

PROPUESTA DE UN SISTEMA POSTAL DE CONTROL DE CALIDAD PARA EL SISTEMA DE PLANIFICACIÓN DE TRATAMIENTO EN TELETERAPIA USANDO DOSÍMETRO OSL NANODOT

PROPOSAL OF A POSTAL QUALITY CONTROL SYSTEM FOR THE TREATMENT PLANNING SYSTEM IN TELETERAPY USING OSL NANODOT DOSIMETER

Ángel Rodríguez-Horna¹ , Carmen Guzmán-Calquina² 

Modesto Montoya-Zavaleta¹ , José Márquez-Pachas³ 

Jesús Aymar-Alejos³ , Juan Méndez-Velásquez⁴ , Dante Roa⁵ , M. Alva-Sanchez⁶ 

José Santa Cruz Delgado³ , Jessenia Villaverde-Herrera⁷ 

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

² Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.

³ Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

⁴ Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú.

⁵ HRS Oncology International, Las Vegas, NV 89119, USA

⁶ Departamento de ciencias exactas y aplicadas, Universidad de Ciencias de la Salud de Porto Alegre– Porto Alegre, Brasil

⁷ Instituto de Física de Sao Carlos, Universidad de Sao Paulo - USP, Sao Paulo, SP, Brasil.

Recibido (Received): 07 / 03 / 2021 Aceptado (Accepted): 12 / 07 / 2022

RESUMEN

Objetivo: Implementar un Sistema Postal de Control de Calidad para verificar el Sistema de Planificación de Tratamiento en Teleterapia usando dosímetros $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$, basados en la tecnología de luminiscencia ópticamente estimulada (OSL-Optically Stimulated Luminescence), comercialmente conocidos como OSLD nanoDotTM. **Materiales y Métodos:** Se utilizó un maniquí que contiene dosímetros OSLD nanoDotTM, ($\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$), previamente caracterizados y calibrados para la energía de un haz de rayos x de 6.0 MV generados en un acelerador lineal, los valores de dosis absorbida fueron medidos con: una cámara de ionización Semiflex, electrómetro PTW – Freiburg, geometrías 3D de radiación, tales como: Geometría simple (campo abierto a 0° y 25°), Geometría compleja (tres campos abiertos a 0°, 90° y 270°) y Geometría combinada (campo y diversas variaciones de giro de Gantry), utilizando campos cuadrados (6cm²), circulares (diámetro 6cm), oblicuos (6cm x 6cm) e Irregulares, pesos iguales y filtros de cuña virtual en diferentes regiones del haz de fotones. **Resultados:** Los valores de la caracterización de los OSLD nanodot fueron: homogeneidad (0.9999), por desvanecimiento en el tiempo (0.9989), por corrección de agotamiento (0.9985), de reproducibilidad (0.9953), por dependencia angular (0.9925) y por linealidad (1.0000) para un rango de dosis absorbida 100cGy a 200cGy. Las evaluaciones en las diferentes regiones del haz, en medio homogéneo, fueron las siguientes: Geometría simple (Incertidumbre: 3.01%), Geometría compleja (Incertidumbre: 2.16%) y Geometría Combinada (Incertidumbre: 2.62%) **Conclusiones:** Los resultados obtenidos se encuentran dentro de los valores de tolerancia, concluyendo que así el OSLD nanoDotTM es un dosímetro altamente confiable, además de su conveniencia en su integración en un programa de auditoría dosimétrica postal.

Palabras Clave: dosímetros $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$, teleterapia, caracterización del $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$, geometrías 3D de radiación.

ABSTRACT

Objective: To implement a Postal Quality Control System to verify the Treatment Planning System in Teletherapy using Dosimeters $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$, based on optically stimulated luminescence (OSL), commercially known as OSLD nanoDotTM. **Materials and Methods:** A mannequin containing OSLD nanoDotTM dosimeters, ($\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$), previously characterized and calibrated for the energy of a 6.0 MV x-ray beam generated in a linear accelerator, the absorbed dose values were measured with: a Semiflex, ionization chamber, PTW – Freiburg electrometer, 3D radiation geometries, such as: Simple geometry (open field at 0° and 25°), Complex geometry (three open fields at 0°, 90° and 270°) and Combined geometry (field and various variations of Gantry rotation), using square fields (6cm²), circular (diameter 6cm), oblique (6cm x 6cm) and Irregular, equal weights and virtual wedge filters in different regions of the photon beam. **Results:** The values of the characterization of the nanodot OSLD were: homogeneity (0.9999), by fading over time (0.9989), by correction of depletion (0.9985), of reproducibility (0.9953), by angular dependence (0.9925) and by linearity (1.0000) for a range of absorbed doses 100cGy to 200cGy. The evaluations in the different regions of the beam, in homogeneous medium, were the following: Simple geometry (Uncertainty: 3.01%), Complex geometry (Uncertainty: 2.16%) and Combined geometry (Uncertainty: 2.62%) **Conclusions:** The results obtained are within the tolerance

values, thus concluding that the OSLD nanoDot™ is a highly reliable dosimeter, in addition to its convenience in its integration into a postal dosimetric audit program.

Keywords: dosimeters Al₂O₃:C, teletherapy, characterization of Al₂O₃:C, 3D geometries of radiation.

1. INTRODUCCIÓN

En los tratamientos del cáncer con radiaciones ionizantes es esencial asegurar la concordancia entre la dosis prescrita con la dosis absorbida (DA) administrada para conseguir el éxito de la radioterapia.

