



ARTÍCULO ORIGINAL

## Caracterización dosimétrica de equipos para radioterapia superficial con rayos X

Dosimetric characterization of X-ray Surface Radiotherapy Equipments

Yoval Aguiar Ferro <sup>1</sup>✉<sup>ID</sup>, Julio Nazco Torres <sup>1</sup><sup>ID</sup>, Rodolfo Alfonso Laguardia<sup>2</sup><sup>ID</sup>, Jorge Milian Baldor<sup>1</sup><sup>ID</sup>, Lucien Bory Porras<sup>1</sup><sup>ID</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Ciencias Médicas de Pinar del Río. Centro de Atención al Paciente Oncológico de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba.

<sup>2</sup>Universidad de La Habana. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba.

**Recibido:** 6 de julio de 2020

**Aceptado:** 31 de agosto de 2020

**Publicado:** 12 de octubre de 2020

**Citar como:** Aguiar Ferro Y, Nazco Torres J, Alfonso Laguardia R, Milian Baldor J, Bory Porras L. Caracterización dosimétrica de equipos para radioterapia superficial con rayos X. Rev Ciencias Médicas [Internet]. 2020 [citado: fecha de acceso]; 24(5): e4592. Disponible en: <http://revcmpinar.sld.cu/index.php/publicaciones/articulo/view/4592>

### RESUMEN

**Introducción:** en Cuba, en el 2018, fueron diagnosticados un total de 12 070 nuevos casos de cáncer de piel, de los cuales se estima que 11 587 corresponden a la variante no melanómica. La radioterapia con rayos x está considerada como la primera opción de tratamiento en muchos de estos casos. Recientemente, el sistema nacional de salud, adquirió cuatro equipos de la marca SENSUS SRT-100™ para el tratamiento del NMSC.

**Objetivo:** desarrollar una metodología estandarizada para la caracterización dosimétrica de los equipos de radioterapia superficial con rayos X instalados en Cuba.

**Métodos:** se caracterizaron cuatro equipos de radioterapia SENSUS SRT-100™ para cada una de sus calidades radiológicas, en términos de linealidad, estabilidad, capa hemirreductora, tasas de dosis de referencia, perfiles de dosis, factores de cono y porcentaje de dosis en profundidad. Se emplearon para ello, las recomendaciones de la AAPM TG-61 y el IAEA-TRS 398.

**Resultados:** los promedios de las HVLs (mm Al) y sus respectivos coeficientes de variación (CV) fueron de 5,526 – 5,2 %; 1,130 - 2,1 % y 2,007 - 2,1 % para 50,70 y 100 kV respectivamente. Los rendimientos presentaron poca variabilidad entre máquinas (CV < 3%) y fueron muy similares por los métodos “en agua” y “en aire” (discrepancia. < 0,5 %).

**Conclusiones:** los equipos muestran una excelente estabilidad, y características dosimétricas muy similares entre ellos, lo cual permite establecer valores de referencia para eventuales auditorías externas y re-ajustes de los haces ulteriormente a los mantenimientos o reparaciones que impliquen al generador de rayos X.

**Palabras clave:** Dosimetría; Radioterapia; Terapia Por Rayos X; Neoplasias Cutáneas, Calibración.

## ABSTRACT

**Introduction:** in Cuba, in 2018, a total of 12 070 new cases of skin cancer were diagnosed, from which it is estimated that 11 587 correspond to the non-melanoma type. Radiation therapy with X-rays is considered the first-line treatment in many of these cases. Recently, the national healthcare system acquired four SENSUS SRT-100™ units for treating Non-Melanoma Skin Cancer (NMSC).

**Objective:** to develop a standardized methodology for the dosimetric characterization of the equipments of surface radiotherapy with X-rays installed in Cuba.

**Methods:** four SENSUS SRT-100™ radiotherapy equipments were characterized for each of their radiological qualities, in terms of linearity, stability, half value layer, reference dose rates, dose profiles, cone factors and percentage depth dose. The recommendations of the AAPM TG-61 and the IAEA-TRS 398 were applied for this purpose.

**Results:** the averages of HVLs (mm Al) and their respective coefficients of variation (CV) were 5,526 – 5,2 %; 1,130 – 2,1 % and 2,007 – 2,1 % for 50, 70 and 100 kV respectively. The yields presented little variability between machines (CV < 3%) and were very similar by the methods "in water" and "in air" (discrepancy < 0,5 %).

**Conclusions:** the equipments show excellent stability and very similar dosimetric characteristics among them, which allows establishing reference values for eventual external audits and beam readjustments after the maintenance or repairs involving the X-ray generator.

