

# Estudio piloto de una auditoría postal dosimétrica para radioterapia en condiciones de referencia

## Pilot study of a postal dosimetric audit for radiotherapy in reference conditions

**M<sup>a</sup> Carmen Pujades-Claumarchirant<sup>1,\*</sup>, Cristian Candela-Juan<sup>1</sup>, Laura Oliver-Cañamás<sup>1</sup>, Ángela Soriano-Cruz<sup>1</sup>, Juan José Rovira-Escutia<sup>1</sup>, Facundo Ballester-Pallarés<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Centro Nacional de Dosimetría. Instituto Nacional de Gestión Sanitaria. Avda. Campanar 21. 46009 Valencia (Valencia).

<sup>2</sup> Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear - IRIMED. Universidad de Valencia. Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot (Valencia).

**Fecha de Recepción: 22/02/2022 - Fecha de Aceptación: 23/03/2022**

En 2019 el Centro Nacional de Dosimetría organizó un estudio piloto de auditoría dosimétrica postal para centros de radioterapia. La auditoría consistió en una verificación de la calibración de haces de fotones de megavoltaje en condiciones de referencia, para lo cual se emplearon dosímetros de luminiscencia estimulada ópticamente (OSL) colocados en un maniquí de agua. Se auditaron 48 haces de energías: 6, 10 y 15 MV con filtro aplanador, y 6 y 10 MV sin filtro aplanador (FFF). Se consideraron aceptables las diferencias entre la dosis absorbida declarada por el centro auditado y la medida por el centro auditor inferiores al 5%.

La media de las diferencias entre la dosis declarada y la medida fue del 0.8%, estando comprendidas entre el -0.9% y el +1.9%. La incertidumbre en la medida de la dosis fue del 1.6% ( $k = 1$ ). No se obtuvieron resultados fuera del límite de aceptación.

De este estudio se concluye que el método propuesto para auditar haces de fotones de uso en radioterapia es viable y los resultados obtenidos para los diferentes centros auditados son inferiores al límite de aceptación. La incertidumbre en la determinación de la dosis absorbida es similar a la de otras organizaciones que ofrecen este servicio.

**Palabras clave:** Auditoría postal, dosimetría, garantía de calidad, OSL, radioterapia.

In 2019 a pilot study for postal dosimetry audits in radiotherapy centers was performed by the "Centro Nacional de Dosimetría". The audit consisted in a verification of the calibration of megavoltage photon beams in reference conditions, for which optically stimulated luminescence (OSL) dosimeters placed in a water phantom were used. Forty-eight radiation beams were audited, with energies: 6, 10 and 15 MV with flattening filter and 6 and 10 MV flattening filter free (FFF). A difference between the declared absorbed dose and the measured dose below 5% was considered acceptable.

The mean difference between the declared and measured doses was 0.8%, ranging from -0.9% to +1.9%. The uncertainty in the dose measurement was 1.6% ( $k = 1$ ). No results above the acceptance limit were observed.

From this study it is concluded that the proposed method to audit radiotherapy photon beams is viable and the results obtained for the different audited centers are below the acceptance limit. The uncertainty in the determination of the absorbed dose is similar to that of other organizations that offer this service.

**Key words:** Postal audit, dosimetry, quality assurance, OSL, radiotherapy.

## Introducción

Los programas integrales de garantía de calidad en radioterapia incluyen el control regular de calidad de

los equipos, la dosimetría de los haces, la revisión de los procedimientos de planificación de tratamientos y su verificación.<sup>1-3</sup> Se diseñan, principalmente, con el objetivo de que los pacientes reciban el tratamiento

\*Correspondencia: auditoripostal.cnd@ingesa.sanidad.gob.es

<https://doi.org/10.37004/sefm/2022.23.1.002>

prescrito correctamente. Una de las herramientas para conseguir este objetivo es la auditoría. Las auditorías más completas abarcan todo el proceso radioterápico (auditoría clínica integral) e incluyen aspectos relacionados con la organización, la infraestructura y tanto la práctica clínica como la radiofísica. Las auditorías clínicas sirven para armonizar la práctica en radioterapia. Una parte fundamental dentro de estas auditorías clínicas es la auditoría dosimétrica que se focaliza en aspectos de la dosimetría. En particular las auditorías dosimétricas garantizan que la dosis administrada coincide con la calculada y por tanto, permiten detectar errores en la calibración o cálculo de la dosis en los centros participantes. Cualquier programa de garantía de calidad debería incluir una auditoría realizada por un organismo externo independiente. Por ello, las normas básicas de seguridad internacionales<sup>1,4</sup> exigen que los centros establezcan programas integrales de garantía de calidad para la exposición médica, incluida la auditoría externa.

