

# OCTAVIUS 4D: establecimiento del estado de referencia inicial y uso en rutina clínica de un dispositivo para verificaciones VMAT

## OCTAVIUS 4D: Commissioning and routine clinical use of a device for VMAT verifications

José Gimeno Olmos<sup>1</sup>, Cristian Candela Juan<sup>1</sup>, Rubén Palomo Llinares<sup>1</sup>, Vicente Carmona Meseguer<sup>1</sup>, Françoise Lliso Valverde<sup>1</sup>, Facundo Ballester Pallarés<sup>2</sup>, José Pérez Calatayud<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Sección de Física, Servicio de Radioterapia, Hospital Universitario y Politécnico La Fe, Valencia.

<sup>2</sup> Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, Universidad de Valencia.

<sup>3</sup> Servicio de Radioterapia, Hospital Clínica Benidorm.

Fecha de Recepción: 30/01/2015 - Fecha de Aceptación: 17/07/2015

**Objetivo:** Establecer el estado de referencia inicial del dispositivo OCTAVIUS 4D y las matrices de detectores 729 y 1000 SRS para verificaciones de tratamientos VMAT, y proporcionar los resultados clínicos obtenidos.

**Material y métodos:** Se analizan las prestaciones de ambas matrices en términos de homogeneidad en la respuesta, linealidad, reproducibilidad y fugas. Se evalúa la precisión de la reconstrucción de dosis del dispositivo OCTAVIUS 4D con la matriz 729 mediante medidas con cámara de ionización en varios puntos de interés. Se comparan las prestaciones de ambas matrices para los mismos planes clínicos. Finalmente, se proporcionan resultados de análisis gamma 3D para más de 900 planes clínicos.

**Resultados:** Ambas matrices presentan buena homogeneidad, linealidad, reproducibilidad, y fugas despreciables. Las diferencias de dosis entre OCTAVIUS 4D y cámara de ionización o sistema de planificación fueron menores del 2% y 4% para planes sencillos y clínicos, respectivamente. Los valores medios de cumplimiento del criterio gamma local 3%/3 mm fueron 89.7% y 97.8% para planes clínicos verificados con las matrices 729 y 1000 SRS, respectivamente.

**Conclusiones:** El sistema OCTAVIUS 4D proporciona una reconstrucción precisa de la dosis en 3D a partir de medidas 2D. Los resultados aquí presentados pueden ser utilizados a la hora de establecer niveles de tolerancia para verificaciones de tratamientos VMAT con este dispositivo.

**Palabras clave:** OCTAVIUS 4D, verificación de planes de tratamiento, VMAT, reconstrucción de dosis 3D, análisis gamma.

**Purpose:** To commission OCTAVIUS 4D and its arrays 729 and 1000 SRS for VMAT patient-specific QA verifications, and to provide clinical results obtained with this device.

**Methods:** The performance of both arrays was analysed by evaluating: homogeneity, linearity, reproducibility and leakage current. The accuracy of the dose reconstruction of OCTAVIUS 4D with array 729 was evaluated through ion chamber measurements at several points of interest. The performance of both arrays was compared for the same clinical plans. Finally, results of the 3D gamma analysis performed in our hospital for more than 900 patient plans are provided.

**Results:** Both arrays present good homogeneity, linearity, reproducibility, and negligible leakage current. Dose differences between OCTAVIUS-calculated doses and ion chamber measurements or TPS-calculated doses were within 2% for single field plans, and within 4% for clinical plans. The mean value of the local gamma passing rate (3%/3 mm) of clinical plans verified with array 729 is 89.7%, whereas for 1000 SRS it is 97.8%.

**Conclusions:** OCTAVIUS 4D provides accurate 3D dose reconstructions from 2D dose measurements. Clinical results here presented may be used to establish reference levels for VMAT verifications with this device.

**Key words:** OCTAVIUS 4D, treatment plan verification, VMAT, 3D dose reconstruction, gamma analysis.

## Introducción

La arcoterapia modulada volumétrica (VMAT) está convirtiéndose en una técnica cada vez más común en radioterapia externa e incluso en radioterapia estereotáctica fraccionada (SBRT).<sup>1,2</sup> La complejidad inherente a estas modalidades requiere una verificación previa al tratamiento para cada paciente.<sup>3,4</sup> Esto plantea un reto doble. Por una parte, se hace necesario obtener la distribución tridimensional (3D) de dosis absorbida en agua (en adelante, dosis), no sólo la medida de un único plano de dosis. Por otra parte, puesto que esta distribución de dosis presentará previsiblemente regiones de alto gradiente, se debería obtener con una resolución espacial lo más alta posible.

Actualmente se comercializan una variedad de dispositivos para este propósito, como Delta4 (Scandidos, Uppsala, Suecia), ArcCHECK (Sun Nuclear, Melbourne, FL, EE.UU.), o MatriXX (IBA, Schwarzenbruck, Alemania), que han sido estudiados minuciosamente.<sup>5-9</sup> Además de estas tecnologías, el sistema OCTAVIUS 4D (PTW, Freiburg, Alemania) proporciona un enfoque diferente para la medida de la distribución de dosis 3D. Consiste en un maniquí cilíndrico conectado a un inclinómetro fijado al brazo del acelerador y que le proporciona la información sobre el ángulo de giro de éste. En el maniquí se pueden insertar diversos modelos de matrices bidimensionales (2D) de cámaras de ionización. Así, el sistema maniquí-matriz es capaz de girar siguiendo la orientación del brazo de tal manera que el plano de la matriz sea siempre perpendicular al eje del haz de radiación. La distribución de dosis 2D y el ángulo de brazo se registran en función del tiempo (con una resolución establecida por el usuario). Usando un conjunto de curvas de rendimientos en profundidad previamente medidos e introducidos en el software, el sistema calcula la distribución de dosis 3D para cada instante de tiempo y reconstruye la matriz de dosis 3D total resultante.

El sistema OCTAVIUS 4D permite varias opciones para la matriz de cámaras de ionización: la matriz *seven29*; su matriz sucesora 729; la matriz 1000 SRS, dedicada para campos pequeños; o la matriz 1500. Estas matrices han sido ya caracterizadas en la literatura.<sup>8,10-13</sup> Sin embargo, para este dispositivo, la exactitud del algoritmo de reconstrucción de dosis 3D no se ha estudiado en puntos diferentes del isocentro.