Basados en la necesidad de verificación de los Sistemas de Planificación de tratamiento (TPS), la tecnología OSLD nanoDot™ representa un avance en la detección de la radiación ionizante incluyendo en la radiología de diagnóstico, medicina nuclear y radiooncología [1]. Actualmente, estos dosímetros representan una herramienta valiosa que permiten verificar la DA entregada a los pacientes durante sus tratamientos radioterapéuticos. En este sentido, Paula Noreña Ospina, en su reciente trabajo en el Instituto de Balseiro – Universidad Nacional del Cuyo, aplicó el uso de los dosímetros OSLD nanoDot directamente en el sitio de un tumor mediante la técnica de dosimetría interna [2]. Es por ello, que se planteó implementar un Sistema Postal de Control de Calidad (SPCC) para verificar el TPS en Teleterapia usando dosímetros Al₂O₃:C, basados en la tecnología de luminiscencia ópticamente estimulada (OSL-Optically Stimulated Luminescence), comercialmente conocidos como OSLD nanoDot™

Para el cálculo de la DA se consideró:

$$F_M = \frac{\text{Dosis}}{Lec_{Corregida} \cdot F_S \cdot F_{COSLD} \cdot F_L \cdot F_{DT} \cdot F_A}$$

Donde:

- F_M : Factor por dispersión del maniquí
 $Lec_{Corregida}$: Lectura corregida.
 F_S : Factor por calibración del sistema lector microStar.
 F_{COSLD} : Factor por calibración de la energía en uso.
 F_L : Factor por linealidad.
 F_{DT} : Factor por desvanecimiento en el tiempo.
 F_A : Factor por corrección de agotamiento.

Criterios de aceptación a los cálculos de la DA

En este trabajo se expresa la diferencia entre los valores de la DA calculada y medida como porcentaje de la dosis absorbida medida localmente ($D_{A\delta}$) en el LINAC y la normalización de la $D_{A\delta}$ a dosis en $d_{m\acute{a}x}$ (D_{Amax}). La $D_{A\delta}$ finalmente determina el éxito de un tratamiento con radiación a un tumor y por lo tanto es clínicamente más relevante. Por la misma razón se propone normalizar las

desviaciones de la dosis a una profundidad de referencia (D_{ref}) de 10 cm, que hoy en día es profundidad recomendada de calibración determinada por el Organismo Internacional de energía Atómica (IAEA) para los efectos del cálculo de las Unidades Monitor (UM) [3].

La desviación estándar (SD) entre los resultados de cálculo y medición pueden ser expresadas como un porcentaje de la $D_{A\delta}$ según la ecuación:

$$D_{A\delta} = 100\% \left(\frac{D_{cal} - D_{medida}}{D_{medida}} \right)$$

Se proponen diferentes tolerancias para 4 regiones (Tabla 1) en el haz de radiación ionizante distinguiendo análogamente al propuesto por el Informe técnico TR-430 (IAEA), como: [4]

δ_1 : Datos en los puntos del eje central del haz más allá de la profundidad de d_{max} : esta región presenta dosis altas y gradiente pequeño.

δ_2 : Datos en los puntos de la región de acumulación (Build-up), en la penumbra del haz región cercana a la interface (penumbra, Build-up, d_{max}) de heterogeneidades: esta región presenta dosis altas y gradiente grande. Una gradiente grande se define generalmente en más del 3,0% por milímetro (mm).

δ_3 : Datos en los puntos más allá de d_{max} , dentro de campo - fuera del eje del haz, esta región presenta dosis alta y gradiente pequeño.

REGIÓN	UBICACIÓN	PRESENTA	G.S [3D]: Campo (cuadrado o, rectángulo o, oblicuo)	G.C [3D]: 3 Campos (cuadrado , rectángulo , pesos, cuñas)	G. COM [3D-MLCs]: (circular, irregular, "Y" invertida, oblicuos, etc)
δ_1	Eje del Haz	Alta Dosis Área de baja gradiente de Dosis	2,0%	3,0%	4,0%
δ_2	Penumbra y Build Up	Alta Dosis Área de alta gradiente de Dosis	2,0 mm 10,00%	3,0 mm 15,00%	3,0 mm 15,00%
δ_3	Dentro del Haz	Alta Dosis Área de baja gradiente de Dosis	3,0%	3,0%	4,0%
δ_4	Fuera del Haz	Alta Dosis Área de baja gradiente de Dosis	3,0%	4,0%	5,0%

δ_4 : Datos en los puntos fuera de la geometría de campo del haz, esta región presenta dosis baja y gradiente pequeños, por debajo de 7,0% de la dosis de normalizada al eje central del haz.

Tabla I. Tolerancias de acuerdo con el Informe técnico TR-430 (IAEA)

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. Equipos utilizados:

Los equipos utilizados para implementar un SPCC, fueron los siguientes: Cámara de Ionización Cilíndrica CIC Semiflex PTW – Freiburg (Modelo: TN31010 - 1000), electrómetro PTW – Freiburg (Modelo: Unidos E T 10010), termómetro PFTB-5P T-5 Performa Therm Miller & Weber INC USA 4K5080, barómetro GE Druck DPI 800 Pressure Indicator S/N 8000014068, lector microStar [5], linac Siemens Mevatron (Modelo: Mevatron M6E, serial N° 2654 – S14), linac Elekta Infinity (Marca: Elekta, modelo: Infinity, serie: 2942), tomógrafo Simulador Computarizado (Modelo: CT Óptima General Electric) y el dosímetro OSLD nanoDot $Al_2O_3:C$ [1].

En la Tabla 2 se indican las características del OSLD nanoDot [6, 7], y en la Tabla 3 se presentan las especificaciones técnicas del OSLD nanoDot [8, 9, 10, 11].