En el campo de la radioterapia son de especial relevancia las auditorías dosimétricas, puesto que ayudan a detectar problemas en la dosimetría y brindan apoyo en su corrección.<sup>5</sup> Mediante estos ejercicios, se pueden detectar errores en la aplicación del código de práctica o protocolo utilizado para la determinación de la dosis absorbida, los procedimientos para el cálculo de las unidades de monitor, la calibración de los equipos de dosimetría, la determinación de las distancias o los tamaños de campo, entre otros.<sup>6,7</sup> Además, aportan fiabilidad y confianza en la dosimetría del paciente y en la aplicación de los protocolos.

Las auditorías dosimétricas son un requisito de numerosos ensayos clínicos para acreditar a los centros participantes, e incluso, en algunos países, éstas se realizan en respuesta a la normativa vigente.

Existen distintos niveles de auditorías dosimétricas externas. El nivel más básico es la auditoría en condiciones de referencia. Consiste en una verificación de la calibración del haz para un tamaño de campo de 10 cm × 10 cm a una profundidad de 5 cm ó 10 cm en agua. Detectar una desviación a este nivel permite poder corregir un error sistemático que se arrastrará tanto a los tratamientos, como a otros niveles superiores de auditoría.

Las auditorías se pueden realizar *in situ* o en modo remoto. En la visita *in situ* es el auditor quien se desplaza a la institución y se suelen utilizar cámaras de ionización (Farmer, microcámaras, etc.).<sup>8</sup> En el modo remoto se suelen enviar dosímetros pasivos por correo postal, el personal de la institución los irradia en las condiciones acordadas y, posteriormente, los devuelve para su lectura. El resultado del ejercicio es la comparación de la dosis medida con la declarada por la institución. Para mantener la trazabilidad de las auditorías remotas, la calibración de los detectores empleados

está basada en una calibración cruzada con cámaras de ionización trazables a su vez a laboratorios de dosimetría secundarios o primarios (SSDLs o PSDLs).

Para las auditorías remotas el dosímetro termoluminiscente (TLD) en forma de polvo ha sido el dosímetro más utilizado hasta el momento por los principales laboratorios de dosimetría que ofrecen el servicio de auditoría postal.<sup>9-14</sup> Sin embargo, en los últimos años se han empezado a utilizar dosímetros luminiscentes por estimulación óptica (OSL),<sup>9,10</sup> radiofotoluminiscentes,<sup>15</sup> de alanina<sup>16</sup> y película radiocrómica. Algunos de estos centros combinan medidas de dosímetros luminiscentes con películas radiocrómicas.<sup>15</sup>

Con los sistemas dosimétricos basados en luminiscencia se pueden conseguir incertidumbres típicas en la medida de la dosis absorbida en agua del orden del 1% al 3% ( $k = 1$ ).<sup>11,17</sup>

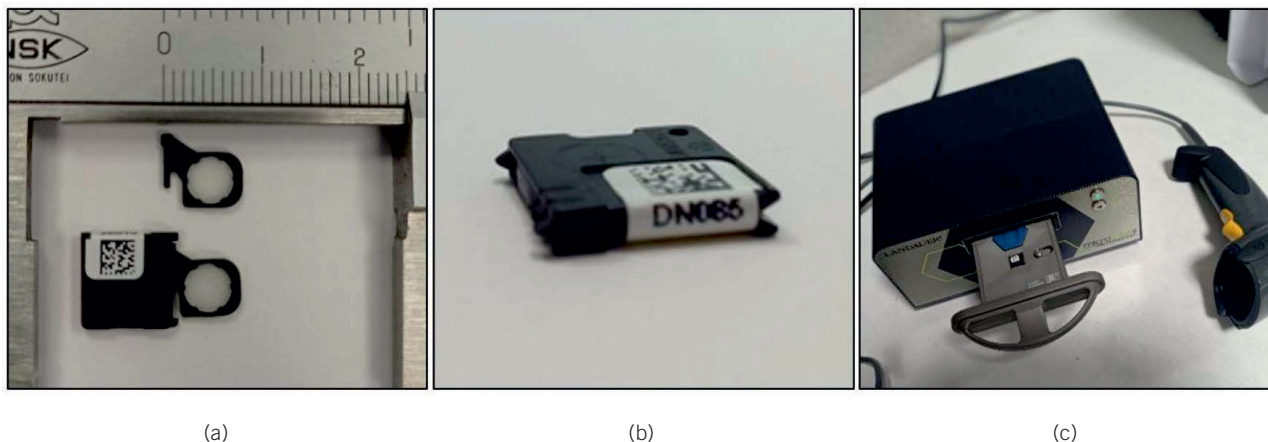
Actualmente, hay una variedad de organizaciones y grupos nacionales e internacionales que han desarrollado diversos tipos y niveles de auditorías de dosimetría en radioterapia.<sup>18-21</sup> El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha establecido una base de datos, *Dosimetry Audit Networks* (DAN),<sup>22</sup> que agrupa a los centros que organizan auditorías en radioterapia en todo el mundo. Todos los centros del DAN proporcionan auditorías dosimétricas básicas en las condiciones de referencia y algunos además realizan auditorías en otras condiciones o niveles más avanzados con geometrías más complejas.