El establecimiento del estado de referencia inicial (ERI) para los equipos de medida viene motivado por la aplicación de las recomendaciones de sociedades internacionales. Por otro lado, en la legislación española, este paso es de obligado cumplimiento antes de su puesta en rutina clínica.<sup>14</sup> El objetivo de este trabajo es, pues, establecer el ERI del dispositivo OCTAVIUS 4D para verificaciones de tratamientos VMAT y SBRT, y evaluar su uso en rutina clínica. En primer lugar, se ana-

lizan y comparan las prestaciones de las matrices 729 y 1000 SRS. En segundo lugar, se evalúa la exactitud de la reconstrucción de dosis mediante comparación con medidas con cámara de ionización en varios puntos, tanto para planes sencillos como clínicos. En tercer lugar, se comparan las prestaciones del sistema con ambas matrices en la verificación de los mismos planes clínicos para determinar si la matriz 729 es igualmente válida para la verificación de campos pequeños, tanto con filtro aplanador (FF) como sin él (FFF); así como evaluar las diferencias entre el análisis gamma<sup>15,16</sup> 3D local y global. Finalmente, se presentan resultados de análisis gamma 3D llevados a cabo en nuestro servicio para planes de pacientes verificados con estas matrices, proporcionando un posible nivel de referencia para otros centros que usen el mismo sistema de verificación de tratamientos VMAT.

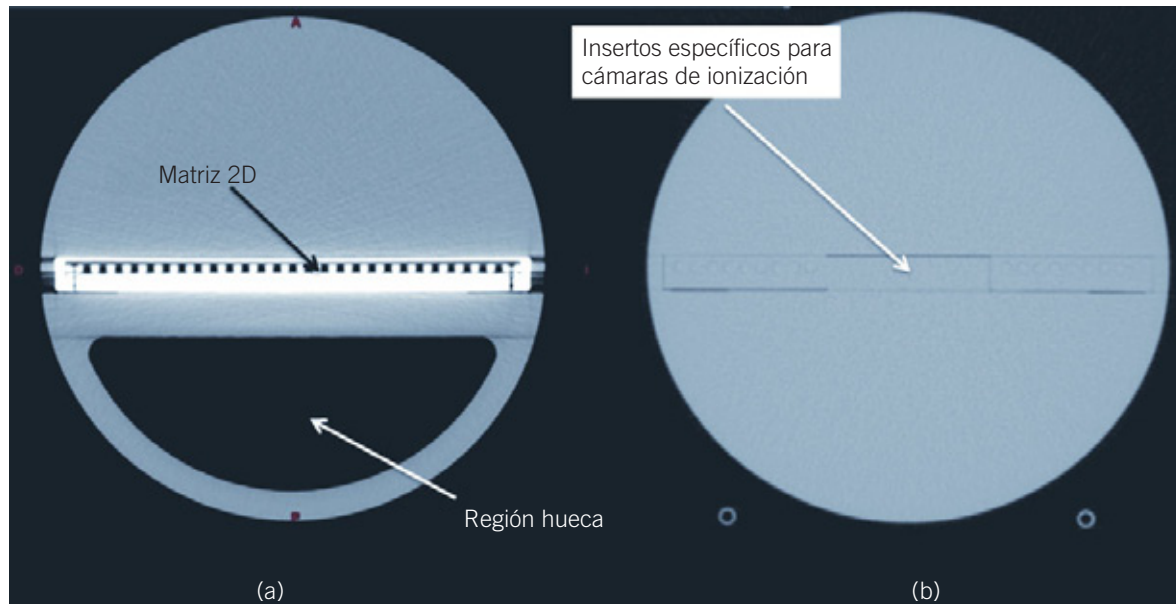
Para el objetivo de este trabajo no se ha considerado el control de calidad individualizado del inclinómetro que, por otra parte, ya ha sido caracterizado en otros trabajos.<sup>8,11</sup>

## Material y métodos

### Equipamiento y software

En este trabajo se ha usado el sistema OCTAVIUS 4D con las matrices 729 y 1000 SRS, cuyas especificaciones principales se resumen en la tabla 1. En el caso de la matriz 729, hay que destacar que el fabricante recomienda no sobrepasar el área cubierta (27 cm × 27 cm) para no irradiar la electrónica, lo cual condicionará la prueba de homogeneidad que se describe más adelante. Dichas matrices de cámaras de ionización son calibradas directamente por el fabricante, independientemente del maniquí cilíndrico.

Para reducir peso, el maniquí es hueco en la mitad inferior, bajo la matriz de cámaras de ionización según se vería sin rotación, como se muestra en la fig. 1(a). La principal contribución a la señal medida por la matriz es la correspondiente a radiación primaria, que proviene siempre desde la mitad superior maciza del maniquí. Además, la contribución de la radiación dispersa se verá poco afectada por la porción hueca, puesto que hay suficiente material de acumulación entre la matriz y dicha porción. De esta manera, después de realizar el cálculo, la distribución de dosis 3D corresponde a un maniquí homogéneo, sin hueco. Sin embargo, debido a la rotación del maniquí con el giro del brazo del acelerador, la distribución de dosis 3D no se puede verificar con una medida de punto, excepto para el caso de puntos situados en el eje de rotación del maniquí y, concretamente, el isocentro. Por lo tanto, para comparar con medidas con cámara de ionización en puntos diferentes del isocentro, se usó una versión estática y



**Fig. 1.** (a) Sección transversal del maniquí OCTAVIUS 4D y (b) sección transversal de su versión estática y completamente maciza. Se indican las principales características de ambos maniqués.

completamente maciza del maniquí, proporcionada por PTW (véase la fig. 1(b)), de la misma densidad que el maniquí original y con insertos específicos para la cámara de ionización utilizada (PTW Semiflex 31010, de 0.125 cm<sup>3</sup> de volumen activo).

El software de adquisición y análisis asociado al sistema OCTAVIUS 4D es VeriSoft® 6.1 (PTW). La resolución temporal se estableció en 200 ms. En cuanto a la resolución espacial 3D de la matriz de dosis reconstruida, por consistencia, se eligió igual a la usada en el sistema de planificación (SP): 1 mm para planes SBRT (medidos con la matriz 1000 SRS) y 2.5 mm para el resto de planes VMAT (medidos con la matriz 729).