**Keywords:** Dosimetry; Radiotherapy; Skin Neoplasms; X-Ray Therapy; Calibration.

## INTRODUCCIÓN

El cáncer de piel es una enfermedad maligna que tiene una alta prevalencia mundial. <sup>(1)</sup> Este tipo de neoplasia es uno de los más regularmente registrados en todo el mundo. En 2018, aproximadamente 91 000 nuevos casos fueron reportados en Lituania. <sup>(2)</sup> Su prevalencia es tal que alrededor del 20 % de los estadounidenses desarrollarán un cáncer de piel a lo largo de sus vidas.

El número de casos reportados en los Estados Unidos es mayor que el de cualquier otro tipo de cáncer. El carcinoma basal, el escamoso y el melanoma, son los principales tipos de cáncer de piel. <sup>(1)</sup> Específicamente el cáncer cutáneo no melanómico (NMSC) constituye la variante más común. Se reportan las mayores tasas de incidencia en Australia y Europa con valores respectivos de 1 000 y 98 por cada cien mil personas. <sup>(3)</sup>

En general, los NMSCs representan el 96 % de todos los cánceres de la piel. <sup>(4)</sup> En el caso de Cuba, según el Anuario Estadístico de Salud de 2018, <sup>(5)</sup> se diagnosticaron un total de 12 070 nuevos casos de cáncer de piel, con mayor incidencia en hombres, de los cuales se estima que 11 587 corresponden a la variante no melanómica. <sup>(4)</sup>

Son múltiples las opciones disponibles para el tratamiento del cáncer de piel no melanómico, entre ellas se encuentran la cirugía de escisión, cirugía láser, quimioterapia tópica, criocirugía, y radioterapia. <sup>(1,6)</sup> Casi todas las formas de este tipo de cáncer pueden causar serios defectos

cosméticos como resultado de grandes áreas afectadas, lo cual pudiera deteriorar considerablemente la calidad de vida del paciente.

Este último aspecto es de medular importancia y debe ser tenido muy en cuenta por oncólogos y dermatólogos a la hora de decidirse por una u otra terapéutica. Entre todos los tratamientos disponibles, la radioterapia ha elevado su demanda debido a que puede ser aplicada en pacientes en los cuales la cirugía está contraindicada o que reúsan la variante quirúrgica de acuerdo con razones cosméticas.<sup>(1)</sup>

Entre las distintas modalidades de radioterapia para el NMSC se encuentran: la radioterapia externa con electrones, la braquiterapia en sus modalidades electrónica y con radionúclidos y la radioterapia superficial con rayos x.<sup>(1,6)</sup> Existen diferencias significativas entre ellas, pero la radioterapia superficial es superior a la radioterapia con haces de electrones y a la braquiterapia electrónica para el tratamiento de la mayoría de los casos de NMSC.

La radioterapia superficial con rayos x es en general un tratamiento efectivo y seguro para carcinomas de células basales y escamosas. Su tasa de curabilidad es similar a muchas opciones quirúrgicas y con resultados cosméticos superiores. Aspectos como una buena relación costo – beneficio, reducida tasa de recurrencia tumoral y excelentes resultados cosméticos, sugieren el mayor empleo de esta técnica en edades avanzadas.<sup>(6)</sup> Recientemente, la radioterapia superficial ha experimentado un renacimiento, motivado por el constante incremento del número de casos y por el avance de la tecnología que ha permitido el desarrollo de equipos con mejores prestaciones.<sup>(4,6,7,8)</sup>

Para administrar de manera segura la dosis precisa a los pacientes que así lo requieran, las unidades de tratamiento deben estar sometidas a un programa de garantía de calidad adaptado rigurosamente a los equipos más modernos. Con el objetivo de valorar el comportamiento de las máquinas de rayos x para radioterapia se deben realizar y documentar pruebas que contemplen aspectos de seguridad, mecánicos, eléctricos y dosimétricos.<sup>(9,10)</sup> En el caso de Cuba, los resultados de estas pruebas deben ser presentados a la Autoridad Reguladora de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos, así como al Centro Nacional de Seguridad Nuclear, con el fin de obtener el apto para uso clínico y la licencia correspondiente para su uso en pacientes.<sup>(11)</sup>

Recientemente fueron instalados en Cuba cuatro equipos destinados a la radioterapia superficial con rayos x manufacturados por SENSUS Healthcare (Boca Ratón, FL), del modelo SRT-100™. Los mismos fueron suministrados con un instrumental para controles de calidad dosimétricos de rutina, mas no para una caracterización dosimétrica minuciosa y completa, como la requerida en los equipos de radioterapia con aceleradores lineales. Se proveyó adicionalmente la documentación de fábrica, se detallaron los procedimientos de medición y resultados.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología estandarizada para la caracterización dosimétrica de los equipos de radioterapia superficial con rayos X instalados en Cuba, para brindar tratamientos más precisos y seguros en pacientes. Adicionalmente, se pretende verificar el grado de similitud dosimétrica entre los equipos estudiados del mismo modelo, que puede servir a los usuarios como herramienta de verificación redundante, intercambio de experiencias clínicas y traspaso de pacientes de un equipo a otro, al asegurar la robustez dentro del sistema nacional de salud.