El Centro Nacional de Dosimetría (CND) trabaja desde el año 2017 en el proyecto de liderar la creación de un grupo de auditoría dosimétrica reconocido a nivel nacional encargado de realizar auditorías externas de calidad basadas en dosimetría postal para radioterapia, hasta la fecha inexistente en nuestro país. Es por ello que, en el año 2019 el CND organizó un estudio piloto de auditoría dosimétrica en condiciones de referencia para centros de radioterapia nacionales.

El propósito del estudio piloto de auditoría dosimétrica postal fue comprobar el funcionamiento de la metodología propuesta por el CND para auditar haces de megavoltaje de uso en radioterapia, ver su viabilidad y recabar información de retorno de los participantes. En este trabajo, se describe en qué consistió el estudio y se presentan los resultados obtenidos.

## Material y métodos

La auditoría consistió en una verificación de la calibración de haces de fotones de megavoltaje de los aceleradores empleados en radioterapia donde se pudieran adoptar las condiciones de referencia de tamaño de campo de 10 cm × 10 cm a una profundidad de 10 cm en agua y distancia fuente superficie (DFS) o distancia fuente isocentro (DFI) de 100 cm. El



**Fig. 1.** Sistema dosimétrico utilizado. (a) Dosímetro OSL modelo nanoDot (Landauer) en la que se muestra el material sensible y las dimensiones del dosímetro. (b) Vista del dosímetro en la que se puede ver el grosor del *cassette*, los códigos identificativos y la posición del centro del material sensible grabado en la superficie del *cassette*. (c) Lector microSTAR ii (Landauer).

ejercicio no estaba diseñado para los haces empleados en radiocirugía, haces de electrones, fuentes de braquiterapia o rayos X de ortovoltaje. La magnitud de interés fue la dosis absorbida en agua.

Se emplearon dosímetros OSL modelo nanoDot (Landauer Inc.) (fig. 1). El dosímetro nanoDot consta de un único elemento sensible con forma cilíndrica de óxido de aluminio dopado con carbono ( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ ) de diámetro 5 mm y espesor 0.15 mm que se encuentra en un *cassette* de dimensiones  $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$ . Cada dosímetro está identificado mediante un código alfa-numérico y el equivalente código de barras bidimensional (QR). Para la lectura de los dosímetros se utilizó el sistema dosimétrico microSTAR ii (Landauer Inc.) versión 1.0.5018.15489, el cual utiliza un LED

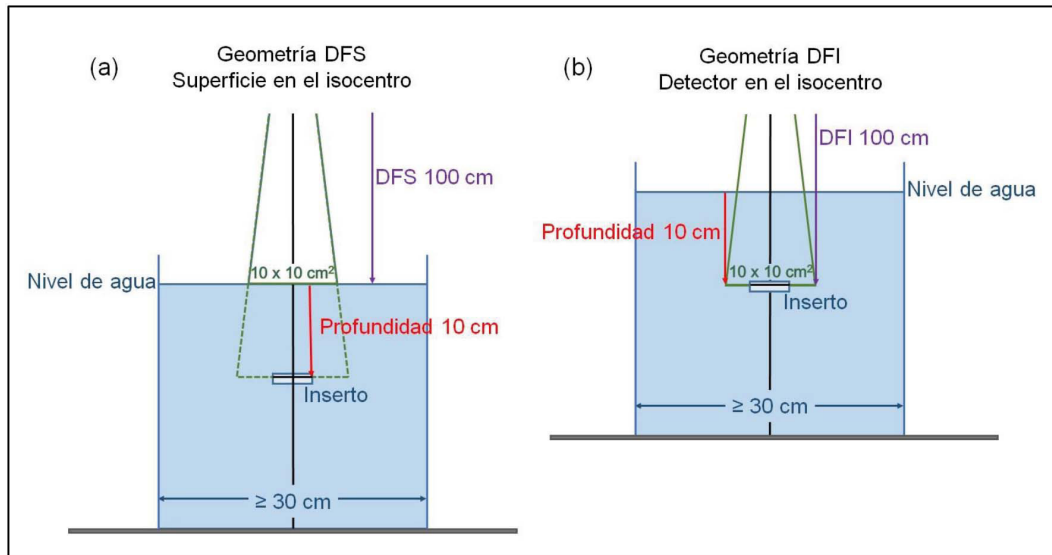
pulsado de alta potencia para inducir la luminiscencia del material sensible.