Se realizó un CT del maniquí OCTAVIUS 4D, que fue transferido al SP. Al volumen del maniquí se le asignó el valor de densidad electrónica recomendado por el fabricante (1.016 relativa al agua). Se calcularon varios planes en el CT del maniquí, usando el SP Eclipse, v.10.0

(Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, EE.UU.), y su algoritmo de cálculo AAA (*anisotropic analytical algorithm*), v.10.0. Al inicio de cada sesión de medida, justo después del montaje y centrado del maniquí, se realizó una calibración cruzada con un campo 10 cm × 10 cm para la matriz 729, o de 3 cm × 3 cm para la matriz 1000 SRS.

Los aceleradores usados fueron dos Clinac iX (Varian) equipados con colimador multilámina (MLC) Millenium 120 y un TrueBeam con MLC 120HD (Varian).

### Establecimiento del ERI de las matrices de cámaras de ionización

Las medidas para el establecimiento del ERI de las matrices de cámaras de ionización se realizaron por separado para las dos matrices usadas, sin el maniquí cilíndrico. Para facilitar la realización y evaluación de

**Tabla 1.** Características de las matrices 729 y 1000 SRS usadas con el sistema OCTAVIUS 4D.

	Matriz 729	Matriz 1000 SRS
Número de cámaras	729	977
Tipo	Aire, abiertas	Líquidas
Área cubierta (cm <sup>2</sup> )	27 × 27	11 × 11
Tamaño de las cámaras (mm <sup>3</sup> )	5 × 5 × 5	2.3 × 2.3 × 0.5
Distancia entre centros (mm)	10	2.5 (región central 5 cm × 5 cm) 5.0 (resto)

estas pruebas, todas las medidas se realizaron con una geometría sencilla, situando la matriz entre láminas de agua sólida RW3 (PTW). El plano de medida se colocó en el isocentro, a una profundidad de 5 cm de agua sólida, y se situaron 6 cm de agua sólida bajo el detector para garantizar suficiente retrodispersión. Las irradiaciones se realizaron con fotones de 6 MV.

Se evaluaron las siguientes propiedades:

1. Homogeneidad en la respuesta de las cámaras, evaluada como la máxima desviación entre la lectura de cada cámara (corregida por el perfil del haz) y el valor medio al irradiar la matriz con un campo uniforme que cubra todas las cámaras.
2. Linealidad, evaluada con un ajuste lineal entre la lectura medida y el número de unidades monitor (UM), para un rango de UM utilizadas en la práctica clínica (de 5 a 400 UM para la matriz 729 y de 5 a 1500 UM para la matriz 1000 SRS).
3. Reproducibilidad, evaluada como la máxima diferencia entre cinco medidas con respecto a la media, para el mismo valor de UM.
4. Corriente de fugas, tanto pre- como post-irradiación, para varios tamaños de campo cuadrados (de 5, 10, y 20 cm de lado para la matriz 729, y de 5 y 10 cm para la matriz 1000 SRS) y varias UM (en el rango 50 a 600 UM). El procedimiento fue el siguiente: primero se irradió la matriz con el tamaño de campo y las UM deseadas. Justo después se midieron las fugas post-irradiación. A continuación, tras resetear el electrómetro para la siguiente medida, se registraron las fugas pre-irradiación. Cada medida se tomó durante 700 s, para reducir la incertidumbre estadística.

### Exactitud de la reconstrucción de dosis 3D

El sistema OCTAVIUS 4D proporciona una medida indirecta de la dosis: la dosis 3D se calcula a partir de un conjunto de medidas 2D en función del tiempo de adquisición y del ángulo de brazo. Así, se consideró necesario evaluar la exactitud de esta reconstrucción de dosis. La reconstrucción de dosis 3D proporcionada por el sistema OCTAVIUS 4D se evaluó mediante comparación del valor de la dosis reconstruida en determinados puntos de interés con los valores de dosis calculados por el SP y también con la dosis medida con la cámara de ionización Semiflex 31010 introducida en la versión estática y completamente maciza del maniquí, especialmente preparado para este efecto. Esto se llevó a cabo tanto para planes sencillos como para planes clínicos de VMAT. La reconstrucción de dosis 3D puede ser validada con cualquiera de las dos matrices de cámaras de

ionización. En esta sección se usó la matriz 729 puesto que entre los planes clínicos había campos mayores de 11 cm × 11 cm, lo que supera el área sensible de la matriz 1000 SRS.

Se evaluaron los siguientes planes:

1. Campo cuadrado 10 cm × 10 cm, a 0° y 180° de ángulo de brazo.
2. Arco de 360°, con tamaño de campo 10 cm × 10 cm.
3. Arco de 180°, con tamaño de campo 10 cm × 10 cm.
4. Cuatro planes clínicos de diferentes localizaciones anatómicas: cabeza y cuello, pulmón, próstata y pelvis, cuyas verificaciones pretratamiento obtuvieron muy buenos resultados con Portal Dosimetry (Varian)<sup>17</sup> y la versión previa del sistema OCTAVIUS (OCTAVIUS II), capaz de medir un único plano de dosis.

### Comparación de la matriz 729 con la matriz 1000 SRS

La matriz 1000 SRS tiene mejor resolución espacial que la matriz 729, aunque está limitada a tamaños de campo menores que 11 cm × 11 cm. En esta sección, se obtiene el porcentaje de puntos que cumplen el criterio gamma<sup>15</sup> 3D (en adelante, índice  $\gamma$ ), tanto local como global, comparando la dosis calculada por el SP y reconstruida por OCTAVIUS 4D para varios planes con campos menores de 11 cm × 11 cm, medidos con ambas matrices. El criterio gamma usado fue de 3% de diferencia de dosis y 3 mm de distancia. Se excluyeron del análisis los voxels con dosis inferiores al 10% de la máxima. Adicionalmente, para analizar la variación de los resultados gamma con el método empleado, el índice  $\gamma$  local se obtuvo también con el refinado introducido por Depuydt *et al.*,<sup>16</sup> que reduce al mínimo la cantidad de puntos que fallan falsamente el criterio gamma, llevando a cabo el análisis en el software VeriSoft v.6.0.