## MÉTODOS

### Unidades de tratamiento

Fueron estudiadas cuatro unidades de tratamiento para radioterapia superficial instaladas en Cuba, manufacturadas por SENSUS Healthcare, del modelo SRT-100™. Este tipo de sistema ofrece haces de rayos X con calidades radiológicas de 50, 70 y 100 kV. Dispone asimismo, de aplicadores de contacto en el rango de 1 a 7,3 cm de diámetro, para una distancia fuente-superficie de la piel (SSD) de 15 cm, así como otros de 10 y 12,7 cm de diámetro para una SSD de 25 cm. Los filtros internos se posicionan automáticamente según la energía seleccionada, esto reduce potenciales errores humanos. El sistema satisface en general, los requerimientos de la Comisión Internacional Electrotécnica para equipos médicos en los aspectos mecánicos, eléctricos y de seguridad.

### Sistemas dosimétricos

Cada unidad fue suministrada con un sistema dosimétrico de la firma alemana PTW Freiburg, consistente en un maniquí plástico modelo *Acrylic slab phantom T2962*, una cámara de ionización *PTW 23342* (plano-paralela), calibrada en términos de dosis absorbida en agua ( $N_{D,w}$ ) por el propio laboratorio de la empresa suministradora, además de un electrómetro *PTW UNIDOS E* y un termómetro-barómetro *Opus 20*, también de manufactura alemana.

Con fines de verificaciones redundantes, fue empleado otro conjunto dosimétrico, perteneciente al Centro de Atención al Paciente Oncológico de Pinar del Río, consistente en una cámara *PTW 23342*, calibrada en términos de kerma en aire ( $N_k$ ) por el Laboratorio Secundario de Calibraciones Dosimétricas (LSCD) del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR), otra del tipo Farmer *PTW 30001* y un electrómetro *PTW UNIDOS*.

**Tabla 1.** Datos de la calibración de los sistemas dosimétricos empleados. Suministrado por el vendedor. Centro de Atención al Paciente Oncológico. 2019

<i>PTW 23342W, suministrada por vendedor</i>					
		<i>Unidad 1</i>		<i>Unidad 2</i>	
		<i><math>N_{D,w}</math> (Gy/nC) - 20 °C, 1013.25 hPa</i>			
		1,541		1,560	
<i>V nominal</i>	<i>Código</i>	<i>K<sub>Q</sub></i>	<i>Incertidumbre*</i>	<i>K<sub>Q</sub></i>	<i>Incertidumbre*</i>
50 kV	TW 50	1,005	1,7 %	1,007	1,7 %
70 kV	TW 70	1,010		1,033	
<i>PTW 23342 air, Centro de Atención al Paciente Oncológico</i>					
		<i><math>N_k</math>(Gy/nC) - 20 °C, 1013.25 hPa</i>		<i>Incertidumbre*</i>	
50 kV	CCRI-50	1,002		1,4 %	
100 kV	CCRI-100	0,990			

\* el valor de la incertidumbre está reportado para una desviación típica

Para la caracterización dosimétrica más detallada de los haces, se contó con un sistema analizador de haces, basado en una cuba con escaneo automático tipo PTW MP3-XS, una micro-cámara de ionización tipo *PTW 31022 PinPoint 3D*, así como el software *Verisoft* para el escaneo de haces.

Para la dosimetría de los haces se siguió fundamentalmente el protocolo publicado por la Asociación Americana de Física Médica AAPM TG-61.<sup>(13)</sup> Se consideró el rango de "bajas energías" y por tal motivo fue empleado el método de "mediciones en aire". Las mediciones de tasas de dosis con cámaras calibradas en agua, así como los porcentajes de dosis en profundidad (PDD) en maniquí de plástico, se realizaron de acuerdo con el protocolo de Organización Internacional de Energía Atómica en su informe técnico 398 (IAEA TRS-398).<sup>(14)</sup>

### Capas hemirreductoras

Las calidades radiológicas de los haces fueron cuantificadas en términos de capas hemirreductoras (HVL), las cuales se obtuvieron a partir de mediciones de transmisión para distintos espesores de aluminio. Para ello se empleó la cámara plano-paralela de cada uno de los servicios. La configuración para la medición fue la recomendada por AAPM TG-61<sup>(13)</sup>, se empleó el cono 2,5 cm de diámetro además de un soporte para cámaras y láminas diseñado para este propósito.