Tabla II. Características del $Al_2O_3:C$ OSLD nanoDot [8, 9, 10, 11]

Cristal [zafiro sintético]	$Al_2O_3:C$
Dimensiones de la máscara del dosímetro [mm ³]	10 x 10 x 2
Espesor A/P-P/A máscara [mm]	0,36
Densidad de la máscara [g/cm ³]	1,03
Diámetro del cristal [mm]	5,00
Espesor lamina cobertora de poliéster [mm]	0,03
$Al_2O_3:C$ (dopación) [ppm]	500,00
Densidad del cristal [g/cm ³]	3,97
Espesor del cristal [mm]	0,30
Número atómico efectivo del cristal [Z]	10,20
Punto de fusión del cristal [°C]	2054
Punto de ebullición del cristal [°C]	3000
Conductividad térmica del cristal [W/mK]	18,00

Tabla III. Características y especificaciones técnicas del Maniquí. []

Material [Homogéneo]	Láminas sólidas PMMA Pexiglas. Formula: $C_5H_8O_2$	
Densidad [g/cm ³]	1,1700	
Número atómico efectivo [Z]	6,2400	
Coefficiente de atenuación másico [cm ² /g]	0,0178	
Densidad electrónica [e/g]	$3,01 \times 10^{23}$	
Dimensiones de cada lámina PMMA [mm ³]	140,0 X 140,0 X 10,0.	
Dimensiones de cada inserto [mm ³]	35,0 X 35,0 X 20,0.	
Material [Heterogeneidades]	Aire	Densidad [g/cm ³]
		Coeff. Atén. Másico [cm ² /g]
		Numero atómico [Z]
		Densidad electrónica [e/g]
		0,001205
		0,025200
		7,640000
		$3,01 \times 10^{23}$

Las irradiaciones experimentales se realizaron sobre un maniquí Homogéneo (acrílico), con densidad de 1,170 g/cm³ (Figura 1a) [12, 13]; así mismo, en un medio Heterogéneo (aire, y acrílico) (Figura 1b). Incluso se puede introducir otros tipos de insertos cuyo número atómico no sea mayor a diez ($Z < 10$), y adecuándose a las dimensiones que posee el maniquí.

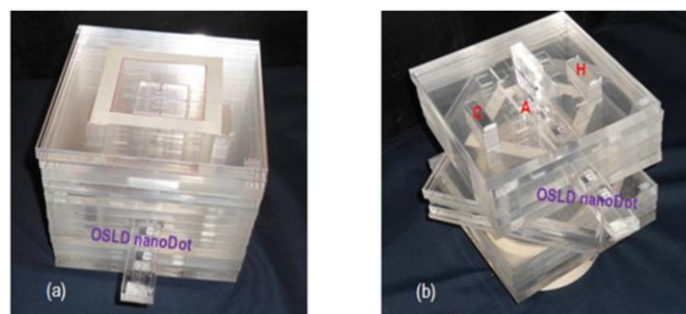


Fig 1: (a). Maniquí Homogéneo con una porta singular de OSL nanoDot, para ser ubicado en los puntos de evaluación. (b) Maniquí Heterogéneo con dispositivos de C: carbón; A: aire; H: hueso insertados.

La metodología utilizada en cada procedimiento de evaluación está sujeto a la reproducción de lo planificado en los TPS, que depende de: el algoritmo utilizado, factores geométricos especiales, aspectos dosimétricos básicos y especiales (administrados por los LINACs), las UM (calculados por los TPSs dentro de puntos fijos en el maniquí Homogéneo y/o Heterogéneo

con tamaño de campo elegido), la distancia fuente al punto de interés, tipo de energía, tasa de dosis y, adicionalmente, los dosímetros OSLDs nanoDot y la CIC, cuyas medidas están sujetas a sus incertidumbres correspondientes.

Los factores de caracterización son (Tabla 4):

Tabla IV. Factores de Caracterización de los dosímetros OSLD nanoDot, usando fotones de 6MV.

FACTORES POR CARACTERIZACIÓN	PROCEDIMIENTO	ESPECIFICACIONES
Factor por Homogeneidad	Se irradiaron 10 unidades de dosímetros OSLD nanoDot. Luego se realizaron las lecturas y, finalmente, se aplicó correcciones a las lecturas, eligiéndose los OSLD's más homogeneizados.	100 UM, Tasa de Dosis: 200 UM/min, SSD: 93.7 cm, Profundidad: 6.3 cm, Campo: 6 cm x 6 cm. Gantry: 0°, Colimador: 0°, Mesa: 0°.
Factor por Desvanecimiento en el tiempo	Después de irradiado el OSLD, se realizaron las lecturas en forma consecutiva. El desvanecimiento en el tiempo se registró como pérdida de señal después de la irradiación.	El nanoDot experimentó una caída agua de señal dentro de los 15 minutos después de ser irradiado.
Factor por Corrección de Agotamiento	Se irradiaron 3 dosímetros OSLD que fueron leídos 20 veces consecutivamente. Posterior a cada lectura, una pequeña cantidad de las cargas atrapadas se agotan y con ello la señal luminiscente disminuye.	200 UM, Tasa de Dosis: 320 UM/min, SSD: 93.7 cm, Profundidad: 6.3 cm, Campo: 6 cm x 6 cm. Gantry: 0°, Colimador: 0°, Mesa: 0°.
Factor por Reproducibilidad de las Lecturas	Para verificar la constancia de la respuesta del dosímetro OSLD, se irradiaron 6 nanoDots ubicados en el maniquí homogéneo. Se conformaron 3 grupos de OSLD, irradiados a 100, 150 y 200 UM respectivamente. Después de las realizadas irradiaciones, se llevaron a cabo las lecturas. Luego se procedió a separar un OSLD de cada grupo y el otro OSLD se procedió a blanquearlos. Se irradiaron nuevamente a cada uno bajo los mismos parámetros al inicio del proceso.	Tasa de Dosis: 200 UM/min, SSD: 93.7 cm, Profundidad: 6.3 cm, Campo: 6 cm x 6 cm. Gantry: 0°, Colimador: 0°, Mesa: 0°.
Factor por Dependencia Angular	Se irradiaron 3 OSLD nanoDot ubicados en el maniquí homogéneo.	6MV, 200 UM, Tasa de Dosis: 200 UM/min, SSD: 93.7 cm, Profundidad: 6.3 cm, Campo: 6 cm x 6 cm. Gantry: 0°, 90° y 270°, Colimador: 0°, Mesa: 0°.
Factor por Linealidad	La curva de respuesta del OSLD nanoDot en función de la DA comprende 3 regiones: Lineal, supralineal y saturación. Se irradiaron 7 OSLD nanoDot a 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 300 UM.	6MV, Tasa de Dosis: 200 UM/min, SSD: 93.7 cm, Profundidad: 6.3 cm, Campo: 6 cm x 6 cm. Gantry: 0°, Colimador: 0°, Mesa: 0°.