Se utilizó un lote compuesto por un total de 200 dosímetros nanoDot pertenecientes al mismo lote de producción. La caracterización del lote de dosímetros contempló la determinación del factor de sensibilidad individual. Para ello, se determinó el factor de sensibilidad individual respecto a la media del lote realizando irradiaciones del lote completo.

Para la realización del ejercicio de auditoría, los participantes realizaron la irradiación de los dosímetros en un maniquí de agua. Para conseguir la impermeabilidad de los dosímetros, estos se colocaron en un inserto cilíndrico de PMMA compatible con la mayoría de soportes comerciales para cámaras tipo Roos (fig. 2).



**Fig. 2.** (a) Colocación del dosímetro en el inserto cilíndrico de PMMA. (b) Colocación del inserto en el soporte de cámara tipo Roos. El punto de la cara superior del inserto indica el centro del material sensible del dosímetro. La línea negra del lateral indica la profundidad efectiva del material sensible del dosímetro.



**Fig. 3.** Configuración de las dos geometrías alternativas para la irradiación. Se muestra el maniquí de agua y el inserto donde se aloja el dosímetro. La línea negra del inserto indica la posición del centro del material sensible del dosímetro. (a) Geometría con la superficie del agua en el isocentro (DFS). (b) Geometría con el centro del material sensible en el isocentro (DFI).

El ejercicio se realizó simultáneamente en 14 hospitales nacionales y 1 laboratorio de metrología de radiaciones. Se auditaron un total de 48 haces de radiación, de energías: 6 MV (15 haces), 10 MV (7 haces) y 15 MV (7 haces) con filtro aplanador, y sin filtro 6FFF (10 haces) y 10FFF (9 haces). A los participantes se les requirió una irradiación de 2 Gy en la profundidad de referencia, donde se ubicaba el centro del material sensible del dosímetro, pudiendo elegir la geometría DFS o DFI (fig. 3).

El material necesario para realizar el ejercicio consistió en dos dosímetros por cada haz auditado, tres dosímetros para medida de fondo, dos dosímetros de reserva por si era necesario repetir alguna irradiación, un inserto para colocar el dosímetro, y una hoja para la toma de datos y la declaración de la dosis administrada, de forma que el conjunto se pudo enviar fácilmente por vía postal. Todos los centros utilizaron el maniquí de agua y el soporte de cámara tipo Roos de su propia institución, excepto un centro que solicitó el soporte al CND.

Se acordó con los centros el periodo en el que se debía realizar la irradiación. Durante ese periodo, el CND también irradió dosímetros de referencia en el SSDL *Radiation Physics Laboratory* (RPL) de la Universidad de Santiago de Compostela para ser utilizados en la obtención del coeficiente de calibración del sistema dosimétrico. El coeficiente de calibración del sistema relaciona la señal del dosímetro con la magnitud de interés, en nuestro caso la dosis absorbida en agua. El coeficiente de calibración se determinó para la sesión de lectura irradiando una muestra de 6 dosímetros en el RPL y leyéndolos en la misma sesión

en la que se leyeron los dosímetros de los participantes del estudio. El RPL empleó un haz de Cobalto-60 (AECL Theratron 780) con un tamaño de campo (definido a 80 cm de la fuente) de 10 cm × 10 cm. Los dosímetros se dispusieron embebidos en una plancha de PMMA de 2 mm de espesor, a su vez situada entre planchas de material equivalente a agua RW3.

Las energías de los haces de los participantes son diferentes a la energía de calibración del sistema (Cobalto-60). A su vez, los detectores OSL presentan una dependencia energética que llega a ser del orden del 4% para la energía de 15 MV respecto a la de calibración. Por ello, se caracterizó el factor de corrección por dependencia energética de los dosímetros en función de la calidad del haz según su  $TPR_{(20,10)}$ . A los participantes se les solicitó que indicasen el  $TPR_{(20,10)}$  de los haces auditados en la hoja de toma de datos y este valor se utilizó para determinar el factor de corrección por dependencia energética particular de cada haz auditado.