La distribución de dosis 3D calculada por el SP se obtuvo con una resolución espacial de 1 mm, o de 2.5 mm, cuando la comparación era con la matriz 1000 SRS, o 729, respectivamente.

Se evaluaron cuatro planes clínicos correspondientes a diferentes localizaciones anatómicas y técnicas de tratamiento: pulmón (paciente 1) y glioblastoma (paciente 2) tratados con fotones de 6 MV FF, y pulmón (paciente 3) y meningioma (paciente 4) tratados con fotones de 6 MV FFF.

### Evaluación en rutina clínica

Se han analizado las prestaciones del sistema OCTAVIUS 4D en nuestro servicio (con ambas matrices

**Tabla 2.** Resultado de las pruebas de establecimiento del ERI para las matrices 729 y 1000 SRS.

	Matriz 729	Matriz 1000 SRS
Homogeneidad (%)	2.0	0.8
Linealidad ( $r^2$ )	>0.9999	>0.9999
Reproducibilidad (%)	0.52	0.08
Fugas (cGy/min)	<0.4	<0.02

estudiadas) en planes clínicos comparando los resultados de OCTAVIUS 4D con el cálculo del SP. Se han obtenido los índices  $\gamma$  local (3%/3 mm, ignorando voxels con dosis menores al 10% del máximo, sin el refinado de Depuydt *et al.*<sup>16</sup>) para 939 planes (800 verificados con la matriz 729 y 139 con la matriz 1000 SRS). Además, se usó el refinado de Depuydt *et al.*<sup>16</sup> para 199 de los planes verificados con la matriz 729 (criterio gamma 3%/3 mm) y para 64 de los planes verificados con la matriz 1000 SRS (criterio gamma 2%/2 mm).

Además, como control de calidad periódico en nuestro hospital, se verifica mensualmente un plan VMAT (siempre el mismo), con dos arcos y fotones de 6 MV FF, en los tres aceleradores, usando Portal Dosimetry y OCTAVIUS 4D con la matriz 729. Esto permite evaluar la constancia y reproducibilidad de los métodos de verificación.

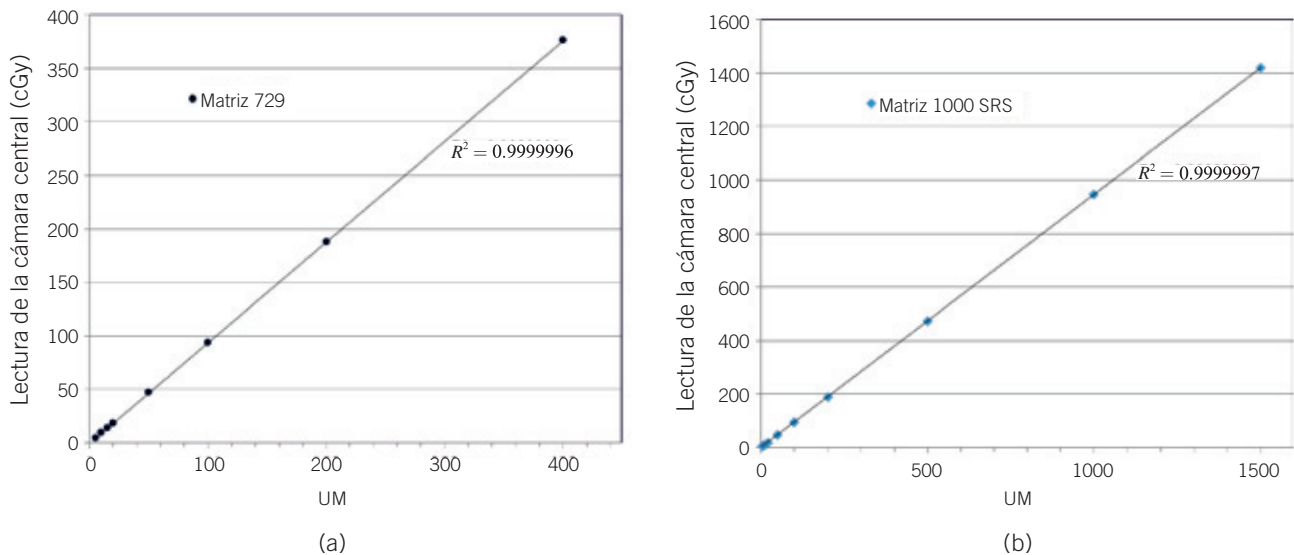
## Resultados

### Establecimiento del ERI de las matrices de cámaras de ionización

En la tabla 2 se resumen los resultados obtenidos para la homogeneidad, linealidad, reproducibilidad y fugas para las dos matrices. El resultado para la homogeneidad de la matriz 729 es de 2.0% para la región 23 cm  $\times$  23 cm central. Si se considera el área sensible total de 27 cm  $\times$  27 cm, la homogeneidad sube al 6.9%. El motivo es que para no irradiar la electrónica, se recomienda no irradiar un campo mayor que 27 cm  $\times$  27 cm. Con este tamaño de campo, la penumbra cae precisamente en las filas y columnas más externas de la matriz, incrementando así la incertidumbre.

**Tabla 3.** Resultados para planes sencillos y VMAT, en varios puntos de interés (PO indica el isocentro). Se muestra la diferencia relativa de dosis entre la medida con cámara de ionización y la reconstrucción hecha por el sistema OCTAVIUS 4D (con la matriz 729) respecto al SP. Las medidas con la cámara de ionización se realizaron en la versión estática y completamente maciza del maniquí.

Plan	Punto de interés (notas)	Cámara Semiflex	OCTAVIUS 4D (punto de interés)
Gantry 0°	PO	-0.4	-0.2
Gantry 180°	PO	0.0	-1.6
Arco	PO	0.9	-0.9
Medio arco	PO	0.8	-0.3
Cabeza y cuello	P0 (alta dosis, alto gradiente) P1 (alta dosis, bajo gradiente) P2 (baja dosis, alto gradiente)	-2.3 2.4 3.1	1.9 -0.6 2.9
Pulmón	P0 (alta dosis, alto gradiente) P1 (baja dosis, alto gradiente)	0.8 1.8	-0.2 -4.0
Próstata	P0 (alta dosis, bajo gradiente)	1.4	-0.3
Pelvis	P0 (alta dosis, alto gradiente) P1 (alta dosis, bajo gradiente)	3.0 1.4	0.5 0.3



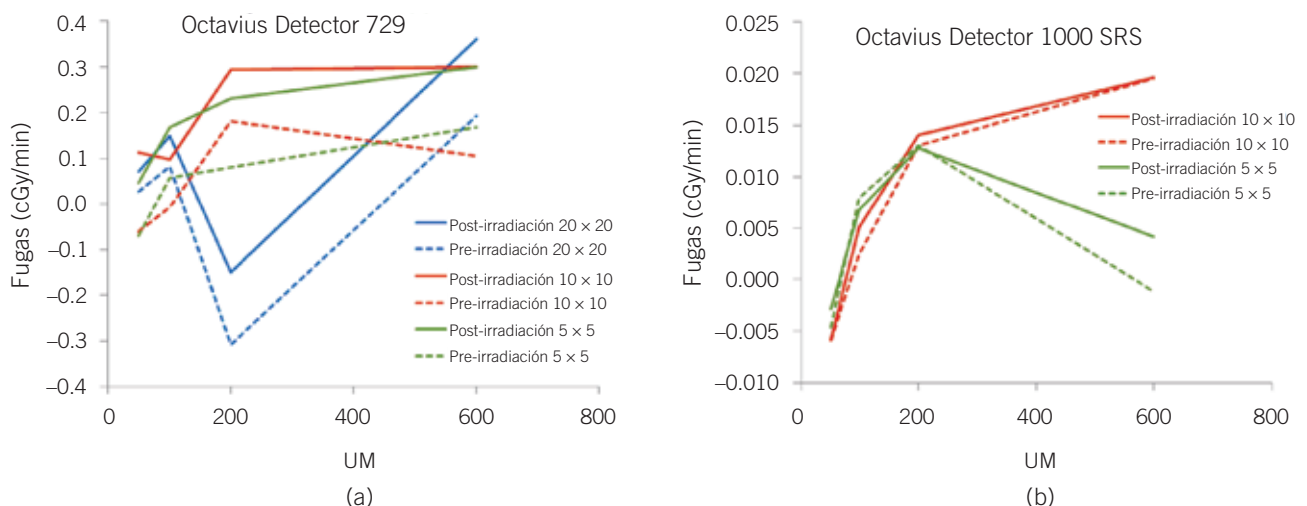
**Fig. 2.** Linealidad entre lectura y UM para (a) la matriz de cámaras de ionización 729, y (b) la matriz 1000 SRS.

La fig. 2 muestra los resultados para la prueba de linealidad para un rango de UM usado en la práctica. Se obtuvieron excelentes resultados para esta prueba así como para la reproducibilidad (véase la tabla 2) siendo esta última mejor para la matriz 1000 SRS.

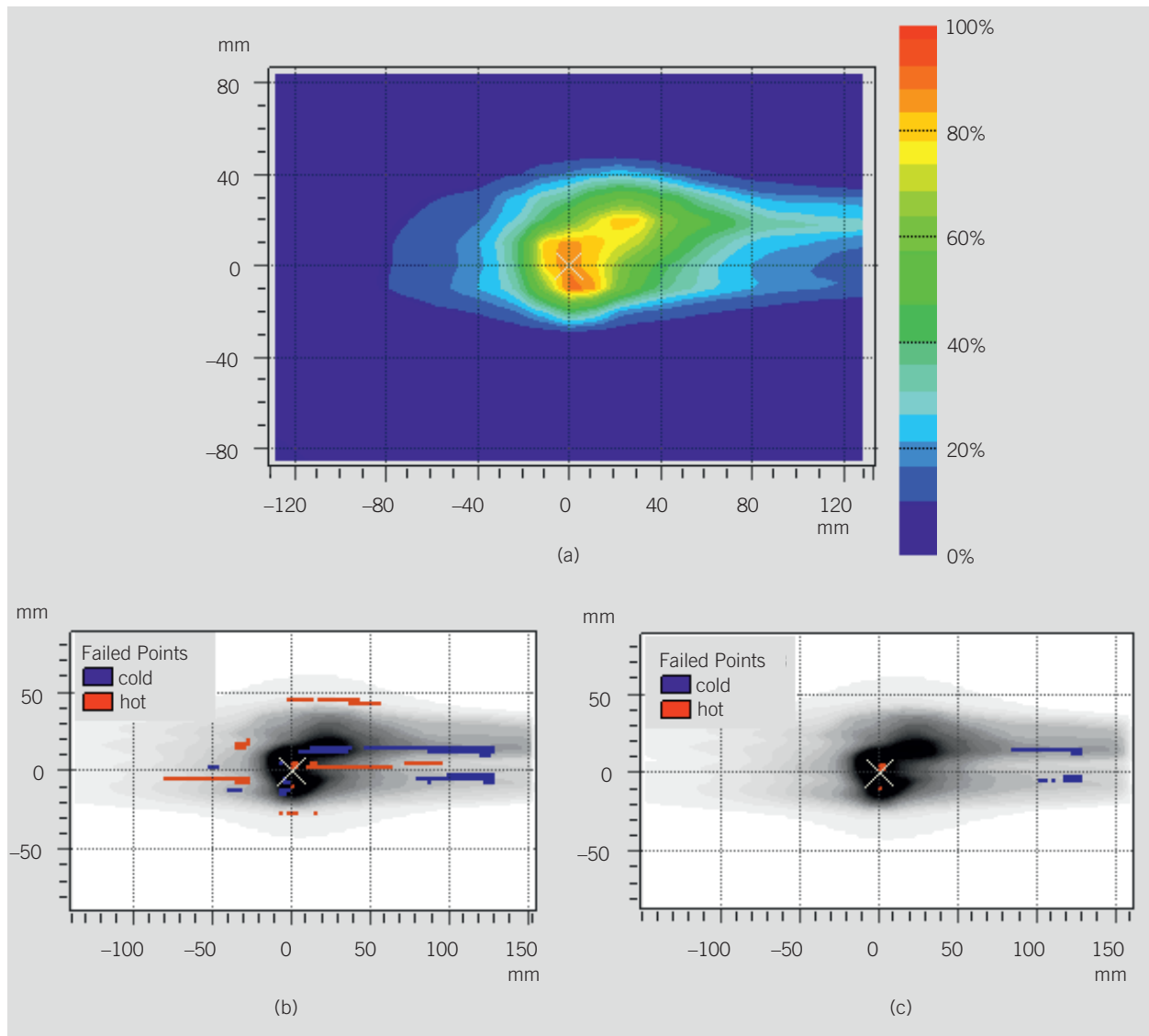
La corriente de fugas es pequeña, aunque se observa cierta tendencia a incrementarse con la dosis medida previamente y muestra su máxima variación para tamaños de campo grandes (véase la fig. 3), con valores entre  $-0.30$  y  $+0.36$  cGy/min para la matriz 729, y entre  $-0.006$  y  $+0.020$  cGy/min para la matriz 1000 SRS.