EVALUACIONES DE TPS.

Como se indicó en la Tabla 1 y teniéndose en cuenta la complejidad de configurar las pruebas, se ha establecido regiones para los δ_1 , δ_2 , δ_3 y δ_4 en tres niveles con diferentes complejidades geométricas: [4]

Geometría Simple [3D]: Un campo (Cuadrado, Rectángulo, Oblicuo).

Para calcular los valores de DA local utilizando maniquí homogéneo con la técnica SAD en 95cm en campos: cuadrados (6cm x 6cm), rectangulares (6cm x 4cm) y oblicuos (6cm x 6cm) sin accesorios especiales, solo con ajustes del colimador, en posición fija del Gantry (0° y 25°), con pesos iguales y posición fija de la mesa de tratamiento.

Geometría Compleja [3D]: Tres Campos (Cuadrado, Rectángulo).

Para calcular los valores de DA local utilizando maniquí homogéneo con la técnica SAD en 95cm, 93.2cm y 93.1cm en campos complejos: cuadrados (6cm x 6cm) y rectangulares (6cm x 4cm) con accesorios especiales (ajustes del colimador), posiciones del Gantry en ángulos especiales (0°, 90° y 270°), con pesos iguales y posición fija de la mesa de tratamiento.

Geometrías Combinadas [3D - MLCs]: Un campo – Diferentes Ángulos de Gantry (Circular abierto, Irregular “Y” invertida, Oblícuo)

Para calcular los valores de la DA local utilizando maniquí homogéneo con técnica SAD en 95cm, en campos de geometría combinada: circular abierto (diámetro 6cm), irregular “Y” invertida (6cm x 6cm) y Oblícuos (6cmx6cm) de alta complejidad con accesorios muy especiales, ajustando el colimador de multihojas, posiciones del gantry en ángulos especiales (0°, 25°, 65°, 90°, 115°, 245°, 270°, 295° y 335°) y posición fija de la mesa de tratamiento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Factor de homogeneidad: Los OSLDs nanoDots seleccionados son los más homogenizados, y a cada uno individualmente se determina y se corrige su lectura por sensibilidad, estas lecturas corregidas se deben ajustar a un porcentaje del Coeficiente de Variación (%CV) del 2,0% [14]. En este trabajo se determinó un %CV igual a 1.012, el cual corresponde al factor por homogeneidad é intrínsecamente la sensibilidad, para este trabajo es de: 0.9999.

El factor por desvanecimiento: Para este tipo de evaluación de acuerdo a lo determinado por Viamonte, da Rosa et al., en 2008 [15], dicen transcurrido cinco (5) días posteriores a los primeros 15 minutos de irradiado los OSLD nanoDot, se ha detectado una caída de la señal con una desviación estándar (SD) entre 2.0 a 5.0, para este trabajo, se realizaron lecturas entre uno (1) a tres (3) días, obteniéndose una SD mínima de 0.66 y máxima 1.65 determinándose una media de 0.78, correspondiendo un factor por desvanecimiento en el tiempo de: 0.9989. El factor por corrección de agotamiento para este trabajo es: 0.9985.

Las investigaciones para la reproducibilidad realizadas por [14, 17] reportaron que por cada nueva lectura se pierde un %CV menos del 2.0%. En este trabajo, en los diferentes eventos un solo OSLD nanoDot fue leído de forma repetida tres (03) veces, reportando %CV mínimo de 0.15% y máximo de 0.93% en promedio la pérdida de 0,47% por cada señal de lectura.

Los OSLDs fueron irradiados con: 100.0 UM a 200.0 UM, en tal sentido el promedio del factor por reproducibilidad del elemento es: 0.9953.

Factor por dependencia angular: [16] señala una dependencia angular menos de 0.80%, en dependencias

angulares del gantry de 0.0° a 315.0°, [17] no se encontró ninguna dependencia considerable dentro de una incertidumbre experimental de 0.90% con angulación del gantry desde 0° a 360°. Después de realizar la normalización en la Tabla 4.7 dentro del 0.75% a 90° y 270.0° resultado muy próximo a los reportados, corresponde al factor por dependencia angular para este trabajo es de: 0.9925; en las evaluaciones angulares.