Los dosímetros, una vez irradiados en los centros participantes, fueron devueltos al CND por vía postal, donde se leyeron. La lectura se realizó siguiendo un procedimiento interno basado en la metodología de las recomendaciones de la AAPM TG-191<sup>10</sup> sobre el uso clínico de dosímetros luminiscentes. Se aplicaron correcciones a la lectura por sensibilidad individual, pérdida de señal por lectura, pérdida de señal con el tiempo, falta de linealidad en la respuesta con la dosis y dependencia con la energía.

Se emitieron informes individuales para cada centro participante con los resultados del ensayo y se consideraron aceptables las diferencias entre la dosis

declarada por el centro auditado y la medida por el centro auditor, el CND, inferiores al 5%, valor generalmente utilizado en las auditorías en condiciones de referencia.<sup>6,7,12,14</sup>

También se realizó una encuesta a los participantes para conocer la participación previa en este tipo de auditorías y el interés en la participación en otros tipos de auditorías dosimétricas más específicas tipo *end-to-end* para radioterapia de intensidad modulada (IMRT), de arcoterapia volumétrica de intensidad modulada (VMAT), de campos pequeños para radiocirugía estereotáctica (SBRT/SRS) y auditorías para braquiterapia de alta tasa de dosis.

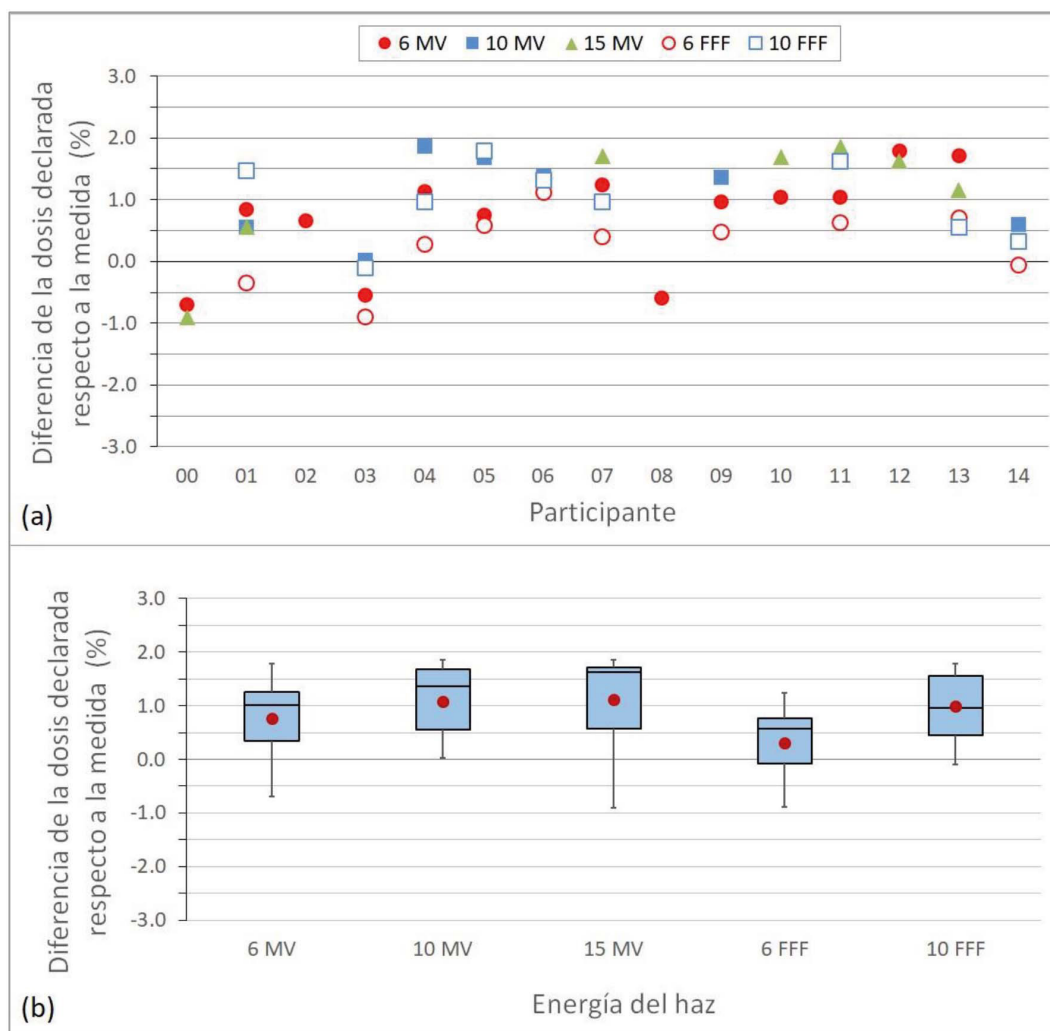
Por otro lado, dentro de las actividades que se realizan en el CND para mejorar la calidad de este servicio se encuentran la participación en las pruebas tipo ciego que organiza el Laboratorio de Dosimetría del

OIEA (DOL, Seibersdorf, Austria) y la intercomparación con otros laboratorios que ofrecen servicios de auditoría dosimétrica postal, como la intercomparación realizada con el Physikalisch-Technische Werkstätten (PTW).