Para el ajuste de las medidas se utilizó la ecuación propuesta por el documento técnico del Organismo Internacional de Energía Atómica IAEA-TECDOC 1151:<sup>(15)</sup>

$$HVL = [t_2 \ln(2X_1/X_0) - t_1 \ln(2X_2/X_0)] / \ln(X_1/X_2) \quad (1)$$

Los resultados fueron comparados con los reportados por el vendedor. En dos de las unidades fueron comparados además, con mediciones realizadas con una cámara cilíndrica tipo Farmer.

### Linealidad. Tiempo "entrada-salida"

Para cada una de las calidades de uso clínico, se graficaron las lecturas de la carga (abscisa) a la salida del cono de 5 cm de diámetro para los tiempos de exposición (ordenada) de 0,1; 0,2; 0,4 y 0,8 minutos. Se caracterizó la linealidad entre estas magnitudes por el coeficiente de regresión lineal.

Al ajustar los puntos a una recta por mínimos cuadrados se determinaron los "tiempos de entrada-salida ( $\delta t$ )" a partir del valor de la intersección con el eje de las ordenadas. Estas pruebas fueron realizadas con la configuración para la medición de las tasas de dosis de referencia.

### Perfiles de dosis

Se caracterizaron los perfiles de dosis en las direcciones longitudinal y transversal para el cono de 5 cm de diámetro a la distancia fuente-superficie de 15 cm, se empleó para ello dosimetría fílmica con películas radiocrómicas tipo GAFCHROMIC™ *EBT3*. Las películas fueron escaneadas en un escáner de transmisión y el procesamiento se realizó con el software "*Verisoft*" de PTW. Los resultados fueron comparados con los obtenidos por Ren-Dih Sheu y colaboradores<sup>(12)</sup> para máquinas de tratamiento del mismo modelo.

### Factores de cono

Los factores de cono fueron medidos en aire para los todos los aplicadores de 15 cm de SSD en todas las unidades de tratamiento. Para ello se colocó la cámara *PTW 23342* de cada servicio a una distancia de 30-40 cm aproximadamente de la fuente. Esta distancia garantiza que aún para los campos más pequeños, el cono del haz cubra la parte activa de la cámara. Como cono de referencia se escogió el de 5 cm de diámetro. Los factores fueron calculados mediante la razón entre la lectura para cada uno de los aplicadores respecto a la lectura del cono de referencia. Los resultados fueron comparados entre todas las unidades, así como con los reportados por el vendedor.

### Tasas de dosis de referencia (rendimientos)

Se consideró como cono de referencia el de 5 cm de diámetro para la SSD de 15 cm y el de 10 cm de diámetro para la SSD de 25 cm.

Para el método "en aire", las tasas de dosis en la superficie del agua ( $D_{W,Z=0}$ ) se calcularon a partir de mediciones de carga en aire, en el extremo de los conos, corregidas por presión y temperatura. Se empleó en todos los casos la cámara plano-paralela calibrada en aire.

La ecuación empleada para el cálculo fue, de acuerdo con el AAPM TG-61:<sup>(13)</sup>

$$\dot{D}_{W,Z=0} = \frac{M \times N_K \times FRD \times \left[ \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}^w \right]}{t} \quad (2)$$

Los valores de los coeficientes de atenuación másico-relativos agua-aire en el seno de aire ( $(\mu_{en}/\rho)_{air}^w$ ), así como los de los factores de retro-dispersión (BSF), fueron obtenidos por interpolación de las tablas B.1.1 y B.1.2<sup>(13)</sup> respectivamente.

Para el método "en agua" se empleó la ecuación del IAEA TSR-398:<sup>(15)</sup>

$$\dot{D}_{W,Z=0} = \frac{M \times N_{D,W} \times K_Q}{t} \quad (3)$$

Los resultados fueron comparados con los reportados por el vendedor y en las unidades 1 y 2 además, con las mediciones realizadas en el maniquí plástico con el conjunto dosimétrico propio de cada servicio.