Se realizaron irradiaciones para esta evaluación que van desde 5.0 cGy hasta 300.0 cGy se observó un comportamiento totalmente lineal inicialmente hasta 50.0 cGy tanto el valor de la pendiente de la CIC y del nanoDot presenta un comportamiento de superposición, luego se observa que a partir de los 50.0 cGy hasta los 300 cGy se mantiene la linealidad pero su tendencia se observa que se van separando cuyo resultado está dentro de las tolerancias propuestas por las diferentes publicaciones, es decir el factor por linealidad es 1.0000, el desarrollo del presente trabajo es en el rango de 100.0 cGy a 200.0 cGy. [18] demostraron que el OSLD nanoDot presenta una buena linealidad de respuesta a la dosis de radiación desde 5.0 Gy hasta 50.0 Gy. [19] demostraron que la señal de respuesta a la dosis del OSLD nanoDot a la radiación es lineal desde 10-4 Gy a 10 Gy. [20, 21] encontraron un comportamiento lineal a la respuesta de dosis del OSLD nanoDot desde 50.0 cGy hasta 200.0 cGy para un haz de energía con fotones de 6.0 MV determinándose una desviación estándar (SD) menos del 1.0%. [15] determinan una linealidad de respuesta del OSLD nanoDot para dosis de bajos rangos de 2.0 cGy a 25 cGy con haces de fotones de 6.0 MV, y respuesta lineal para rangos de dosis empleados en radioterapia de 25 cGy a 1500 cGy con fotones de 6.0 MV. Factor de dispersión del maniquí: En el presente trabajo se ha determinado un %CV de 1.1538% para un factor de dispersión del maniquí de: 1.0096.

Tabla V. Resumen a la evaluación de las regiones del haz de fotones configurado con Geometrías Simples [3D]: (Cuadrado, Rectángulo y Oblicuo). Valores medidos con OSLD nanoDot, CIC y calculado en el TPS Xio. La irradiación se realiza sobre un fantoma homogéneo (acrílico).

Geometría	Evaluación/Perfil		DA Local [cGy]			$\delta 1:2,0\%$		$\delta 2:10,0\%$		$\delta 3:3,0\%$		$\delta 4:3,0\%$	
	Ubicación	Región	OSLD	CIC	TPS	OSLD	CIC	OSLD	CIC	OSLD	CIC	OSLD	CIC
Campo Cuadrado: 6 x 6 cm ² /Gantry: 0°/Prof: 5,0cm	Eje del Haz	$\delta 1:0,0$	95,4	99,1	100	1,98	0,91	---	---	---	---	---	---
	Penumbra del Haz	$\delta 2:-3,0$	53,24	55,25	55,4	---	---	3,9	0,27	---	---	---	---
		$\delta 2:+3,0$	53,09	55,19	55,3	---	---	4	0,2	---	---	---	---
	Fuera del eje	$\delta 3:-2,0$	95,04	98,03	98,1	---	---	---	---	2,26	0,07	---	---
		$\delta 3:+2,0$	95,16	98,37	98,5	---	---	---	---	2,18	0,13	---	---
	Fuera del campo	$\delta 4:-5,0$	7,2	7,52	7,6	---	---	---	---	---	---	2,76	1,05
$\delta 4:+5,0$		5,43	5,66	5,8	---	---	---	---	---	---	2,76	2,41	
Campo Rectangular: 6 x 6 cm ² /Gantry: 25°/Prof: 5,0cm	Eje del Haz	$\delta 1:0,0$	95,6	99,32	100	1,7	0,68	---	---	---	---	---	---
	Penumbra del Haz	$\delta 2:-2,0$	47,63	49,74	50,3	---	---	5,31	1,12	---	---	---	---
		$\delta 2:+2,0$	47,11	49,06	49,7	---	---	5,21	1,29	---	---	---	---
	Fuera del eje	$\delta 3:-1,0$	94,45	98,06	98,2	---	---	---	---	2,48	0,14	---	---
		$\delta 3:+1,0$	94,59	98,16	98,3	---	---	---	---	2,17	0,14	---	---
	Fuera del campo	$\delta 4:-5,0$	1,14	1,19	1,2	---	---	---	---	---	---	2,5	0,84
$\delta 4:+5,0$		1,16	1,19	1,2	---	---	---	---	---	---	1,69	0,84	
Campo Cuadrado: 6 x 6 cm ² /Gantry: 25°/Prof: 5,50cm	Eje del Haz	$\delta 1:0,0$	96,54	99,99	100	1,08	0,01	---	---	---	---	---	---
	Penumbra del Haz	$\delta 2:-3,0$	75,27	78,59	76,94	---	---	5,2	1,03	---	---	---	---
		$\delta 2:+3,0$	74,57	77,95	76,23	---	---	5,49	1,22	---	---	---	---
	Fuera del eje	$\delta 3:-2,0$	93,17	97,09	97,3	---	---	---	---	2,48	0,22	---	---
		$\delta 3:+2,0$	95,87	99,9	100,3	---	---	---	---	2,66	0,4	---	---
	Fuera del campo	$\delta 4:-5,0$	10,87	11,28	11,5	---	---	---	---	---	---	2,86	1,95
$\delta 4:+5,0$		10,54	10,31	10,9	---	---	---	---	---	---	2,84	1,58	

Tabla VI. Resumen a la evaluación de las regiones del haz de fotones configurado con Geometría Compleja [3D]: Cuadrado, Rectángulo, Cuñas, Pesos (Iguales - Diferentes) en tres campos abiertos (0°, 90°, y 270°). Valores medidos con OSLD nanoDot, CIC y calculado en el TPS Xio. La irradiación se realiza sobre un fantoma homogéneo (acrílico).