### Exactitud de la reconstrucción de dosis 3D

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en varios puntos de interés para los diferentes planes (sencillos y clínicos) usados para estudiar la exactitud de la reconstrucción de dosis 3D realizada por el sistema OCTAVIUS 4D. Las diferencias entre el valor de dosis calculado por OCTAVIUS y el medido con cámara de ionización o calculado por el SP fueron menores del 2% para planes sencillos y menores del 4% para planes clínicos. La incertidumbre estadística de las medidas con cámara de ionización se estimaron en el 1.6% ( $k = 1$ ) siguiendo la detallada metodología descrita por



**Fig. 3.** Corriente de fugas en función de las UM irradiadas previamente para (a) la matriz de cámaras de ionización 729, y (b) la matriz 1000 SRS.



**Fig. 4.** (a) Distribución de dosis reconstruida a partir de medidas realizadas con OCTAVIUS 4D y la matriz 729. Para este mismo plano de dosis, se muestran los puntos que no cumplen el análisis gamma 3D local (3%/3 mm) (b) sin usar el refinado de Depuydt *et al.*,<sup>16</sup> y (c) considerando el refinado.

Castro *et al.*<sup>18</sup> En esta comparación se incluyeron regiones de alto gradiente de dosis y también distribuciones de dosis homogéneas. Estas diferencias se encuentran dentro de la incertidumbre estadística global de los sistemas utilizados.

### Comparación de la matriz 729 con la matriz 1000 SRS

En la tabla 4 se muestra el índice  $\gamma$  local y global (3%/3 mm) para los planes considerados con ambas matrices. Los resultados mejoran cuando las medidas se realizan con la matriz 1000 SRS debido al menor

volumen activo de sus cámaras y a su mejor resolución espacial. La fig. 4(a) muestra un ejemplo (paciente 1) de distribución de dosis reconstruida con la matriz 729. Los puntos que no cumplen el criterio gamma se muestran en la fig. 4(b), donde se observa que la mayoría se encuentran en regiones de alto gradiente de dosis, o en regiones de dosis intermedias.

Las diferencias entre el análisis gamma local y global son notables para la matriz 729 pero no para la matriz 1000 SRS, que muestra un índice  $\gamma$  excelente incluso con una evaluación local.

También se observa una mejora en el resultado para el índice  $\gamma$  cuando se comparan los resultados obtenidos

**Tabla 4.** Índice  $\gamma$  local y global (3%, 3 mm) para los mismos planes medidos con ambas matrices. También se muestra el índice  $\gamma$  local evaluado con el refinado de Depuydt *et al.*<sup>16</sup>

Paciente	Modo*	Matriz 729			Matriz 1000 SRS		
		$\gamma$ (local)	$\gamma_{\text{Depuydt}}$ (local)	$\gamma$ (global)	$\gamma$ (local)	$\gamma_{\text{Depuydt}}$ (local)	$\gamma$ (global)
1	FF	88.7	89.6	96.5	99.8	99.8	99.9
2	FF	87.5	90.4	95.8	99.7	100.0	100.0
3	FFF	83.4	85.7	95.8	99.6	100.0	100.0
4	FFF	90.4	93.4	97.0	97.9	98.1	98.5

\*FF: con filtro aplanador; FFF: sin filtro aplanador.

dos del análisis gamma tradicional<sup>15</sup> con los obtenidos teniendo en cuenta el refinado de Depuydt *et al.*<sup>16</sup> El motivo es que este método refinado proporciona una mejor evaluación del criterio gamma en regiones de alto gradiente de dosis. Esto se ilustra en la fig. 4(c), que corresponde al mismo plan que la fig. 4(b).

Ninguno de estos resultados parece depender de si el haz de radiación ha sido obtenido con filtro aplanador o sin él.

### Evaluación en rutina clínica

En la tabla 5 se resumen los resultados obtenidos en la verificación de 939 planes clínicos, verificados con la matriz adecuada, y con diferentes criterios de análisis. Se muestra el número de planes incluidos en cada caso, así como la mediana, la media y la desviación típica de los índices  $\gamma$  local. En la figura 5 se representa un histograma de índices  $\gamma$  local para todos los planes, clasificados según la matriz utilizada. El refinado incluido en el análisis de algunos de los últimos planes mejora los resultados, lo que confirma lo observado en la sección anterior. Además, la matriz 1000 SRS muestra unos resultados excelentes incluso para un criterio gamma 2%/2 mm.

La constancia del método de verificación basado en OCTAVIUS 4D y la matriz 729 se evaluó comparando el índice  $\gamma$  (3%/3 mm) para el mismo plan VMAT verificado mensualmente. Durante un periodo de 20 meses, el valor medio fue del 91.7% (variando de 87.6% a 93.2%, con una desviación típica 1.5%) sin refinado, y del 92.5% (variando de 88.4% a 93.9%, con una desviación típica 1.4%) con el refinado.

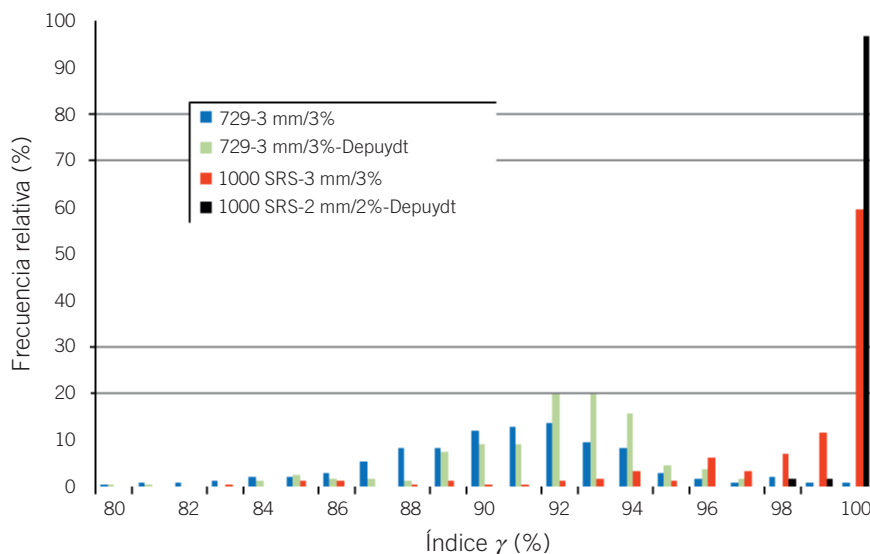
### Discusión

El valor del índice  $\gamma$  global es mayor para ambas matrices que el índice  $\gamma$  local, como es de esperar. Consideramos el análisis local más restrictivo y apropiado por considerar diferencias en regiones de dosis más bajas y, por lo tanto, más adecuado para verificaciones pretratamiento de planes complejos. Trabajos recientes sobre el sistema OCTAVIUS 4D muestran índices  $\gamma$  globales para unos pocos planes.<sup>8,11</sup> El presente trabajo muestra nuestra experiencia con un gran número de verificaciones realizadas con ambas matrices, usando el criterio local, y puede servir de ayuda a otros usuarios para decidir un criterio de aceptación, así como para conocer qué resultados se espera obtener con este sis-

**Tabla 5.** Estadísticas del índice  $\gamma$  local para planes de pacientes medidos con las matrices 729 o 1000 SRS.

Plan	Matriz 729		Matriz 1000 SRS	
	$\gamma$ (3%/3 mm)	$\gamma_{\text{Depuydt}}$ (3%/3 mm)	$\gamma$ (3%/3 mm)	$\gamma_{\text{Depuydt}}$ (2%/2 mm)
Número de planes	949	199	190	64
Mediana	90.3%	91.8%	99.5%	99.5%
Media	89.7%	91.0%	97.8%	97.7%
Desviación típica	4.5%	4.1%	4.0%	5.4%





**Fig. 5.** Histograma del índice  $\gamma$  local de las verificaciones de planes medidos con las matrices 729 y 1000 SRS en nuestro servicio. Los diferentes criterios de análisis se indican en la leyenda, donde el término “Depuydt” significa que se ha utilizado el método refinado de Depuydt *et al.*<sup>16</sup>

tema. Está fuera del objetivo de este trabajo analizar la relevancia clínica del análisis gamma, cuya evaluación y discusión se puede encontrar en la literatura.<sup>19</sup> Esto está siendo objeto de un estudio en progreso en nuestro grupo, puesto que PTW ha incorporado recientemente esta funcionalidad en su software VeriSoft.

Se han calculado los índices  $\gamma$  para los mismos cuatro planes clínicos para ambas matrices. Con la matriz 1000 SRS se han obtenido excelentes resultados, con unos índices  $\gamma$  local mayores del 97%, mientras que para la matriz 729 el índice  $\gamma$  medio fue del 88% sin refinado. En consecuencia, se decidió rebajar el criterio de aceptación para casos clínicos verificados con la matriz 729 si no se usa el refinado de Depuydt *et al.*<sup>16</sup> en el análisis. Actualmente, incluso en la literatura,<sup>20</sup> no hay un nivel establecido para el índice  $\gamma$  local por debajo del cual se considere el plan inaceptable. Esto se debe principalmente al hecho de que se desconoce la incertidumbre del proceso de verificación. Un estudio de sondeo ha mostrado que un nivel de acción para el índice  $\gamma$  global (3%/3 mm) comúnmente usado es del 95%.<sup>21</sup> En nuestro caso, cuando el índice  $\gamma$  local se acerca o no llega al 90% (índice  $\gamma$  global alrededor del 95% según los resultados obtenidos en la sección 3.3), se analizan varios planos de dosis. Esto permite revisar si los puntos que no cumplen el criterio gamma se encuentran en regiones de alto o bajo gradiente de dosis, o en regiones de dosis alta o baja, lo que es útil para poder así tomar una decisión sobre la validez del plan.

Con la introducción del método refinado de Depuydt *et al.*,<sup>16</sup> los resultados mejoran. Hay que destacar que el cálculo del índice  $\gamma$  local realizado previamente se

basaba en la definición original hecha por Low *et al.*,<sup>15</sup> la cual estaba definida para una distribución continua de dosis. Sin embargo, este no es el caso cuando se compara la dosis calculada por el SP con la medida. Para distribuciones discretas de dosis, el refinado introducido por Depuydt *et al.*<sup>16</sup> mejora la exactitud del método de análisis. En consecuencia, esto permite establecer de manera más fiable un límite para el índice  $\gamma$ . Para la matriz 729, un límite de 95% parece razonable, basado en los casi 200 casos evaluados, con un margen adicional del 1% debido a la reproducibilidad del método, como se ha mostrado también en este trabajo. Los resultados para la matriz 1000 SRS son mejores incluso para un criterio más restrictivo (2%/2 mm). Esto también pone de manifiesto la importancia de reportar claramente si el análisis gamma es local o global, y si se está usando el refinado de Depuydt *et al.*<sup>16</sup> o no.

Tanto el excelente índice  $\gamma$  local obtenido para planes verificados con OCTAVIUS 4D con ambas matrices, como la consistencia entre la dosis reconstruida por el sistema OCTAVIUS 4D y medida con cámara de ionización en puntos de interés, confirman la exactitud de la reconstrucción de dosis 3D, así como la correcta configuración del SP. Por lo tanto, este sistema ha demostrado proporcionar una herramienta útil para la verificación de planes complejos VMAT y SBRT en la rutina clínica.

