, ya que para ocho de los doce sistemas dosimétricos participantes (el 67 %) se cumple que $|B| < 0,1$ y en nueve de los doce sistemas dosimétricos se cumple que $|B| < 0,15$. Posibles acciones correctoras, como la adecuación del diseño de los dosímetros y la calibración del sistema dosimétrico, pudieran ser necesarias para mejorar los resultados de los tres sistemas restantes.
- h. Diez de los sistemas de dosimetría habían participado en comparaciones anteriores. Se aprecia una mejora general gradual en la desviación relativa promedio (B), en la repetibilidad de las mediciones (S) y en la corrección debida a la dosis de fondo acumulada. No obstante, algunos laboratorios deben prestar atención al empeoramiento de sus indicadores.

11. REFERENCIAS

1. CORNEJO DÍAZ N. A.: *Intercomparación de medidas de niveles de radiación ambiental “Irradiación en el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes”*. Instrucciones Técnicas. (Marzo 2019).
2. INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION: RADIOLOGICAL PROTECTION: *Criteria and performance limits for the periodic evaluation dosimetry services*. ISO 14146 (2018).
3. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *Radiation protection instrumentation – Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation*. IEC 62387 (2012).
4. AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE: *Environmental dosimetry - Criteria for system design and implementation*. ANSI/HPS No. 13.37 (2014).
5. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: Radiation characteristics and production methods*. ISO 4037-01(1996).
6. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence*. ISO 4037-03 (1999).
7. SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA: *Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. ICRP 103. Traducción oficial al español. SEPR (2008).
8. BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO: *REAL DECRETO 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento Sobre Protección Sanitaria Contra Radiaciones Ionizantes*. RD 783 (2001).
9. AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE: *Personnel dosimetry performance. Criteria for testing*. ANSI/HPS No. 13.11 (2015).