Geometría	Evaluación/Perfil		DA Local [cGy]			$\delta 1:3,0\%$		$\delta 2:15,0\%$		$\delta 3:3,0\%$		$\delta 4:4,0\%$	
	Ubicación	Región	OSLD	CIC	TPS	OSLD	CIC	OSLD	CIC	OSLD	CIC	OSLD	CIC
3 campos cuadrado: 6 x 6 cm ² /Gantry: 0°, 90°, 270°/Prof: 5,0cm, 6,8cm y 6,9cm	Eje del Haz	$\delta 1:0,0$	195,36	199,58	200,1	2,37	0,26	---	---	---	---	---	---
	Penumbra del Haz	$\delta 2:-3,0$	169,78	172,78	173,5	---	---	2,14	0,5	---	---	---	---
		$\delta 2:+3,0$	168,52	168,52	171,9	---	---	1,97	0,6	---	---	---	---
	Fuera del eje	$\delta 3:-2,0$	196,89	198,67	199,9	---	---	---	---	2,51	0,61	---	---
		$\delta 3:+2,0$	196,14	198,1	199,5	---	---	---	---	2,67	0,2	---	---
	Fuera del campo	$\delta 4:-6,5$	113,98	115,53	116	---	---	---	---	---	---	1,74	0,4
$\delta 4:+6,5$		113,79	115,47	116	---	---	---	---	---	---	1,9	0,46	
3 campos rectangulares: 6 x 6 cm ² /Gantry: 0°,	Eje del Haz	$\delta 1:0,0$	196,39	199,58	200,1	1,85	0,26	---	---	---	---	---	---
	Penumbra del Haz	$\delta 2:-2,5$	77,28	78,27	78,6	---	---	1,68	0,42	---	---	---	---
		$\delta 2:+2,5$	76,93	77,36	78,6	---	---	0,86	0,31	---	---	---	---
	Fuera del eje	$\delta 3:-1,0$	194,18	196,18	197,7	---	---	---	---	1,78	0,39	---	---

90°,270°/Prof: 5,0cm, 7,2cm y 6,9cm		$\delta_3:+1,0$	194,79	194,79	197,6	---	---	---	---	1,42	0,5	---	---	
	Fuera del campo	$\delta_4:-4,5$	3,88	3,96	4	---	---	---	---	---	---	---	3	1
		$\delta_4:+4,5$	3,91	3,99	4	---	---	---	---	---	---	---	2,25	0,25
3 campos cuadrados: 6 x 6 cm ² /Gantry: 0°, 90°,270°/VW 60°, peso dif/Prof: 5,0cm, 7,2cm y 6,9cm	Eje del Haz	$\delta_1:0,0$	196,65	199,6	200	2,16	0,2	---	---	---	---	---	---	
	Penumbra del Haz	$\delta_2:-3,0$	48	48,96	49,2	---	---	2,44	0,49	---	---	---	---	
		$\delta_2:+3,0$	166,79	170,24	171,1	---	---	2,52	0,5	---	---	---	---	
	Fuera del eje	$\delta_3:-2,0$	157,9	160,78	161,4	---	---	---	---	---	2,36	0,38	---	---
		$\delta_3:+2,0$	221,35	225,9	227,2	---	---	---	---	---	2,57	0,57	---	---
	Fuera del campo	$\delta_4:-4,0$	5,17	5,28	5,3	---	---	---	---	---	---	---	2,45	0,38
		$\delta_4:+4,0$	14,21	14,51	14,6	---	---	---	---	---	---	---	2,67	2,67

Tabla VII. Resumen a la evaluación de las regiones del haz de fotones configurado con Geometrías Combinadas [3D - MLCs] Campos: Circular, Irregular, "Y" Invertida, Oblicuos, con Campos Abiertos (0.0°, 25.0°, 65.0°, 90.0°, 115.0°, 245.0°, 270.0°, 295.0°, y 335.0°). Valores medidos con OSLD nanoDot, CIC y calculado en el TPS Xio. La irradiación se realiza sobre un fantoma homogéneo (acrílico).