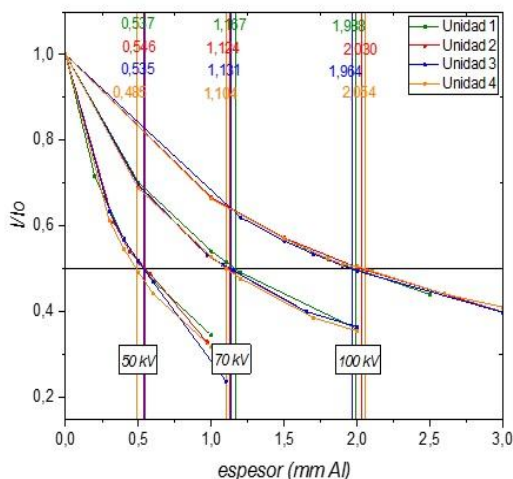
### Dosis en profundidad

Los porcentajes de dosis en profundidad, fueron medidos en una de las unidades tanto en agua como en plástico para los conos de 2, 3, 4 y 5 cm de diámetro. Para la medición en agua fue empleado el sistema de escaneo MP3 con la cámara *PTW 31022 PinPoint3D*. Las curvas de PDD en este caso, fueron normalizadas a la profundidad de 0,5 cm debido a la imposibilidad de posicionar el centro de la cámara en la superficie del agua. Para las mediciones en plástico fue empleado el conjunto suministrado por el vendedor, en este caso las mediciones fueron normalizadas al valor en la superficie. Los resultados fueron comparados entre ellos, así como con los reportados por el *British Journal of Radiology* (BJR-25)<sup>(16)</sup> y los publicados por Ren-Dih Sheu y col.<sup>(12)</sup>

## RESULTADOS

### Capa hemirreductora

Se muestran los resultados normalizados de las mediciones vs. espesor de aluminio para las diferentes unidades y para las energías de uso clínico, empleando la cámara *PTW 23342*. (Fig. 1) Se presentan, además, los resultados de los cálculos.



	Capa hemirreductora (mm Al)			
	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4
50 kV				
Vendedor (A117W)	0,471	0,476	0,470	0,468
PP_PTW 23342	0,537	0,546	0,535	0,485
Farmer_PTW 30001	0,525	0,566		
70 kV				
Vendedor (A117W)	1,070	1,068	1,067	1,065
PP_PTW 23342	1,160	1,124	1,131	1,104
Farmer_PTW 30001	1,169	1,150		
100 kV				
Vendedor (A117W)	1,840	1,894	1,842	1,902
PP_PTW 23342	1,978	2,030	1,964	2,054
Farmer_PTW 30001	1,957	1,969		

**Fig. 1** (a) Mediciones para la obtención de los HVLs con cámaras plano-paralelas PTW23342.  
(b) valores calculados y reportados por el fabricante.

### Linealidad. Tiempo "entrada-salida"

Las cuatro unidades presentaron una excelente linealidad ( $R^2=1$ ). Los valores de "tiempos de entrada - salida" resultaron ser los deseados, toda vez que en la generalidad de los casos fueron mucho menores que la apreciación del temporizador (0,01 minuto).

### Perfiles de dosis

Al igual que Ren-Dih Sheu y col.,<sup>(12)</sup> se encontró que, dentro de un círculo de aproximadamente 2 cm de diámetro, ambos perfiles muestran excelentes simetría y uniformidad. El artículo refiere además que a medida que aumenta la distancia desde el centro se pierde uniformidad en ambos perfiles y en el caso del perfil longitudinal se pierde también simetría debido al conocido efecto anódico o talón. En el presente estudio, sin embargo, se encontró que el perfil transversal conserva ambas características y que el perfil longitudinal solamente manifiesta falta de simetría debido al efecto talón.

### Factores de cono

No se encontró variación entre los factores de cono medidos en las cuatro unidades ( $CV < 0,4$  %). La discrepancia entre estos factores y los reportados por el fabricante no supera el 0,5 %.

### Tasas de dosis de referencia (Tabla 2, Tabla 3)

**Tabla 2.** Rendimientos en aire y algunos factores empleados en el cálculo.

Energías	Unidad 1		Unidad 2		Unidad 3		Unidad 4	
	Vendedor	Autores	Vendedor	Autores	Vendedor	Autores	Vendedor	Autores
	A11-TW	PTW 23342	A11-TW	PTW 23342	A11-TW	PTW 23342	A11-TW	PTW 23342
	$[(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air}^w]_{air}$							
50 kV	1,029	1,027	1,029	1,027	1,029	1,027	1,029	1,028
70 kV	1,019	1,018	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019	1,019
100 kV	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018	1,018
<i>SSD 15 cm, cono 5 cm de diámetro</i>								
<i>D<sub>W, Z=0</sub> (cGy/min)</i>								
50 kV	746,11	785,39	737,25	770,99	756,57	787,57	731,21	759,24
70 kV	634,85	674,46	641,38	673,06	642,42	670,23	641,38	655,60
100 kV	647,14	706,46	648,27	706,37	649,21	689,58	648,32	685,33
<i>Factores de retro-dispersión (BSF)</i>								
50 kV	1,070	1,084	1,070	1,085	1,070	1,084	1,070	1,078
70 kV	1,140	1,138	1,140	1,136	1,140	1,136	1,140	1,135
100 kV	1,180	1,179	1,180	1,181	1,180	1,178	1,180	1,182
<i>SSD 25 cm, cono 10 cm de diámetro</i>								
<i>D<sub>W, Z=0</sub> (cGy/min)</i>								
50 kV	252,96	271,27	251,66	268,05	256,49	269,84	250,43	261,66
70 kV	221,04	240,00	224,32	241,62	223,33	236,41	222,17	233,15
100 kV	233,11	253,29	233,94	256,51	233,42	243,95	232,91	245,93
<i>Factores de retro-dispersión (BSF)</i>								
50 kV	1,080	1,093	1,080	1,094	1,080	1,093	1,080	1,086
70 kV	1,170	1,170	1,170	1,167	1,170	1,168	1,170	1,165
100 kV	1,245	1,235	1,245	1,239	1,245	1,234	1,245	1,240