## Resultados

De los 15 aceleradores de radioterapia que participaron, se auditaron un total de 48 haces de fotones. Para cada haz, se ha evaluado la media de la diferencia entre la dosis absorbida en agua declarada y la medida.

En la fig. 4, se muestran los resultados de cada participante y un diagrama de cajas con los resultados clasificados según las energías de los haces del



**Fig. 4.** Diferencia entre la dosis declarada por la institución participante en el estudio y la dosis medida por el CND. La incertidumbre en la medida de la dosis que proporcionó el CND fue del 1.6% ( $k = 1$ ). (a) Resultados por participantes. A cada participante se le asignó un código para mantener el anonimato de los resultados. (b) Diagrama de cajas con los resultados clasificados en función de la energía del haz utilizado. En color rojo se indica el valor medio.

**Tabla 1.** Ejemplo de las componentes de la incertidumbre para uno de los haces de 15 MV del estudio.

Componente de la incertidumbre	Incertidumbre ( $k = 1$ )/%	
	Tipo A	Tipo B
Calibración dosimétrica del sistema	0.50	0.75
Lectura del dosímetro (incluyendo pérdida de señal por lectura) - 15 lecturas	0.09	
Factor de sensibilidad individual	0.50	
Factor de corrección por falta de linealidad	0.17	
Factor de corrección por dependencia energética	1.10	
Factor de corrección por pérdida de señal a medio plazo (fading)	0.02	
Factor de corrección del soporte	0.40	
<b>Incertidumbre estándar combinada (<math>k = 1</math>)</b>	1.60	

estudio. La media de las diferencias entre la dosis declarada por los centros participantes y la medida por el CND fue del 0.8%, estando comprendidas entre el -0.9% y el +1.9%.

El cálculo de la incertidumbre se realizó de forma individual para cada uno de los haces auditados e incluyó las componentes de incertidumbre asociadas a la calibración del sistema dosimétrico, a la lectura y a los factores de corrección aplicados. Se obtuvieron valores de la incertidumbre combinada estándar entre 1.2 y 1.6% ( $k = 1$ ). El mayor valor de incertidumbre se obtuvo para los haces de 15 MV, para los que la calidad es muy diferente de la de calibración, siendo muy relevante la incertidumbre del factor de corrección por dependencia energética. Para estos haces, la incertidumbre resultó ser de 1.6% ( $k = 1$ ) y ésta fue la incertidumbre que se reportó en los informes para todos los haces del estudio. En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de las componentes de la incertidumbre para uno de los haces de 15 MV del estudio.

También para los haces de 15 MV se observaron las mayores diferencias entre la dosis declarada y la medida.

No se obtuvieron resultados fuera del límite de aceptación del 5%. Todos los participantes indicaron que, a pesar de que no era un requisito en sí del ejercicio, adicionalmente habían determinado experimentalmente la dosis absorbida en agua en la posición del dosímetro, de acuerdo con su protocolo normal de dosimetría, a través de medidas con cámara de ionización para tenerlo en cuenta en la declaración de la dosis administrada.

## Discusión

En este estudio no se han encontrado diferencias entre la dosis declarada y la medida que superen el

valor de tolerancia establecido, del 5%. Este valor es el generalmente utilizado por otros grupos de auditoría en este tipo de ejercicio, pero en nuestro caso, con la incertidumbre reportada se puede llegar a esperar que los resultados óptimos estén dentro del 3%. En el estudio de *Kry et al.*,<sup>6</sup> se analizaron retrospectivamente los resultados de cuatro grandes grupos de auditoría y se concluyó que la tasa de resultados fuera de tolerancia era del 0.63%, siendo una parte importante de los resultados fuera de tolerancia los asociados a haces de electrones.

La experiencia de otros grupos de auditoría es que la participación periódica en estos ejercicios ayuda a detectar y corregir errores asociados a problemas en los equipos de medida o en la configuración de los mismos, fallos en el seguimiento del protocolo de calibración, errores en las hojas de cálculo o errores al aplicar factores de corrección, entre otros.<sup>6</sup> Además, no solo se detectan errores la primera vez que se audita un equipo, sino también en las auditorías de seguimiento. Por ello, organizaciones como la OIEA recomiendan que se auditen todos los haces cuando se pone en marcha un nuevo acelerador y que se siga haciendo periódicamente después (preferiblemente de forma anual).

Entre las incidencias reportadas en este estudio, varios centros hicieron uso de los dosímetros de reserva por errores humanos en el montaje del ejercicio que fueron detectados por los propios participantes, tales como la selección de tamaño de campo incorrecto o una profundidad del dosímetro en agua incorrecta. En un caso se descartó el ejercicio en uno de los haces de un participante porque se concluyó que había habido un error humano durante la irradiación de los dosímetros. Se llegó a esta conclusión al obtener una lectura de fondo en uno de los dosímetros que debería haber sido irradiado y una lectura con el doble de lo esperado en el otro dosímetro del mismo haz. En este caso el CND programó una repetición del ejercicio.

Respecto a los comentarios de los participantes obtenidos en la encuesta, se concluyó que solamente la tercera parte de los equipos auditados sí que había participado en alguna ocasión en algún ejercicio de auditoría dosimétrica. El 100% de los encuestados mostraron interés en participar en auditorías más específicas tipo *end-to-end* para IMRT y VMAT, y de campos pequeños para SBRT y SRS. El 40% de los centros participantes en este estudio sí que habían participado alguna vez en alguna auditoría tipo *end-to-end* y solo uno lo había hecho para campos pequeños. Todos los encuestados que disponían de braquiterapia de alta tasa de dosis mostraron interés en participar en auditorías específicas para esta modalidad y solo dos habían realizado una auditoría de este tipo. Queda por tanto la labor de impulsar este tipo de prácticas y fomentar la participación entre los profesionales.

## Conclusiones

De este estudio se concluye que el método propuesto por el CND para auditar haces de fotones de megavoltaje de uso en radioterapia en condiciones de referencia es viable, que la incertidumbre en la determinación de la dosis absorbida es aceptable y similar a la de otras organizaciones internacionales que ofrecen este tipo de servicio, y que la diferencia entre la dosis absorbida y la dosis declarada por los hospitales participantes para los haces auditados es inferior al límite de aceptación.

## Agradecimientos

El CND agradece la participación voluntaria en este estudio de los servicios/unidades de radiofísica de los centros:

- Complejo Hospitalario de Navarra
- Fundación Instituto Valenciano de Oncología
- Hospital Campus de la Salud/San Cecilio
- Hospital Clínico San Carlos
- Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa
- Hospital Clínico Universitario Virgen de la Arrixaca
- Hospital de la Santa Creu i Sant Pau
- Hospital Universitario Basurto
- Hospital Universitario La Paz
- Hospital Universitario La Princesa
- Hospital Universitario Ntra. Sra. de la Candelaria
- Hospital Universitario Puerta de Hierro
- Hospital Universitario Ramón y Cajal
- Hospital Universitario y Politécnico La Fe
- Laboratorio *Radiation Physics Laboratory* (RPL) de la Universidad de Santiago de Compostela

## Bibliografía

1. Organismo Internacional de la Energía Atómica. IAEA TECDOC No. 1151 Aspectos físicos de la garantía de calidad en radioterapia: Protocolo de control de calidad. Viena, 2000. ISSN 1011-4289.
2. Belletti S, Dutreix A, Garavaglia G, Gfirtner H, Haywood J, Jessen KA, et al. Quality assurance in radiotherapy: the importance of medical physics staffing levels. Recommendations from an ESTRO/EFOMP joint task group. *Radiother Oncol.* 1996;41(1):89-94. [https://doi.org/10.1016/s0167-8140\(96\)91799-5](https://doi.org/10.1016/s0167-8140(96)91799-5)
3. Kouloulis VE. Quality assurance in radiotherapy. *Eur J Cancer.* 200;39(4):415-22. [https://doi.org/10.1016/s0959-8049\(02\)00461-6](https://doi.org/10.1016/s0959-8049(02)00461-6)
4. EURATOM. DIRECTIVA 2013/59/EURATOM del consejo de 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom. Diario Oficial de la Unión Europea. 2013.
5. Organismo Internacional de la Energía Atómica. Quality Assurance Team for Radiation Oncology (QUATRO). Comprehensive Audits of Radiotherapy Practices: A Tool for Quality Improvement. Viena, 2007. ISBN 92-0-103707-4.
6. Kry SF, Peterson CB, Howell RM, Izewska J, Lye J, Clark CH, et al. Remote beam output audits: A global assessment of results out of tolerance. *Phys and Im Rad Oncol.* 2018;7:39-44. <https://doi.org/10.1016/j.phro.2018.08.005>
7. Izewska J, Bokulic T, Kazantsev P, Wesolowska P, van der Merwe D. 50 Years of the IAEA/WHO postal dose audit programme for radiotherapy: what can we learn from 13756 results? *Acta Oncologica.* 2020;59:459-502. <https://doi.org/10.1080/0284186X.2020.1723162>
8. Organismo Internacional de la Energía Atómica. Quality Assurance Team for Radiation Oncology (QUATRO) IAEA-TECDOC-1543. On-site Visits to Radiotherapy Centres: Medical Physics Procedures. Viena, 2007. ISBN 92-0-102607-2.
9. Alvarez P, Kry SF, Stingo F, Followill D. TLD and OSLD dosimetry systems for remote audits of radiotherapy external beam calibration. *Radiat Meas.* 2017;106:412-5. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2017.01.005>
10. Kry SF, Alvarez P, Cygler JE, DeWerd LA, Howell RM, Meeks S. AAPM TG 191: Clinical use of luminescent dosimeters: TLDs and OSLDs. *Med Phys.* 2019;47:19-51. <https://doi.org/10.1002/mp.13839>
11. Wesolowska PE, Cole A, Santos T, Bokulic T, Kazantsev P, Izewska J. Characterization of three solid state dosimetry systems for use in high energy photon dosimetry audits in radiotherapy. *Rad Meas.* 2017;106:556-62. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2017.04.017>
12. Izewska J, Andreo P. The IAEA/WHO TLD postal programme for radiotherapy hospitals. *Radiat and Oncol.* 2000;54:65-72. [https://doi.org/10.1016/S0167-8140\(99\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8140(99)00164-4)
13. Derreumaux S, Chavaudra J, Bridier A, Rossetti V, Dutreix A. A European quality assurance network for radiotherapy: dose measurement procedure. *Phys Med Biol.* 1995;40(7):1191-208. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/40/7/004>
14. Ferreira IH, Dutreix A, Bridier A, Chavaudrac J, Svensson H. The ESTRO-QUALITY assurance network (EQUAL). *Radiat*

- and *Oncol.* 2000;55:273-84. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2000.901541>
15. Okamoto H, Minemura T, Nakamura M, Mizuno H, Tohyama N, Nishio T, et al. Establishment of postal audit system in intensity-modulated radiotherapy by radiophotoluminescent glass dosimeters and a radiochromic film. *Phys Med.* 2018;48:119-126. <https://10.1016/j.ejmp.2018.03.013>
  16. Angelis C, De Coste V, Fattibene P, Onori S, Petetti E. Use of alanine for dosimetry intercomparisons among Italian radiotherapy centers. *App Rad Isot.* 2005;62:261-5. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.08.019>
  17. Izewska J, Hultqvist M, Bera P. Analysis of uncertainties in the IAEA/WHO TLD postal dose audit system. *Rad Meas.* 2008;43:959-63. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.01.011>
  18. Izewska J, Georg D, Bera P, Thwaites D, Arib M, Saravi M, et al. A methodology for TLD postal dosimetry audit of high-energy radiotherapy photon beams in non-reference conditions. *Radiat and Oncol.* 2007;84:67-74. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2007.06.006>
  19. Wesolowska P, Georg D, Lechner W, Kazantsev P, Bokulic T, Carlsson A, et al. Testing the methodology for a dosimetric end-to-end audit of IMRT/VMAT: results of IAEA multicentre and national studies. *Acta Oncol.* 2019;58(12):1731-9. <https://doi.org/10.1080/0284186X.2019.1648859>
  20. Lechner W, Wesolowska P, Azangwe G, Arib M, Alves VGL, Suming L, et al. A multinational audit of small field output factors calculated by treatment planning systems used in radiotherapy. *Phys and Im Rad Oncol.* 2018; 5:58-63. <https://doi.org/10.1016/j.phro.2018.02.005>
  21. Ibbott GS, Thwaites DI. Audits for advanced treatment dosimetry. *J. Phys. Conf. Ser.* 2015;573:012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/573/1/012002>
  22. Izewska J, Lechner W, Wesolowska P. Global availability of dosimetry audits in radiotherapy: The IAEA dosimetry audit networks database. *Phys and Im Rad Oncol.* 2018;5:1-4. <https://doi.org/10.1016/j.phro.2017.12.002>