## Conclusiones

En este estudio se ha establecido el ERI de las matrices de cámaras de ionización 729 y 1000 SRS,

evaluando linealidad, homogeneidad, reproducibilidad y corriente de fugas. Se han observado excelentes resultados para todos estos parámetros, con una mejor precisión para la matriz 1000 SRS debido a su mejor resolución y menor volumen sensible. A partir de medidas con cámara de ionización en varios puntos distintos al isocentro y de los excelentes resultados de comparación entre SP y OCTAVIUS 4D para varios planes, estos dos detectores, junto con el maniquí OCTAVIUS 4D y su software asociado han demostrado proporcionar una correcta reconstrucción de dosis 3D a partir de medidas 2D. El análisis de más de 900 planes clínicos verificados en nuestro servicio ha permitido establecer niveles de referencia por debajo de los cuales se requiere realizar un análisis más profundo de las diferencias entre el SP y las medidas de dosis.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a PTW Dosimetria Iberia la ayuda prestada en el desarrollo de este estudio. Este estudio ha recibido ayudas de la Generalitat Valenciana bajo el proyecto PROMETEOII/2013/010 y del Gobierno de España bajo el proyecto FIS2013-42156.

## Bibliografía

- Palma DA, Verbakel W, Far, Otto K, Senan S. New developments in arc radiation therapy: A review. *Cancer Treat Rev* 2010;36:393-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ctrv.2010.01.004>
- Teoh M, Clark CH, Wood K, Whitaker S, Nisbet A. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice. *Br J Radiol* 2011;84:967-96. <http://dx.doi.org/10.1259/bjr/22373346>
- Ezzell GA, Galvin JM, Low D, Palta JR, Rosen I, Sharpe MB, et al. Guidance document on delivery, treatment planning, and clinical implementation of IMRT: Report of the IMRT subcommittee of the AAPM radiation therapy committee. *Med Phys* 2003;30:2089-115. <http://dx.doi.org/10.1118/1.1591194>
- Alber M, Broggi S, De Wagter C, Eichwurz I, Engström P, Fiorino C, et al. Guidelines for the verification of IMRT. ESTRO Booklet No. 9. Bruselas, Bélgica: ESTRO; 2008.
- Feygelman V, Zhang G, Stevens C, Nelms BE. Evaluation of a new VMAT QA device, or the "X" and "O" array geometries. *J Appl Clin Med Phys* 2011;12:3346-68.
- Chandraraj V, Stathakis S, Manickam R, Esquivel C, Supe SS, Papanikolaou N. Comparison of four commercial devices for RapidArc and sliding window IMRT QA. *J Appl Clin Med Phys* 2011;12:338-49.
- Lang S, Reggiori G, Puxeu Vaqué J, Calle C, Hrbacek J, Klöck S, et al. Pretreatment quality assurance of flattening filter free beams on 224 patients for intensity modulated plans: A multicentric study. *Med Phys* 2012;39:1351-6. <http://dx.doi.org/10.1118/1.3685461>
- McGarry CK, O'Connell BF, Grattan MWD, Agnew CE, Irvine DM, Hounsell AR. OCTAVIUS 4D characterization for flattened and flattening filter free rotational deliveries. *Med Phys* 2013;40:091707. <http://dx.doi.org/10.1118/1.4817482>
- Li G, Zhang Y, Jiang X, Bai S, Peng G, Wu K, et al. Evaluation of the ArcCHECK QA system for IMRT and VMAT verification. *Phys Medica* 2013;29:295-303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.04.005>
- Hussein M, Adams EJ, Jordan TJ, Clark CH, Nisbet A. A critical evaluation of the PTW 2D-ARRAY seven29 and OCTAVIUS II phantom for IMRT and VMAT verification. *J Appl Clin Med Phys* 2013;14:274-92.
- Stathakis S, Myers P, Esquivel C, Mavroidis P, Papanikolaou N. Characterization of a novel 2D array dosimeter for patient-specific quality assurance with volumetric arc therapy. *Med Phys* 2013;40:071731. <http://dx.doi.org/10.1118/1.4812415>
- Markovic M, Stathakis S, Mavroidis P, Jurkovic IA, Papanikolaou N. Characterization of a two-dimensional liquid-filled ion chamber detector array used for verification of the treatments in radiotherapy. *Med Phys* 2014;41:051704. <http://dx.doi.org/10.1118/1.4870439>
- Van Esch A, Basta K, Evrard M, Ghislain M, Sergent F, Huyskens DP. The Octavius1500 2D ion chamber array and its associated phantoms: Dosimetric characterization of a new prototype. *Med Phys* 2014;41:091708. <http://dx.doi.org/10.1118/1.4892178>
- Real Decreto 1566/1998, de 17 de julio, por el que se establecen los criterios de calidad en radioterapia. BOE núm. 206: 29383-94.
- Low DA, Harms WB, Mutic S, Purdy JA. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. *Med Phys* 1998;25:656-61. <http://dx.doi.org/10.1118/1.598248>
- Depuydt T, Van Esch V, Huyskens DP. A quantitative evaluation of IMRT dose distributions: refinement and clinical assessment of the gamma evaluation. *Radiother Oncol* 2002;62:309-19. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8140\(01\)00497-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8140(01)00497-2)
- Bailey DW, Kumaraswamy L, Bakhtiari M, Malhotra HK, Podgorsak MB. EPID dosimetry for pretreatment quality assurance with two commercial systems. *J Appl Clin Med Phys* 2012;13:82-99.
- Castro P, García-Vicente F, Mínguez C, Floriano A, Sevillano D, Pérez L, et al. Study of the uncertainty in the determination of the absorbed dose to water during external beam radiotherapy calibration. *J Appl Clin Med Phys* 2008;9:70-86.
- Stasi M, Bresciani S, Miranti A, Maggio A, Sapino V, Gabriele P. Pretreatment patient-specific IMRT quality assurance: A correlation study between gamma index and patient clinical dose volume histogram. *Med Phys* 2012;39:7626-34. <http://dx.doi.org/10.1118/1.4767763>
- Ezzell GA, Burmeister JW, Dogan N, LoSasso T, Mechalakos G, Mihailidis D, et al. IMRT commissioning: Multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119. *Med Phys* 2009;36:5359-73. <http://dx.doi.org/10.1118/1.3238104>
- Nelms BE, Simon JA. A survey on planar IMRT QA analysis. *J Appl Clin Med Phys* 2007;8:76-90.