Geometría	Evaluación/Perfil		DA Local [cGy]			$\delta_1:4,0\%$		$\delta_2:15,0\%$		$\delta_3:4,0\%$		$\delta_4:5,0\%$	
	Ubicación	Región	OSLD	CIC	TPS	OSLD	CIC	OSLD	CIC	OSLD	CIC	OSLD	CIC
Campo circular: diámetro 6 cm/Gantry: 0°/Prof: 5,0cm	Eje del Haz	$\delta_1:0,0$	98,03	99,59	100	1,97	0,41	---	---	---	---	---	---
	Penumbra del Haz	$\delta_2:-3,0$	45,72	46,67	46,9	---	---	2,52	0,49	---	---	---	---
		$\delta_2:+3,0$	43,9	44,82	45,1	---	---	2,73	0,62	---	---	---	---
	Fuera del eje	$\delta_3:-2,0$	94,33	96,26	96,8	---	---	---	---	2,55	0,56	---	---
		$\delta_3:+2,0$	94,36	96,26	96,9	---	---	---	---	2,62	0,66	---	---
	Fuera del campo	$\delta_4:-5,0$	1,64	1,68	1,7	---	---	---	---	---	---	---	3,65
$\delta_4:+5,0$		1,55	1,59	1,6	---	---	---	---	---	---	---	3,12	0,62
Campo irregular: 6 x 6 cm ² /Gantry: 0°/Prof: 5,0cm	Eje del Haz	$\delta_1:0,0$	97,58	99,56	100	2,42	0,44	---	---	---	---	---	---
	Penumbra del Haz	$\delta_2:-1,5$	74,6	76,2	76,5	---	---	2,55	0,39	---	---	---	---
		$\delta_2:+1,5$	76,65	78,21	78,6	---	---	2,48	0,5	---	---	---	---
	Fuera del eje	$\delta_3:-1,0$	91,38	93,25	94,1	---	---	---	---	2,89	0,9	---	---
		$\delta_3:+1,0$	92,48	94,34	94,9	---	---	---	---	1,86	0,59	---	---
	Fuera del campo	$\delta_4:-4,0$	2,14	2,19	2,2	---	---	---	---	---	---	---	2,73
$\delta_4:+4,0$		2,32	2,37	2,4	---	---	---	---	---	---	---	3,33	1,26
Campo "Y" invertido abierto 6 x 6 cm ² /Gantry: 0°/Prof: 5,0cm	Eje del Haz	$\delta_1:0,0$	97,62	99,59	100	2,38	0,41	---	---	---	---	---	---
	Penumbra del Haz	$\delta_2:-1,0$	70,11	71,53	71,8	---	---	2,35	0,38	---	---	---	---
		$\delta_2:+1,0$	68,58	69,82	70,1	---	---	2,17	0,4	---	---	---	---
	Fuera del eje	$\delta_3:-0,5$	91,37	93,25	95,3	---	---	---	---	2,9	0,9	---	---
		$\delta_3:+0,5$	92,41	94,34	96,1	---	---	---	---	2,62	0,59	---	---
	Fuera del campo	$\delta_4:-2,5$	5,74	5,87	5,9	---	---	---	---	---	---	---	2,71
$\delta_4:+2,5$		5,36	5,47	5,5	---	---	---	---	---	---	---	2,61	0,54
Campo oblicuo/Gantry: 25°, 65°, 115°, 245°, 295°, 335°/Cuadrado: 6x6cm ² /Prof: 7,6cm, 7,7cm, 7,8cm	Eje del Haz	$\delta_1:0,0$	194,8 3	198,8	199,8	2,45	0,5	---	---	---	---	---	---
	Penumbra del Haz	$\delta_2:-3,0$	34,44	35,17	35,3	---	---	2,44	0,37	---	---	---	---
		$\delta_2:+3,0$	74,15	75,73	76	---	---	2,43	0,35	---	---	---	---
	Fuera del eje	$\delta_3:-2,0$	97,29	99,32	99,7	---	---	---	---	2,42	0,38	---	---
		$\delta_3:+2,0$	99,94	101,9 8	102,6	---	---	---	---	2,59	0,6	---	---
	Fuera del campo	$\delta_4:-4,0$	4,08	4,17	4,2	---	---	---	---	---	---	---	2,86
$\delta_4:+4,0$		7,37	7,53	7,6	---	---	---	---	---	---	---	3,03	0,92

De acuerdo con las Tablas de 5 al 7, los resultados obtenidos en la región del haz δ_1 para un campo cuadrado de $6 \times 6 \text{ cm}^2$ y profundidad 5cm, para tres campos cuadrados de $6 \times 6 \text{ cm}^2$, en angulaciones y profundidades diferentes y para el campo oblicuo, de angulaciones y profundidades diferentes, los valores obtenidos están dentro de los valores esperados. Se observa que la CI presenta valores menores de acuerdo con las características de esta, buena repetitividad, buena estabilidad como lo demuestra Angel Rodríguez, en 2015 [22]; mientras que para los OSLD los valores son mayores ya que de acuerdo con lo que se observa en los valores de caracterización.

Los valores presentados en la región δ_2 son mayores estos debidos a la región de alto gradiente, teniendo buena respuesta de OSLD, para estas situaciones.

En las aplicaciones de geometrías combinadas, con angulaciones del Gantry estas pruebas permiten comprender la variación de la respuesta del dosímetro con el ángulo de incidencia de la radiación, lo cual es valioso para cualquier dosímetro. Para dosímetros nanoDot esta comprensión es importante si el dosímetro se coloca en un dispositivo, para control de calidad clínico para evaluar la dosis de un escenario de tratamiento multihaz [23].

Las evaluaciones en las diferentes regiones del haz de radiación con los OSLD nanoDot, contenidos en el maniquí sobre el cual se han configurado Geometría simple, en medio homogéneo, se determinó una incertidumbre de 3.01%; Geometría compleja, en medio homogéneo, se determinó una incertidumbre de 2.16%, Geometría combinada, en medio homogéneo, se determinó una incertidumbre de 2.62%, Geometrías diversas, en medio heterogéneo, se determinó una incertidumbre de 2.57%, resultados que se determinaron entre los cálculos realizados en el TPS Xio y las lecturas

registradas en los OSLD nanoDot después de ser irradiados en el LINAC. De lo cual se concluye que los OSLD son confiables para realizar este tipo de evaluación.

Se ha determinado que los valores de la DA local son menores en promedio al 2.28%, con los dosímetros OSLD nanoDot al comparar las lecturas realizadas con las evaluaciones Tipo B de la incertidumbre estándar (materiales e instrumentos, especificaciones técnicas, calibraciones e incertidumbres asignadas a los protocolos). Se tiene una probabilidad de cobertura con un nivel de confianza del 94.68 por ciento, con seis grados de libertad. Se concluye que los OSLD nanoDot son apropiados para este control de calidad postal que se deben integrar a los Protocolos de los Programas de Garantía y Control de Calidad de uso clínico.