**Tabla 3.** Rendimientos medidos en aire y en PMMA (cono 10 cm diámetro) Comparación.

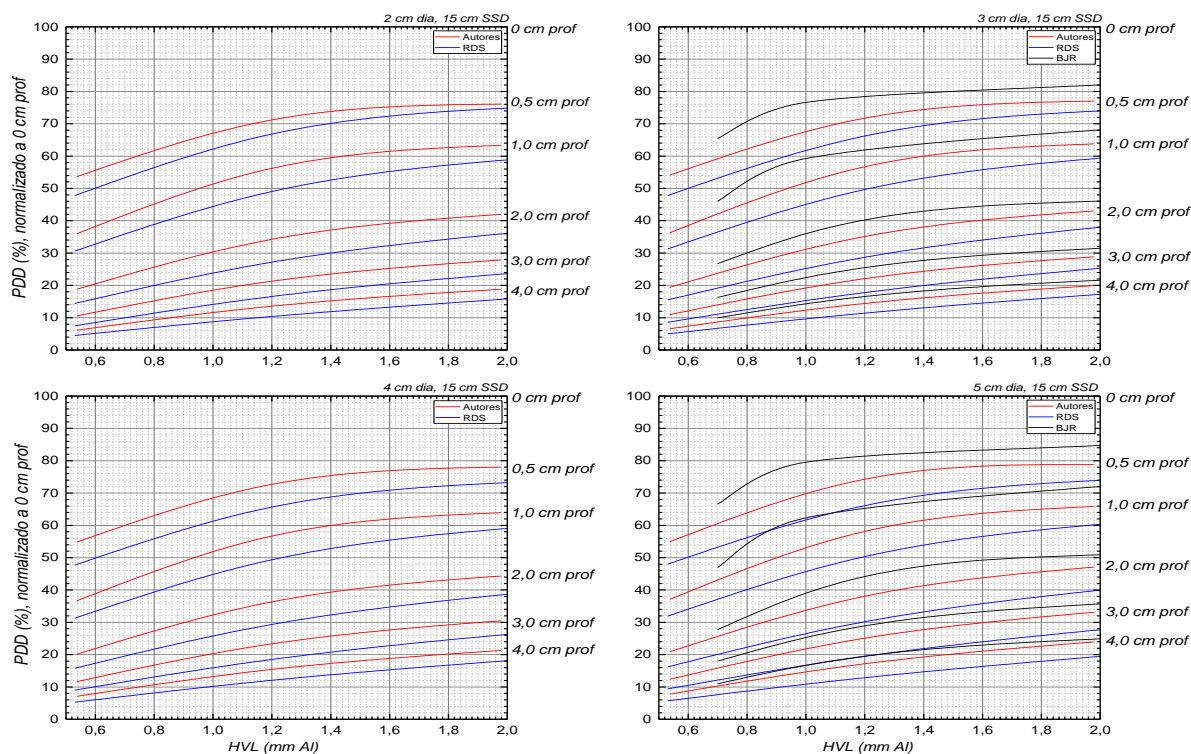
Energías	Unidad 1		Unidad 2	
	<i>D<sub>W, Z=0</sub> (cGy/min)</i>			
	en aire	en PMMA	en aire	en PMMA
<i>DFS 25 cm, cono 10 cm diámetro</i>				
50 kV	271,27	271,22	268,05	267,21
70 kV	240,50	241,62	241,62	241,86
<i>Discrepancias (%)</i>				
50 kV	-0,02		-0,31	
70 kV	0,47		0,10	



## Dosis en profundidad

Se encontró que la diferencia entre los PDDs medidos en agua y en PMMA, no supera el 4 % entre 0,5 y 4 cm de profundidad.

Los resultados de las mediciones de los PDDs en PMMA, muestran como función de los HVLs para distintos tamaños de cono. Se incluyen los valores reportados por Ren-Dih Sheu y colaboradores <sup>(12)</sup>, así como por el BJR-25 <sup>(16)</sup>, estos últimos para los conos de 3 y 5 cm de diámetro. (Fig. 2)



**Fig. 2** PDD vs HVL para distintos tamaños de cono.

## DISCUSIÓN

La dispersión de los valores de los HVLs medidos para las cuatro máquinas (CV: 5,1; 2,3 y 2,0 % para 50, 70 y 100 kV respectivamente) resultaron superiores a los reportados en fábrica (CV: 0,7; 0,2 y 1,8 %). Las diferencias entre los valores de las capas hemirreductoras medidas con diferentes cámaras, supone en el peor de los casos (100 kV, máquina 2), una discrepancia del 0,32 % en el rendimiento.

Los coeficientes de variación por energía, para los rendimientos de las máquinas estudiadas fueron inferiores al 3 %. Este resultado denota muy poca variabilidad si se tiene en cuenta que para aquellos equipos que no cuentan con cámara monitora, el rendimiento es muy dependiente de la tensión de red y de la temperatura del tubo <sup>(15)</sup>. Ren-Dih Sheu y colaboradores <sup>(12)</sup> obtuvieron una mayor variabilidad en su estudio (1,3 – 5,4 %)

Un indicador de la correcta configuración para la medición, lo constituye la constancia de la razón entre las mediciones de los rendimientos para los conos de 5 y 10 cm de diámetro para cada una de las máquinas. El coeficiente de variación por energía para este indicador entre las máquinas resultó siempre inferior al 2%.

La energía de 50 kV ofrece un excelente punto de comparación entre las mediciones de rendimiento por los métodos "en aire" (TG-61) y "en agua" (TRS-398), toda vez que los laboratorios reportan los valores de  $N_k$  y  $N_{DW}$  respectivamente para esta calidad (Tabla 1). Para 70 kV, el valor de  $N_k$  es interpolado. A pesar de esto, la discrepancia de los rendimientos por ambos métodos en estas dos calidades no supera el 0,5 %, lo cual indica que existe consistencia entre los resultados. Las incertidumbres encontradas fueron de 3,5 y 4,0 % para un factor de cobertura  $k=1$  en los métodos "en aire" y "en agua" respectivamente.

Los valores de rendimiento encontrados fueron en todos los casos superiores a los reportados por el vendedor, con discrepancias en el rango de 3 – 10 %. Llama la atención que los factores de retro dispersión utilizados por el vendedor para cada una de las calidades (Tabla 2), son los mismos en todas las máquinas independientemente de su HVL. Estos valores no se corresponden en ninguno de los casos con los reportados por el documento de la AAPM TG-61. Los rendimientos recalculados a partir de los datos del vendedor, con la utilización de los BSFs del AAPM TG-61, no mejoran las discrepancias.

Las gráficas de la figura 2 (curvas en color rojo) permiten estimar los valores de PDDs para el resto de las máquinas a partir de sus HVLs. En ella se aprecia que las mayores diferencias están dadas para la profundidad de 0,5 cm y la energía de 50 kv, por ser esta porción de las curvas la de mayor pendiente. La mayor diferencia así encontrada resultó de 2,1 % entre las máquinas 2 y 4. Esta diferencia es irrelevante desde el punto de vista clínico toda vez que para el tratamiento de lesiones a 5 mm de profundidad la energía de 50 kV no es recomendada.<sup>(6)</sup>

## CONCLUSIONES

Se desarrolló e implementó una metodología estandarizada para la caracterización dosimétrica de cuatro equipos SENSUS SRT-100™ instalados en Cuba. Para este propósito se colectó un gran número de datos, superior a los que tradicionalmente se realizaban para esta modalidad radioterapéutica. Los equipos mostraron una excelente estabilidad, y características dosimétricas muy similares entre ellos. Esta consistencia de los parámetros físico-dosimétricos permite establecer valores de referencia para eventuales auditorías externas y re-ajustes de los haces ulteriormente a los mantenimientos o reparaciones que involucren al generador de rayos X. Desde el punto de vista dosimétrico, los cuatro equipos se encuentran aptos para su uso clínico en pacientes y dada su compatibilidad, permitirían un traspaso de pacientes de un equipo a otros, lo que imprime una mayor robustez al sistema de atención a pacientes con NMSC que tributen a este tipo de tratamiento.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses para la publicación del artículo.

## Contribución de autoría

YAF se encargó de la conceptualización, administración del proyecto, investigación, análisis formal, recursos. JNT, RAL, JMB, LBP participaron en la redacción del borrador inicial. Todos los autores participaron en la revisión y edición del manuscrito, y aprobaron su versión final.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kim HN, Lee JH, Park HB, Kim HJ, Cho SO. Surface applicator of a miniature X-ray tube for superficial electronic brachytherapy of skin cancer. *Med Phys* [Internet]. 2018 [Citado 20/05/2019]; 45(1): 29-36. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29106708/>
2. Severina P. Development of The Slab Phantom for the Measurements of Irradiation Doses in Superficial X-Ray Therapy [Thesis]. Master's Final Degree Project. Kaunas University of Technology. Faculty of Mathematics and Nature Sciences; 2018. [Citado 20/05/2019]: [aprox. 60p.] Disponible en: <https://epubl.ktu.edu/object/elaba:29009047/>
3. Fahradyan A, Howell AC, Wolfswinkel EM, Tsuha M, Sheth P, Wong AK. Updates on the Management of Non-Melanoma Skin Cancer (NMSC). *Healthcare (Basel)* [Internet]. 2017 [Citado 20/05/2019]; 5(4): 82. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29104226/>
4. Nazco Torres J, Labrador Díaz JF, Castro Crespo D, Aguiar Ferro Y, Rodríguez Hernández Y. Tratamiento de tumores de piel con SENSUS SRT-100TM en Centro Oncológico pinareño. *Rev Ciencias Médicas* [Internet]. 2019 [Citado 20/05/2019]; 23(6): 817-826. Disponible en: <http://revcmpinar.sld.cu/index.php/publicaciones/article/view/4082>
5. Anuario estadístico de salud. 2018. Ministerio de Salud Pública, Dirección de registros médicos y estadísticos de salud. [Internet]. La Habana; 2019. Disponible en: <https://files.sld.cu/bvscuba/files/2019/04/Anuario-Electr%C3%B3nico-Espa%C3%B1ol-2018-ed-2019-compressed.pdf>
6. Nestor MS, Berman B, Goldberg D, Cagnetta A, Gold M, Roth W, et al. Consensus Guidelines on the Use of Superficial Radiation Therapy for Treating Nonmelanoma Skin Cancers and Keloids. *J Clin Aesthet Dermatol* [Internet]. 2019 [Citado 20/05/2019]; 12(2):12-18. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30881578/>
7. Nazco Torres J, Torres Valle A, Labrador Díaz JF, Jiménez Ortega U, Castro Crespo D. Estudio del riesgo en radioterapia superficial con SENSUS SRT-100TM usando FMEA y código SECURE MR-FMEA. *Revista de Ciencias Médicas de Pinar del Río* [Internet]. oct. 2018 [Citado 20/05/2019]; 22(6): 1077-1089. Disponible en: <http://www.revcmpinar.sld.cu/index.php/publicaciones/article/view/3762>
8. Hill R, Healy B, Holloway L, Kuncic Z, Thwaites D, Baldock C. Advances in kilovoltage x-ray beam dosimetry. *Phys Med Biol* [Internet]. 2014 [Citado 20/05/2019]; 59(6): 183-231. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24584183/>
9. Furstoss C. COMP report: CPQR technical quality control guidelines for kilovoltage X ray radiotherapy machines. *J Appl Clin Med Phys* [Internet]. 2018 [Citado 20/05/2019]; 19(2):18-21. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5849838/>
10. Canadian Partnership for Quality Radiotherapy. Technical Quality Control Guidelines for Canadian Radiation Treatment Centres; 2016. Disponible en: <http://www.cpqr.ca/wp-content/uploads/2017/01/TQC-2016-05-01.pdf>

11. Centro Nacional de Seguridad Nuclear. Resolución No. 41/2011. Guía de Seguridad Para la Práctica de Radioterapia; 2011.
12. Sheu RD, Powers A, Lo YC. Commissioning a 50-100 kV X-ray unit for skin cancer treatment. J Appl Clin Med Phys [Internet]. 2015 [Citado 20 de mayo 2019]; 16(2):5182. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26103186/>
13. C-M. Ma. TG-61. AAPM Protocol for 40–300 kV x-ray Beam Dosimetry in Radiotherapy and Radiobiology. Am. Assoc. Phys. Med [Internet]. 2001 [Citado 20/05/2019]; 28(6): 868-893. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/1eb3/a9f39f8c051321a4fe2575fa88dd0bfcc8f5.pdf>
14. IAEA – TRS 398. Determinación de la dosis absorbida en agua con haces externos [Internet]. Viena; 2005. [Citado 20/05/2019]. Disponible en: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS\\_398s\\_Web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS_398s_Web.pdf)
15. IAEA-TECDOC 1151. Aspectos físicos de la garantía de calidad en radioterapia. Protocolo de control de calidad. 2000. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1151\\_prn.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1151_prn.pdf)
16. British Journal of Radiology. Central Axis Depth Dose Data for Use in Radiotherapy 1996: A Survey of this Supplement Depth Doses and Related Data Measured in Water Or Equivalent Media [Internet]. Central axis dose data for use in radiotherapy; 1996. [Citado 20/05/2019]. Disponible en: [https://books.google.com.cu/books/about/Central\\_Axis\\_Depth\\_Dose\\_Data\\_for\\_Use\\_in.html?id=dvnloAEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.cu/books/about/Central_Axis_Depth_Dose_Data_for_Use_in.html?id=dvnloAEACAAJ&redir_esc=y)