CONCLUSIONES

Las mediciones realizadas corroboran lo que se encontró en las publicaciones. Por tanto, las mediciones realizadas con precisión del nanoDOT, para la propuesta de control de calidad mostró resultados adecuados para ser usadas en todas las situaciones presentadas, considerando los factores de corrección evaluadas en la caracterización, por tanto, pueden implementarse en protocolos de uso múltiple, pero debe considerarse su caracterización de forma individual. Estos dosímetros han demostrado ser robustos y muy adecuados para aplicaciones in vivo o como auditorias para las evaluaciones de hace en diferentes situaciones clínicas de la salida del haz. Se ha encontrado que los OSLD proporcionan beneficios en términos de tiempo de lectura, lo que agiliza la lectura de miles de dosímetros. Además, el beneficio de este dosímetro es la finita vida útil que requiere que la dosis acumulada de cada dosímetro rastree la historia y la diferente sensibilidad de cada dosímetro, lo que a su vez requiere la determinación de la corrección de la sensibilidad del elemento.

REFERENCIAS

- [1] Landauer[®] (2019). "Nanodot[™] Dosimeter": Patient Monitoring Solutions. [En línea]. Disponible en: <https://www.landauer.com/sites/default/files/product-specification-file/50749%20NanoDot%20FDA.pdf>
- [2] P.T. Noreña. "Dosimetría interna con el uso del OSL nanodot", tesis para optar el grado académico de maestro en mención en física médica, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, 2016.
- [3] Organismo Internacional de Energía Atómica. (2005). "Determinación de la dosis absorbida en radioterapia con haces externos: Un Código de Práctica Internacional para la dosimetría basada en patrones de dosis absorbida en agua. [En línea]. Disponible en: https://wwwpub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS_398s_Web.pdf
- [4] TRS-430, IAEA, "Puesta en Servicio y Garantía de Calidad de los Sistemas de Planificación Computarizados para el Tratamiento del Cáncer con Radiación", 2004.
- [5] Landauer. (2019). "MicrostarII Medical Dosimeter System User Manual v.1.3". [En línea]. Disponible en: <https://www.landauer.com/sites/default/files/2020-01/MICROSTAR%20ii%20USER%20MANUAL.pdf>
- [6] C. A. Perks, G. Le Roy y B. Prugnaud, "Introduction of the inLight monitoring service", *Radiat Prot Dosimetry*, no. 125, pp. 1-4, 2007.
- [7] P. A. Jursinic. "Changes in optically stimulated luminescent dosimeter (OSLD) dosimetric characteristics with accumulated dose" *Med Phys* vol. 37, no. 1, pp. 132-140, 2010.
- [8] S.W.S. McKeever et al., "Concepts and approaches to in situ luminescence dating of martian sediments". *Radiation Measurement*, vol. 37, pp. 527-534, 2003.
- [9] E.G. Yukihara y S. W. McKeever, "Optically stimulated luminescence (OSL) dosimetry in medicine". *Phys. Med. Biol.*; 53: R351-R379 (2008).
- [10] P. Alvarez, J. Aguirre y D. Followill, "SU-E-T-86: Evaluation of the OSLD system for remote dosimetry audits implemented by the RPC", *Med. Phys.*, vol.38, no. 3505, 2011.
- [11] G. Patiño. "Estimación de dosis en aplicaciones radiológicas basada en la dosimetría por luminiscencia ópticamente estimulada", tesis para optar grado académico de doctor, Universidad de Valencia, 2016.
- [12] P. Alvarez, J. Aguirre y D. Followill, "SU-E-T-86: Evaluation of the OSLD system for remote dosimetry audits implemented by the RPC", *Med. Phys.*, vol. 38, no. 3505, 2011.
- [13] J. Aguirre et al., "WED-BRB-08: Validation of the commissioning of an optically stimulated luminescence (OSL) system for remote dosimetry audits", *Med. Phys.*, vol., 37, no. 3428, 2010.
- [14] E.G. Yukihara et al., "High precision dosimetry for radiotherapy using the optically stimulated luminescence technique and thin Al₂O₃:C dosimeters". *Phys Med Biol.* 7, vol 50, no. 23, pp. 5619-28, 2005.
- [15] A. Viamonte et al., "Radiotherapy dosimetry using a comercial OSL system". *Phys Med Biol.*, vol. 35, no. 4, pp. 1261-6, 2008.
- [16] M.C. Aznar et al., "Real-time optical-fibre luminescence dosimetry for radiotherapy: physical characteristics and applications in photon beams". *Phys. Med. Biol.* 49 1655-69, 2004.
- [17] P.A. Jursinic. "Characterization of optically stimulated luminescent dosimeters, OSLDs, for clinical dosimetric measurements", *Med. Phys.* vol. 34, pp. 4594-604 (2007).
- [18] S.W.S. McKeever et al., "Pulsed optically stimulated luminescence dosimetry using α - Al₂O₃:C", *Radiation Protection Dosimetry* . vol 65, pp. 267-272, 1996.
- [19] M.S. Akselrod, S.W.S McKeever. "A radiation dosimetry method using pulsed optically stimulated luminescence". *Radiat. Prot. Dosim.* 81 (3), 167-175. (1999).
- [20] E.G. Yukihara et al., "Effect of high-dose irradiation on the optically stimulated luminescence of Al₂O₃:C". *Radiation Measurements*, vol. 38, no.3, pp. 317-30, 2004.
- [21] S.D. Miller y M.K. Murphy. "Technical performance of the Luxel Al₂O₃:C optically stimulated luminescence dosimeter element at radiation oncology and nuclear accident dose levels". *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 123, no. 4, pp. 435-42, 2007.
- [22] A. Rodríguez. "Implementación de un sistema postal de control de calidad para TPSs en teleterapia", tesis para optar el grado académico de maestro en mención en física médica, Universidad Nacional de Ingeniería, 2015.
- [23] A. López et al., "Caracterización clínica de dosímetros OSL para su uso en dosimetría de haces de teleterapia en fraccionamiento convencional". *Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnologías Avanzadas*. Ciudad de México, pp. 846- 854, 2015.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe