

Validación de unas pruebas de control de calidad del colimador multilámina utilizando dispositivos electrónicos de imagen portal y una aplicación comercial

Validation of quality control tests of a multileaf collimator using electronic portal image devices and commercial software

Artur Latorre-Musoll*, Nuria Jornet Sala, Pablo Carrasco de Fez, Teresa Eudaldo Puell, Agustí Ruiz Martínez, Montserrat Ribas Morales

Servei de Radiofísica i Radioprotecció. Hospital de la Santa Creu i Sant Pau. Barcelona.

Fecha de Recepción: 24/03/2013 - Fecha de Aceptación: 23/12/2013

Se describe un procedimiento de control de calidad diario del colimador multilámina (MLC) basado en dispositivos electrónicos de imagen portal y en una aplicación comercial. Se han diseñado unas pruebas que comparan las imágenes portales de un conjunto de configuraciones estáticas y dinámicas del MLC en relación a un conjunto de imágenes de referencia utilizando una aplicación comercial de dosimetría portal. Las imágenes de referencia fueron adquiridas utilizando el mismo conjunto de configuraciones del MLC después de la calibración del MLC. Con el objeto de evaluar la sensibilidad para detectar errores del MLC, se han modificado las configuraciones del MLC insertando un conjunto de errores de posición y de velocidad de las láminas. Se han correlacionado medidas de distancia sobre las imágenes portales con errores de posición de hasta 0.1 mm en las configuraciones estáticas del MLC. Asimismo se han correlacionado diferencias de dosis entre las imágenes portales tanto con errores de velocidad de hasta un 0.5% de la velocidad nominal de las láminas como con errores de posición de hasta 0.1 mm en las configuraciones dinámicas del MLC. El procedimiento de control de calidad propuesto permite evaluar configuraciones estáticas y dinámicas del MLC con una alta sensibilidad y fiabilidad.

Palabras clave: MLC, control de calidad, EPID, IMRT, Portal Dosimetry.

We describe a daily quality control procedure of the multileaf collimator (MLC) based on electronic portal image devices and commercial software. We designed tests that compare portal images of a set of static and dynamic MLC configurations to a set of reference images using commercial portal dosimetry software. Reference images were acquired using the same set of MLC configurations after the calibration of the MLC. To assess the sensitivity to detect MLC underperformances, we modified the MLC configurations by inserting a range of leaf position and speed errors. Distance measurements on portal images correlated with leaf position errors down to 0.1 mm in static MLC configurations. Dose differences between portal images correlated both with speed errors down to 0.5% of the nominal leaf velocities and with leaf position errors down to 0.1 mm in dynamic MLC configurations. The proposed quality control procedure can assess static and dynamic MLC configurations with high sensitivity and reliability.

Key words: MLC, quality control, EPID, IMRT, Portal Dosimetry.

Introducción

El colimador multilámina (MLC) es un elemento determinante para administrar la dosis de radiación correcta al paciente en las técnicas de radioterapia

de intensidad modulada (IMRT) dinámica o *sliding window*.^{1,2} Errores inferiores a 1 mm en la posición del MLC funcionando en modo dinámico (dMLC) pueden producir variaciones dosimétricas de más del 10%.^{1,3} LoSasso et al.² han sugerido que la

* Correspondencia
Email: alatorre@santpau.cat

exactitud en la posición del dMLC debe ser mejor que 0.2 mm, y por tanto, sugieren que el control de calidad sobre el MLC tenga una sensibilidad mejor que 0.2 mm.

Las películas radiográficas han sido ampliamente utilizadas para verificar el posicionamiento y la velocidad del dMLC.^{1,2,4,5} Estas películas permiten detectar visualmente desviaciones del orden de 0.2 mm en la posición del dMLC.^{1,2,4} Sin embargo, para cuantificar estas desviaciones es necesario digitalizar las películas y procesar las imágenes mediante aplicaciones desarrolladas por el propio usuario. Este proceso es tedioso, y limita el número y la frecuencia de las pruebas basadas en este sistema que pueden implementarse en la práctica. Las películas radiocrómicas también requieren una digitalización y un procesamiento para eliminar la subjetividad asociada al análisis visual. Por lo tanto, las películas radiocrómicas presentan unos inconvenientes similares a las películas radiográficas para este tipo de pruebas.

La separación entre pares de láminas opuestas es el parámetro más crítico del dMLC.^{1,2,4} Las cámaras de ionización permiten medir desviaciones de hasta 0.1 mm de este parámetro.^{1,6} Sin embargo, este detector solo puede monitorizar las láminas que proyectan su recorrido sobre el volumen sensible de la cámara. Algunos autores^{2,6} han propuesto repetir estas medidas en más de una posición, o utilizar matrices 1D de detectores, pero esta solución tampoco ofrece una descripción completa del dMLC.

Los dispositivos electrónicos de imagen portal (EPID), en especial los basados en detectores de silicio amorfo, ofrecen una alternativa atractiva a los detectores mencionados anteriormente para implantar un control de calidad sobre el MLC.⁶⁻¹⁰ Por una parte, el área útil de los EPID permite controlar un número similar de láminas que los sistemas de película. Además, la resolución y la sensibilidad de los EPID modernos permite evaluar el posicionamiento del dMLC con una exactitud comparable a los sistemas de película.^{4,7,11} Por otra parte, los datos adquiridos con los EPID son directamente digitales y su adquisición no implica un montaje experimental, lo que supone un ahorro de tiempo frente a los sistemas de película y a las cámaras de ionización.

Por la ventaja que suponen los EPID en relación al resto de detectores mencionados, en la literatura se han descrito varias pruebas de control de calidad del MLC basadas en EPID.⁶⁻¹⁰ Sin embargo, estas pruebas presentan en general dos inconvenientes. En primer lugar, evalúan un solo aspecto del MLC (posición, velocidad o separación entre pares de láminas opuestas). Y en segundo lugar, requieren un procesamiento laborioso mediante algoritmos desarrollados por los propios usuarios. Este trabajo tiene como objetivo resolver estas dos limitaciones. En primer lugar, diseñar un conjunto

exhaustivo de pruebas basadas en EPID para verificar aspectos estáticos y dinámicos del MLC. De este modo, se podrá realizar un control exhaustivo del MLC en una única sesión de medidas. Y en segundo lugar, basar el análisis de las pruebas en una aplicación de dosimetría portal disponible comercialmente. De este modo, las pruebas se podrán analizar con una metodología que podrá ser compartida entre la comunidad de usuarios sin la necesidad de implementar algoritmos y procesos adicionales.

En la primera parte de este trabajo se presentan las pruebas de control de calidad del MLC que se han implementado en nuestro centro. A continuación, se describen las medidas necesarias para cuantificar los errores de posición y/o de velocidad que el MLC pueda presentar. Finalmente, se estima la sensibilidad de las pruebas descritas.

Material y métodos

Equipos

Las pruebas de control de calidad del MLC que se describirán a continuación se han implementado en tres aceleradores lineales Clinac 2100C/D (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA) equipados con un MLC Millennium 120. Este modelo de MLC está compuesto por 40 pares de láminas centrales que proyectan un grosor de 0.5 cm en el isocentro, y 20 pares de láminas periféricas (10 a cada lado) que proyectan un grosor de 1.0 cm. Los tres aceleradores disponen de un EPID modelo IDU20, con una unidad de adquisición tipo IAS3, y con un tamaño del detector de 40 cm × 30 cm. Los EPID están compuestos de silicio amorfo con dos especificaciones distintas según el acelerador, aS500-II en uno de ellos y aS1000 en los otros dos. Estas dos especificaciones se diferencian en las dimensiones de la matriz, de 512 × 384 para aS500-II y de 1024 × 768 para aS1000, y en el tamaño de píxel, 0.78 mm para aS500-II y 0.39 mm para aS1000. Los EPID se calibran mensualmente según los procedimientos del fabricante en términos de *Calibration Units* (CU). En este trabajo se utilizará el término genérico *dosis* para referirse a esta lectura portal calibrada. Para el diseño y el análisis de las pruebas se han utilizado, respectivamente, las aplicaciones MLC Shaper v7.0 y Portal Dosimetry v8.8 (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA).

Descripción de las pruebas

Las pruebas de control de calidad implementadas consisten en la irradiación directa del EPID con distintas configuraciones del MLC, 5 de ellas estáticas y 3 de dinámicas. Las irradiaciones se realizan con el

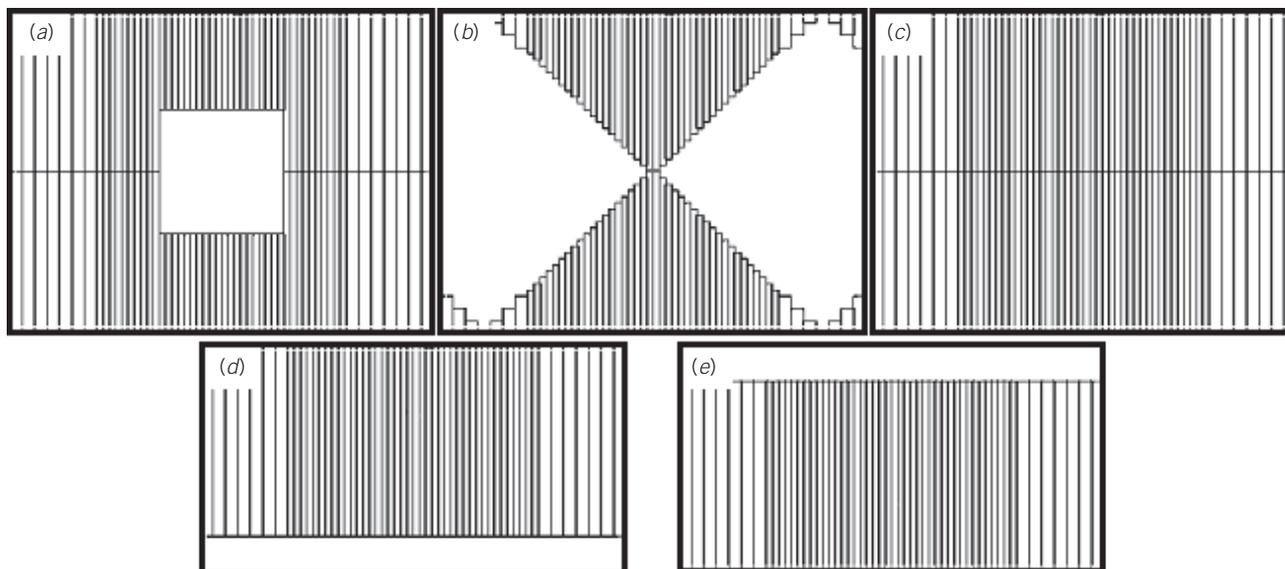


Fig. 1. Esquemas de las configuraciones estáticas del MLC. (a) Campo cuadrado de 10 cm x 10 cm. (b) Campo con “escalones” de 0.5 cm. (c) Campo completamente cerrado. (d) Láminas de uno de los carros del MLC sobrepasando en 10 cm la línea media. (e) Ídem, para el otro carro de láminas. Los marcos de las figuras representan las aperturas de las mandíbulas: 25.0 cm x 33.0 cm para (a), (b) y (c) y 17.5 cm x 33.0 cm para (d) y (e).

colimador a 90° y el EPID a una distancia foco-detector de 120 cm. Esta disposición es un compromiso entre el número de pares de láminas visualizadas (54 de 60) y la magnificación de la imagen. Las mandíbulas del colimador se ajustan para proteger la electrónica del detector. Todas las irradiaciones se realizan con la energía de RX de 6 MV.

El objetivo de las configuraciones estáticas del MLC es comprobar el correcto posicionamiento de las láminas en técnicas de radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT). En la fig. 1 se describen esquemáticamente las cinco configuraciones diseñadas, todas ellas irradiadas con 10 unidades de monitor (UM) y con una tasa de 300 UM/min, excepto el campo completamente cerrado que se ha programado con 50 UM para obtener una lectura significativa.

El objetivo de las configuraciones del dMLC es comprobar el correcto funcionamiento de las láminas en técnicas de IMRT dinámica. En la fig. 2 se describen esquemáticamente las tres configuraciones diseñadas. La prueba de velocidad⁵ pretende detectar desviaciones de la velocidad de las láminas a partir de las desviaciones dosimétricas que este efecto produce. La prueba “ventana deslizante”¹ pretende detectar desviaciones en la separación entre pares de láminas opuestas (con respecto a una separación nominal de 0.5 cm), también a partir de las desviaciones dosimétricas producidas. La prueba “valla”⁵ pretende evaluar el correcto posicionamiento de las láminas a partir del patrón dosimétrico que producen unas aceleraciones y desaceleraciones adecuadamente coordinadas del MLC. Las pruebas dinámicas se han programado con

200 UM y con una tasa de 300 UM/min, excepto la prueba de velocidad que se ha programado con una tasa de 200 UM/min para obtener valores más típicos de la velocidad de las láminas.

Las imágenes portales de las configuraciones del MLC descritas se comparan con un conjunto de imágenes de referencia que fueron obtenidas con el mismo conjunto de configuraciones del MLC después de la calibración del mismo. Dicha comparación se realiza utilizando las herramientas de Portal Dosimetry con la metodología que se describirá en el próximo apartado. Estas pruebas se realizan cada día a un ángulo distinto del brazo (0°, 90°, 180° y 270°). Para ello, se han creado 4 planes de tratamiento con las pruebas programadas a un ángulo distinto en cada plan. Sin embargo, Portal Dosimetry no permite comparar imágenes correspondientes a planes distintos y, por lo tanto, no es posible comparar cada prueba con su correspondiente versión a 0°. Esta limitación ha obligado a obtener un conjunto de imágenes de referencia para cada ángulo. Con esta metodología, se controla la estabilidad del funcionamiento del MLC a lo largo del tiempo con respecto a las respectivas referencias del mismo ángulo.

La inicialización del MLC, que el fabricante recomienda realizar diariamente, ejecuta una calibración automática de las posiciones de las láminas. Sin embargo, esta calibración inicial puede irse degradando por un uso continuado de los motores de las láminas debido a una pérdida de “cuentas” de los codificadores de posición, especialmente en las láminas o motores que presenten alguna deficiencia. Dado que la inicialización del MLC se realiza por la mañana como parte

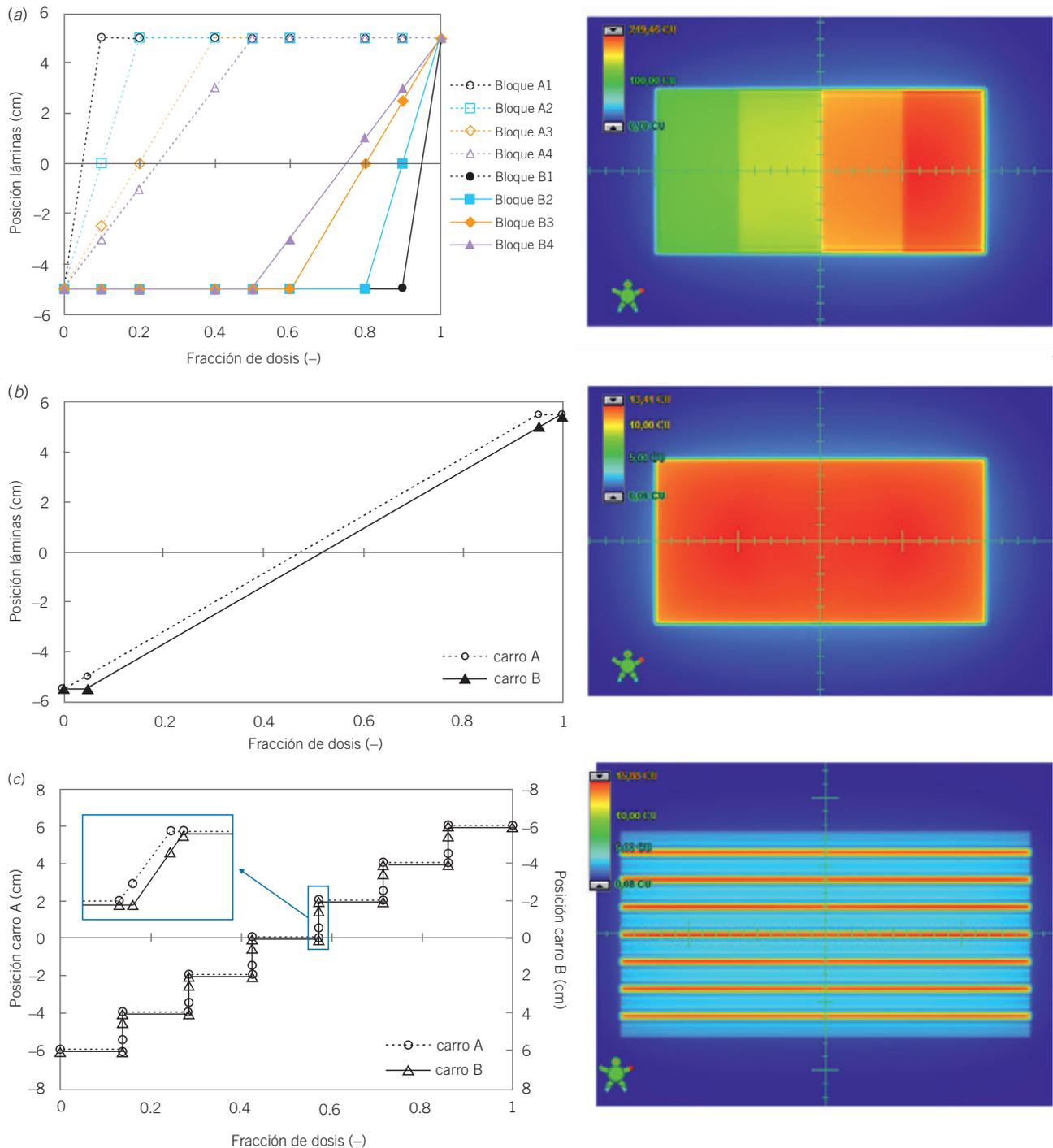


Fig. 2. Descripción esquemática de las configuraciones del dMLC. A la izquierda se muestran los diagramas de movimiento de las láminas. A la derecha se muestran las correspondientes predicciones de dosis portal calculadas con el algoritmo Portal Dose Image Prediction (PDIP) v8.9 de Eclipse (Varian Medical Systems). (a) Prueba de velocidad: 4 bloques de 10 pares de láminas contiguas realizan un barrido a velocidad constante y permanecen completamente abiertos durante una fracción de la irradiación en un campo de 10 cm × 20 cm. La fluencia resultante se divide en 4 subzonas con un nivel de intensidad uniforme que guarda relación con la velocidad y el tiempo de apertura de cada bloque. (b) “Ventana deslizante”: las láminas barren un campo de 10 cm × 20 cm a velocidad constante y con una separación entre pares de láminas opuestas de 0.5 cm. La fluencia resultante es uniforme. (c) “Valla”: movimiento rápido y simultáneo de todas las láminas que, en siete posiciones equidistantes cada 2 cm, conforman aperturas de 1 mm donde transcurre el 97% de la irradiación. La fluencia resultante es un patrón tipo “valla” dentro de un campo de 15 cm × 30 cm.

de la secuencia de calentamiento, se han programado las pruebas de control de calidad del MLC diariamente y al final de la jornada laboral, con el fin de maximizar su poder predictivo.²

Modelización de las pruebas

Para cada una de las pruebas de control de calidad implementadas, se ha propuesto un modelo que relaciona los errores de posición y/o velocidad del MLC con un parámetro medible fruto de la comparación de las imágenes portales adquiridas y de referencia.

– **Pruebas estáticas.** El parámetro medible es la diferencia de posición Δx entre una lámina de la

imagen portal adquirida y la análoga de la imagen de referencia. La fig. 3 muestra cómo utilizar las herramientas de Portal Dosimetry para medir de forma precisa Δx . Esta diferencia debe ser lineal con el error en la posición ϵ_x de dicha lámina:

$$\Delta x = \lambda \epsilon_x, \quad (1)$$

donde el factor λ es la magnificación correspondiente a la distancia foco-detector empleada ($\lambda = 1.2$ para el montaje experimental descrito).

– **Prueba de velocidad.** El parámetro medible es la diferencia de dosis ΔD entre la imagen portal adquirida y la de referencia, medida a mitad del recorrido de la lámina de interés. Ésta se obtiene como el pro-

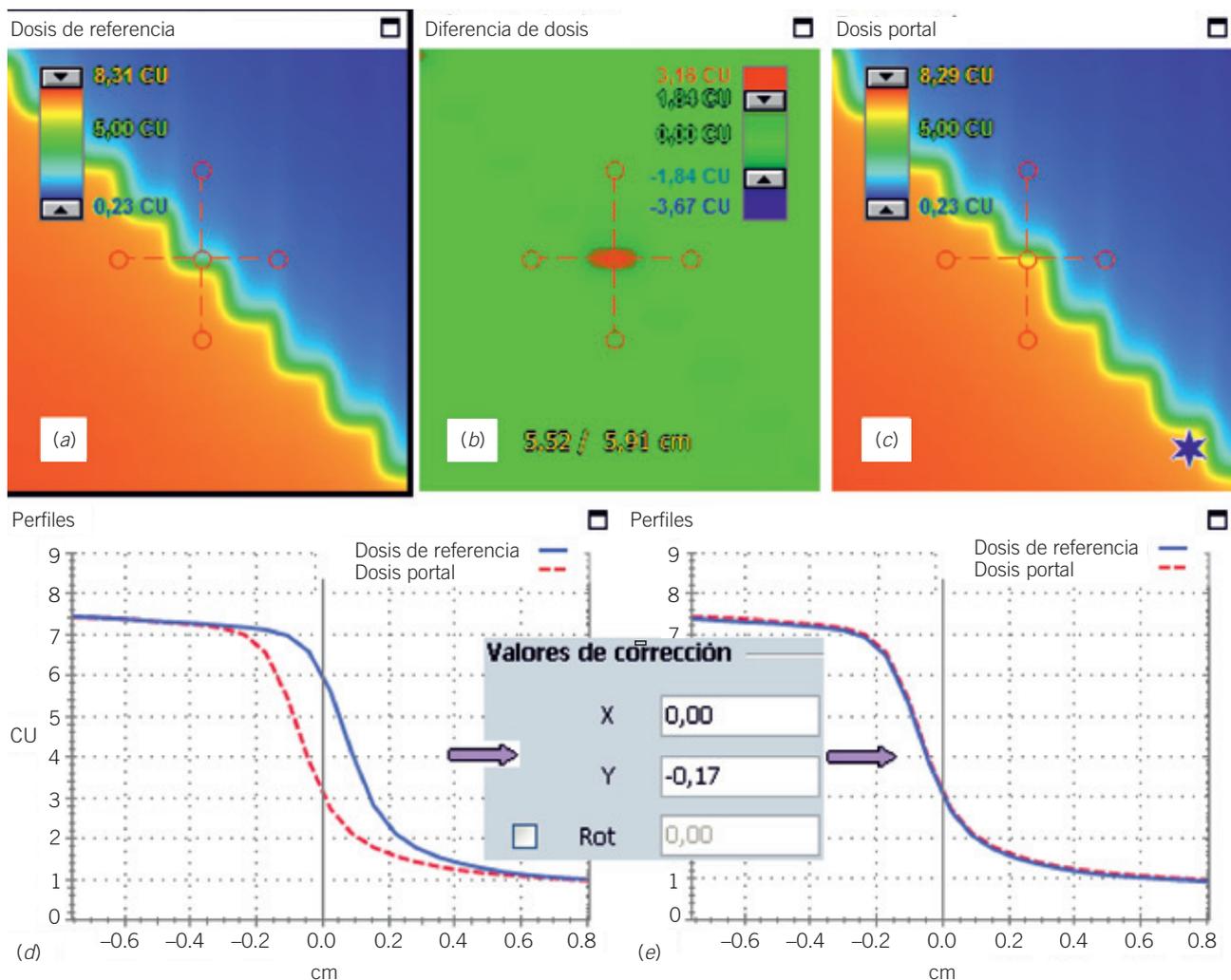


Fig. 3. Análisis realizado en las pruebas estáticas para medir la diferencia de posición Δx entre una lámina con un error ϵ_x y la análoga de referencia. (a) Imagen de referencia. (c) Imagen portal adquirida. (b) Diferencia de dosis entre ambas, que hace evidente la lámina que contiene el error. (d) Perfiles de dosis sobre las dos imágenes, paralelos a la lámina que contiene el error, y alrededor del extremo de ésta. (e) La aplicación permite desplazar una imagen con respecto a la otra; el valor del desplazamiento que superpone ambos perfiles en la zona de alto gradiente es el resultado de la medida (en este ejemplo, $\Delta x = -0.17$ cm).

medio de los valores de píxel dentro de una región de interés de unos 2-3 mm de lado definida sobre la sustracción de imágenes que Portal Dosimetry proporciona. Esta diferencia debe ser lineal con el error en la velocidad ε_ν de dicha lámina:

$$\Delta D = \frac{dL}{2\nu^2} \varepsilon_\nu, \quad (2)$$

donde ν es la velocidad nominal de la lámina, d es la tasa de dosis a nivel de detector y L es el recorrido total de la lámina. El modelo (2) es una aproximación a primer orden válida para $\varepsilon_\nu \ll \nu$. En efecto, sea T el tiempo total de la irradiación y L/ν el tiempo que tarda una lámina (o su opuesta) en barrer el campo de irradiación. La prueba se ha diseñado de forma que $T \geq 2L/\nu$ para todas las velocidades implicadas, de modo que un punto situado a mitad de recorrido permanece en irradiación directa un tiempo t_d :

$$t_d = T - \frac{L}{2\nu} - \frac{L}{2\nu}, \quad (2a)$$

donde se explicita la contribución de las dos láminas del par. Supongamos que una lámina del par (pero no su opuesta) se mueve con una velocidad anómala $\nu + \varepsilon_\nu$. La diferencia entre los tiempos en irradiación directa Δt_d entre la configuración que contiene el error y la configuración de referencia es:

$$\Delta t_d = \frac{L}{2\nu} \left(1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_\nu/\nu} \right) \approx \frac{L}{2\nu^2} \varepsilon_\nu, \quad (2b)$$

donde se ha utilizado la aproximación a primer orden en serie de Taylor $(1 + \varepsilon_\nu/\nu)^{-1} \approx 1 - \varepsilon_\nu/\nu$, válida para $\varepsilon_\nu \ll \nu$. La diferencia de dosis en el punto de medida entre ambas situaciones es debida principalmente a Δt_d , mientras que las diferencias debidas a otros efectos son despreciables dado que las dos configuraciones del MLC solo se distinguen por el pequeño error ε_ν . Finalmente, multiplicando (2b) por el coeficiente de calibración del EPID (CU/UM), la tasa de la irradiación (UM/min), y los factores inverso cuadrado de la distancia y factor-área aplicables (agrupados bajo el parámetro d), se obtiene (2). En la tabla 1 se muestran los valores de $dL/2\nu^2$ para distintos parámetros de irradiación, incluidos los utilizados en las pruebas implementadas.

- **Prueba “ventana deslizante”.** La dosis portal D en un punto guarda una relación lineal con la apertura g entre el par de láminas opuestas correspondientes, $D = k_1 g + k_2$, donde k_1 y k_2 dependen del sistema de medida, de los parámetros de la irradiación, de la transmisión del MLC y del *dosimetric leaf separation* (DLS).¹² Supongamos que uno de los pares de láminas define una apertura anómala $g + \varepsilon_g$. El efecto de este error puede linealizarse como $D + \Delta D = k_1(g + \varepsilon_g) + k_2$:

Tabla 1. Combinaciones de UM y UM/min utilizadas en la validación de la prueba de velocidad para estudiar un rango de velocidades más amplio que el estrictamente empleado en las pruebas diarias (combinación B). Para cada combinación, se muestran las velocidades nominales de cada uno de los cuatro grupos de láminas, el valor teórico del coeficiente del modelo (2), el coeficiente del ajuste lineal sin término independiente entre ε_ν y ΔD , y el coeficiente de correlación lineal asociado al ajuste.

Combinación	ν (mm/s)	$dL/2\nu^2$ (CU·s/mm)	Ajuste (CU·s/mm)	r
(A)	1.111	51.1	47.2 ± 0.9	0.9990
300 UM	1.389	32.7	28.2 ± 0.7	0.997
100 UM/min	2.778	8.2	6.9 ± 0.9	0.995
	5.556	2.0	1.5 ± 0.5	0.7
(B)	3.333	11.4	10.5 ± 0.2	0.998
(pruebas diarias)	4.167	7.27	6.12 ± 0.16	0.997
200 UM	8.333	1.82	1.61 ± 0.05	0.995
200 UM/min	16.667	0.45	0.47 ± 0.07	0.92
(C)	5.000	7.57	7.17 ± 0.07	0.9996
200 UM	6.250	4.85	4.16 ± 0.11	0.997
300 UM/min	12.500	1.21	0.95 ± 0.05	0.990
	25.000	0.30	0.26 ± 0.03	0.96

$$\Delta D = k_1 \varepsilon_g, \quad (3)$$

donde ΔD es el mismo parámetro medible que en la prueba de velocidad y se obtiene de la misma forma. Por consiguiente, la diferencia de dosis medida entre la imagen portal adquirida y la de referencia debe ser proporcional al error en la apertura ε_g . El valor de la constante k_1 debe obtenerse experimentalmente.¹²

- **Prueba “valla”.** No se ha propuesto un modelo analítico para caracterizar esta prueba, solo una descripción cualitativa.

Validación y sensibilidad de las pruebas

Para comprobar la adecuación de los modelos (1), (2) y (3) a las pruebas propuestas, y para determinar la sensibilidad de las mismas, se han introducido una serie de errores controlados en ciertas láminas que simulan los posibles errores de funcionamiento que el MLC pueda presentar:

- **Pruebas estáticas y prueba “valla”:** $-2.5 \text{ mm} \leq \varepsilon_x \leq 2.5 \text{ mm}$ a intervalos de 0.05 mm.
- **Prueba de velocidad:** $-0.5 \text{ mm/s} \leq \varepsilon_v \leq 0.5 \text{ mm/s}$ a intervalos de 0.028 mm/s. Para estudiar un rango de velocidades más amplio, se ha repetido la prueba con distintas combinaciones de UM y UM/min (véase la tabla 1).
- **Prueba “ventana deslizante”:** $-2.0 \text{ mm} \leq \varepsilon_g \leq 2.0 \text{ mm}$ a intervalos de 0.1 mm.

Las distancias y las velocidades indicadas se definen en el isocentro. Se han adquirido secuencialmente las imágenes portales de las configuraciones originales (tomadas como referencia) y de las modificadas con errores controlados. A continuación, se han comparado las predicciones de los modelos (1), (2) y (3) utilizando los errores introducidos (ε_x , ε_v y ε_g) con las medidas realizadas sobre las imágenes portales adquiridas (Δx y ΔD). Finalmente, se ha estimado la sensibilidad s de cada prueba como los mínimos ε_x , ε_v o ε_g detectables.

Resultados

No se han observado diferencias significativas entre los dos modelos de EPID estudiados (aS1000 y aS500-II). Por lo tanto, los resultados se presentarán de forma conjunta independientemente del modelo de EPID. Las medidas obtenidas (Δx , ΔD) no han mostrado dependencia con las posiciones que ocupaban

las láminas que contenían los errores (ε_x , ε_v , ε_g). Esto garantiza que la respuesta de los EPID es homogénea. En lo que sigue, todas las incertidumbres se expresarán con un factor de expansión $k = 1$ salvo que se indique lo contrario.

Pruebas estáticas

Se han analizado 168 errores de posición ε_x entre las 5 configuraciones estáticas diseñadas. En la fig. 4 se representan las diferencias de posición medidas Δx , el modelo (1) con $\lambda = 1.2$, y las diferencias residuales entre cada una de las medidas y el modelo. Se observa un buen acuerdo entre las medidas y el modelo. El promedio y la desviación estándar de las diferencias residuales ha sido -0.02 mm y 0.07 mm respectivamente. El ajuste lineal sin término independiente entre Δx y ε_x ha sido $\Delta x = (1.183 \pm 0.006)\varepsilon_x$, con $r = 0.998$. La diferencia con el valor esperado $\lambda = 1.2$ supone discrepancias inferiores a 0.1 mm para errores de hasta 6 mm. Por consiguiente, el modelo (1) describe adecuadamente la relación entre las medidas y los errores de posición del MLC.

El comportamiento discontinuo de las diferencias residuales de la fig. 4 es una consecuencia de la resolución de la herramienta de medida de distancias de Portal Dosimetry, que es de 0.1 mm (véase la fig. 3). Estas discontinuidades sugieren que la mínima desviación detectable es la correspondiente a la mitad de la resolución de la medida, es decir, unos 0.04 mm dada la magnificación $\lambda = 1.2$. Sin embargo, se han observado diferencias residua-

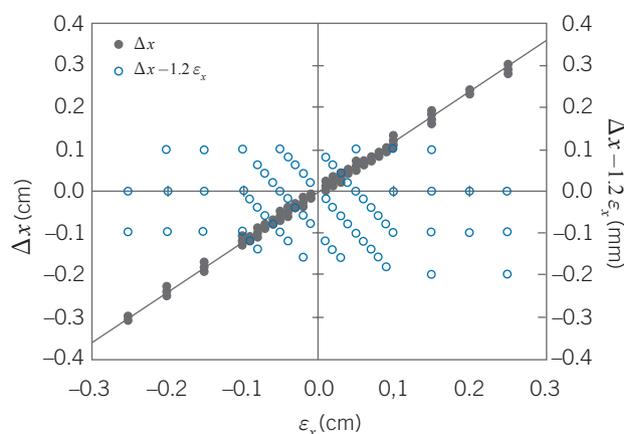


Fig. 4. Puntos: diferencias de posición medidas en las pruebas estáticas (Δx) en función de los errores introducidos (ε_x). Línea: modelo (1) con $\lambda = 1.2$. Círculos: diferencias residuales entre las medidas y el modelo. Obsérvese que la escala de las diferencias residuales $\Delta x - 1.2\varepsilon_x$ está ampliada un factor 10 con respecto a la de las medidas.

les de 0.1–0.2 mm, por lo que la sensibilidad se ha estimado en un valor conservador de $s_x = 0.1$ mm coincidente con la resolución de medida.

Prueba de velocidad

Se han analizado 96 errores ε_v sobre las 12 velocidades nominales ν de la tabla 1. En la tabla 1 se muestran los ajustes lineales sin término independiente entre ε_v y las diferencias de dosis medidas ΔD , además de los coeficientes de correlación lineal r asociados. Para unas determinadas condiciones de irradiación, la linealidad y la incertidumbre relativa del ajuste mejoran para ν decrecientes. Este comportamiento se explica dada la mejor sensibilidad de la prueba para velocidades nominales bajas, como indica la proporcionalidad del tipo ν^{-2} del modelo (2). Los valores teóricos del modelo (2) sobrestiman los ajustes mostrados en la tabla 1 en un 13% en promedio. Este resultado es consecuencia de considerar el parámetro d constante, dado que los factores-área durante la irradiación dinámica son variables e inferiores al valor experimental disponible. Sin embargo, esta simplificación ha resultado del mismo orden que la incertidumbre en la medida de ΔD . Ésta se ha estimado a partir de las desviaciones estándar de los valores de píxel dentro de las ROI utilizadas, resultando $\sigma_{\Delta D} = 0.3, 0.15$ y 0.08 CU para las combinaciones A, B y C, respectivamente. En la fig. 5 se representan los resultados obtenidos para la combinación empleada en las pruebas diarias (combinación B). Considerando las incertidumbres estimadas, el modelo (2) describe correctamente la relación entre las medidas y los errores de velocidad del dMLC.

A partir del modelo (2) se puede estimar la sensibilidad de esta prueba a partir de la incertidumbre de las medidas $\sigma_{\Delta D}$ como $s_v = (2\nu^2\sigma_{\Delta D})/(dL)$. La sensibilidad mejora para velocidades decrecientes. Utilizando los valores de d, L y $\sigma_{\Delta D}$ correspondientes a la combinación empleada en las pruebas diarias (combinación B), se obtiene $s_v = 0.013, 0.021, 0.083$ y 0.33 mm/s para $\nu = 3.33, 4.17, 8.33$ y 16.67 mm/s respectivamente. Por lo tanto, la sensibilidad se sitúa entre un 0.5 y un 2% del valor nominal de las velocidades de entre 3.33 y 16.67 mm/s, típicas en los tratamientos de IMRT dinámicos.

Prueba “ventana deslizante”

Se han analizado 27 errores de separación ε_g entre pares de láminas opuestas. En la fig. 6 se representan las diferencias de dosis medidas ΔD , el modelo (3) con el valor ajustado $k_1 = 1.288 \pm 0.016$ CU/mm ($r = 0.998$), y las diferencias residuales entre cada una de las medidas y el modelo. Se observa un buen acuer-

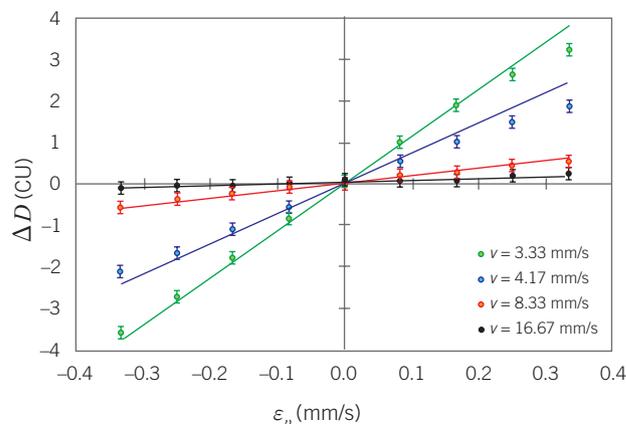


Fig. 5. Puntos: diferencias de dosis medidas en la prueba de velocidad (ΔD) en función de los errores introducidos (ε_v). Se representan solo las velocidades nominales correspondientes a la combinación empleada en los controles diarios (combinación B). Líneas: modelo (2) para cada una de las velocidades nominales indicadas. Las barras de error corresponden a la incertidumbre estimada a partir de las desviaciones estándar de los valores de píxel dentro de las ROI utilizadas ($\sigma_{\Delta D}$).

do entre medidas y modelo. El promedio y la desviación estándar de las diferencias residuales ha sido 0.05 CU y 0.08 CU respectivamente. La fig. 6 sugiere una discrepancia creciente entre el modelo y las medidas para valores de ε_g crecientes en valor absoluto. Sin embargo, esta limitación del modelo supone discrepancias inferiores a 0.2 mm para errores de hasta 2 mm ($< 10\%$). Por consiguiente, el modelo (3) describe adecuadamente la relación entre las medidas y los errores en la separación entre pares de láminas del MLC.

La desviación estándar de los valores de píxel dentro de las ROI utilizadas ha sido $\sigma_{\Delta D}^{(ROI)} = 0.04$ CU en promedio. La desviación estándar de medidas independientes ΔD para un mismo valor de ε_g ha sido $\sigma_{\Delta D}^{(indep)} = 0.15$ CU en promedio. Por tanto, esta última ha resultado ser el factor limitante para definir la sensibilidad de la prueba, estimada como $s_g = k_1/\sigma_{\Delta D}^{(indep)} = 0.12$ mm ≈ 0.1 mm.

Prueba “valla”

Se han estudiado 20 errores de posición ε_x . En la fig. 7 se muestra el análisis realizado sobre las imágenes portales obtenidas y las de referencia. Como se observa, no es posible definir una diferencia de posición Δx del mismo modo que en las pruebas estáticas. Las diferencias de dosis ΔD tampoco muestran un comportamiento lineal como en las pruebas de velocidad o “ventana deslizante” debido a la dificultad de definir ROI de un tamaño adecuado. Dado que visual-

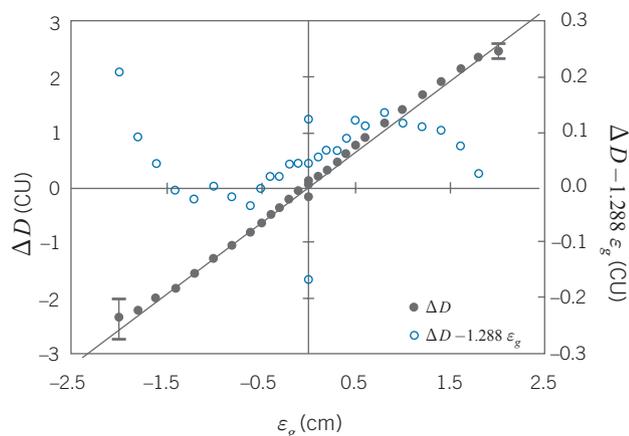


Fig. 6. Puntos: diferencias de dosis medidas en la prueba “ventana deslizante” (ΔD) en función de los errores introducidos (ε_g). Línea: modelo (3) con el valor empírico $k_1 = 1.288$. Círculos: diferencias residuales entre ΔD y (3). Obsérvese que la escala de las diferencias residuales $\Delta D - 1.2\varepsilon_g$ está ampliada un factor 10 con respecto a la de las medidas ΔD . En el punto de medida $\varepsilon_g = -2.0$ mm se muestra la incertidumbre ($k = 10$) correspondiente $\sigma_{\Delta D}^{(ROI)}$, mientras que en el punto de medida $\varepsilon_g = +2.0$ mm se muestra la incertidumbre ($k = 1$) correspondiente $\sigma_{\Delta D}^{(indep)}$, obtenida de medidas independientes con un mismo ε_g (por claridad, se muestran solo 3 medidas independientes correspondientes a $\varepsilon_g = 0$).

mente son detectables errores del orden de 0.1 mm (véase la fig. 7), se ha estimado la sensibilidad de esta prueba de forma cualitativa como $s_x = 0.1$ mm.

Discusión

Los modelos propuestos para las pruebas de control de calidad del MLC implementadas (expresiones (1), (2) y (3)) han descrito correctamente la relación entre los errores programados del MLC con las magnitudes definidas sobre las imágenes portales adquiridas con los EPID. Por lo tanto, las medidas de distancia (Δx) y de diferencia de dosis (ΔD) obtenidas con Portal Dosimetry son indicadores sencillos y fiables de los errores de posición (ε_x) del MLC/dMLC y de los errores de velocidad (ε_v) y de la separación entre pares de láminas opuestas (ε_g) del dMLC. La sensibilidad de estas pruebas se ha estimado en $s_x = s_g = 0.1$ mm para los errores de posición del MLC, tanto en modo estático como en modo dinámico. Para el dMLC, se ha estimado una sensibilidad del $s_v = 0.5 - 2.0\%$ de la velocidad nominal de las láminas en el rango de interés clínico.

No se han encontrado diferencias significativas entre los dos modelos de EPID. Los tamaños efectivos de píxel (proyectados en el isocentro) de los EPID estudiados son 0.65 y 0.33 mm para aS500-II y aS1000 respectivamente. Estos valores son significativamente

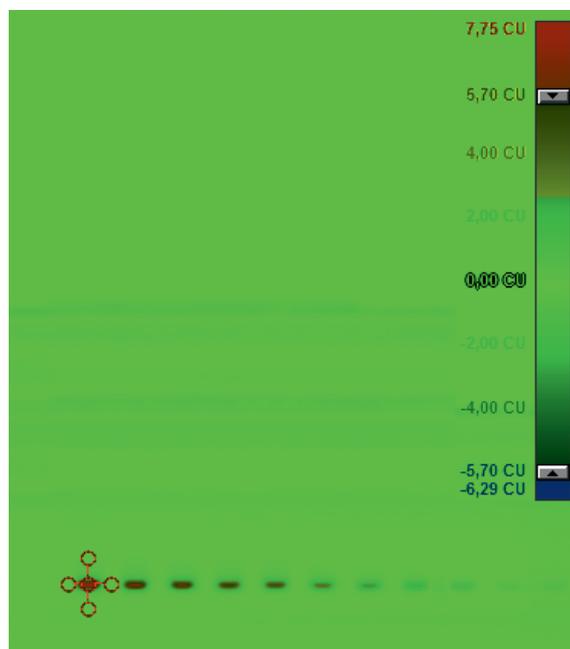


Fig. 7. Análisis realizado en la prueba “valla”. La imagen de la izquierda corresponde a la diferencia de dosis entre la imagen portal obtenida y la de referencia, donde se observan 11 láminas que contienen un error ε_g , ordenados de 0.8 a 0.1 mm. A la derecha se representan los perfiles de dosis a lo largo de la dirección de movimiento (X) de las dos imágenes, centrados en el extremo de la lámina que contiene el error de 0.8 mm.

mayores que la sensibilidad estimada para detectar errores de posición del MLC en las pruebas estáticas y en la prueba “valla” del dMLC. Como han indicado Yang et al.,⁹ el efecto que determina la capacidad de un detector no puntual para medir la posición de las láminas es la superficie relativa que queda cubierta por el MLC. En este sentido, Chang et al.⁷ han comprobado que la exactitud para medir el posicionamiento del dMLC en una prueba tipo “valla” no depende de la resolución de la digitalización de las películas radiográficas utilizadas (0.375 vs. 0.75 mm), y que es la misma exactitud (≈ 0.1 mm) que la obtenida con un modelo de EPID aS500 con un tamaño de píxel de 0.78 mm (como aS500-II). Estos resultados son compatibles con los de nuestro trabajo y justifican que la resolución de los EPID no es un factor limitante para detectar errores en la posición del MLC o del dMLC del orden de 0.1 mm. Además, estos resultados muestran que la sensibilidad de los sistemas de película es del mismo orden que la sensibilidad de las pruebas propuestas utilizando EPID. Por lo tanto, las pruebas presentadas basadas en sistemas EPID igualan los principales puntos fuertes de los sistemas de película, que son la resolución y que son sistemas 2D. Además, el sistema Portal Dosimetry simplifica el procesamiento y análisis de las imágenes con respecto a los sistemas de película permitiendo una implementación más eficiente de estas pruebas.

La sensibilidad de la prueba de velocidad del dMLC es superior a la propuesta inicial basada en películas radiográficas.⁵ Esta prueba permite detectar láminas cuyos motores presenten problemas de “fatiga”. En estos casos, las velocidades de las láminas son generalmente inferiores a las velocidades programadas, aunque la posición final o la posición en los puntos de control intermedios coincida con la posición programada.² Esta anomalía puede pasar inadvertida en otras pruebas y por la propia tolerancia del controlador del MLC.¹ Por otra parte, el modelo (2) puede generalizarse mediante un parámetro $0 < x < 1$ para contemplar cualquier posición del punto de medida $0 < xL < L$: $\Delta D = (x dL/v^2) \epsilon_v$. Con esta generalización, el valor de ΔD permite explotar toda la información 2D disponible, y evaluar variaciones locales de velocidad. Sin embargo, la dependencia lineal de ΔD con la posición del punto de medida añade una variable (y por tanto, una incertidumbre) innecesaria para determinar errores sistemáticos de velocidad. Por este motivo se ha optado por la versión más simplificada del modelo fijando el punto de medida, aunque no es una limitación.

La exactitud y la sensibilidad de la prueba “ventana deslizante” es compatible con la que ha obtenido Mei et al.⁶ utilizando el modelo de EPID aS1000. Además, la sensibilidad estimada para detectar errores en la separación entre pares de láminas del dMLC es similar a la que se puede obtener utilizando cámaras de ionización.^{1,6} Por lo tanto, y con respecto a los sistemas basa-

dos en cámaras de ionización, las pruebas descritas basadas en EPID presentan dos ventajas: la primera, que se controlan todas las láminas simultáneamente; y la segunda, que las láminas se controlan a lo largo de todo su recorrido y no solo en un punto.

Queremos destacar que la exactitud y la sensibilidad de las pruebas propuestas es del mismo orden que la que otros autores obtienen utilizando modelos con un gran número de parámetros ajustables,⁹ utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes propios,^{7,8} o una combinación de ambos,¹⁰ lo cual supone, además, una clara ventaja de la sistemática presentada. En nuestro centro se han implantado diariamente las pruebas descritas en los tres aceleradores lineales disponibles sin que supongan una carga de trabajo significativa. Las pruebas se programan como un tratamiento ordinario, no necesitan ninguna preparación por parte de los técnicos de la unidad, y su realización conlleva unos 2-3 minutos. El análisis de las imágenes da como resultado un mapa de diferencias dosimétricas como el presentado en la fig. 3(b) o la fig. 7(izquierda). En estos mapas, las discrepancias de posición se ponen de manifiesto como manchas rojas o azules (dependiendo del signo de la desviación) en el extremo de la lámina en cuestión. En las pruebas dinámicas, las láminas que presentan algún problema se manifiestan como una franja roja o azul a lo largo de su recorrido. Por lo tanto, el mapa de diferencias de dosis pone de manifiesto de forma visual las discrepancias con la misma sensibilidad que la estimada de forma cuantitativa. Portal Dosimetry permite identificar rápidamente las láminas que presentan algún problema (que a continuación se cuantifica), y evita tener que evaluar cuantitativamente las láminas que funcionan correctamente, lo que permite analizar todas las pruebas en unos 2-3 minutos. Una vez realizado el análisis, las imágenes portales quedan aprobadas y se registran los resultados en un histórico. La sensibilidad de las pruebas descritas y la periodicidad diaria con la que se han implementado, aporta confianza al uso de los MLC, especialmente en las técnicas de IMRT dinámicas.

Las pruebas propuestas se basan en detectar cambios entre las imágenes portales adquiridas y las imágenes de referencia. La falta de alineación mecánica del EPID no ha sido un aspecto a tener en cuenta en los resultados presentados dado que las imágenes de referencia y las modificadas con errores controlados se han irradiado consecutivamente. Sin embargo, la no reproducibilidad de la alineación mecánica del EPID es un factor que debe considerarse en rutina, dado que las variaciones en la alineación del EPID inducen un desplazamiento o una rotación sistemáticos en todas las pruebas.⁹ Estas variaciones pueden ser cuantificadas siguiendo el mismo procedimiento que para medir las desviaciones de las láminas individuales, es decir, midiendo el desplazamiento necesario para hacer

coincidir los perfiles de dosis en los límites definidos por las mandíbulas. En particular, el desplazamiento X e Y puede evaluarse utilizando los bordes que definen estas mandíbulas en las fig. 1(b) y fig. 1(d)(e) respectivamente. Debe verificarse que dicho desplazamiento sea consistente en todas las pruebas y que compense las desviaciones inducidas al extremo de las láminas por la falta de alineación del EPID, especialmente en las pruebas estáticas. Este procedimiento ha sido validado en todas las orientaciones de brazo utilizadas (0° , 90° , 180° y 270°) y permite detectar errores en la posición de las láminas con la misma sensibilidad que la determinada en este estudio (≥ 0.1 mm). En este sentido, Yang et al.⁹ sugieren que la precisión para detectar errores de posición del MLC es del orden de 0.1 mm si se corrigen las incertidumbres mecánicas del EPID, valor que concuerda con los resultados aquí presentados, y del orden de 0.3 mm si no se tienen en cuenta.

Paralelamente, las variaciones de la equivalencia de dosis absorbida por UM del acelerador, así como las variaciones de respuesta del EPID, producen una variación sistemática de las lecturas (CU) en las imágenes portales adquiridas con respecto a las imágenes de referencia. Estas variaciones no son críticas para evaluar las pruebas estáticas, dado que no influyen de forma significativa en la evaluación de los perfiles dosimétricos en la zona de alto gradiente (extremo de las láminas). Sin embargo, es necesario corregir estos efectos en las pruebas de velocidad y ventana deslizante mediante una renormalización de las imágenes. El valor de renormalización se obtiene de alguna de las pruebas estáticas, preferiblemente de la correspondiente a la fig. 1(a). Para ello, se comparan las lecturas (CU) de una ROI centrada en la imagen obtenida con el mismo valor de la imagen de referencia. Estas operaciones están totalmente integradas en el entorno de Portal Dosimetry, lo cual, según nuestra experiencia, permite corregir estas variaciones de forma eficiente.

Finalmente, describimos algunas limitaciones del presente estudio. En primer lugar, la superficie útil de los EPID, combinada con la distancia foco-detector utilizada, no permite visualizar los 3 pares de láminas de cada extremo del MLC. Sin embargo, estas láminas se utilizan muy poco en rutina, especialmente en técnicas de IMRT.² En segundo lugar, el método presentado es un método relativo. En efecto, un error en la calibración del MLC pasaría inadvertido si éste error estuviera presente en la adquisición de las imágenes portales de referencia.⁹ Es recomendable, por lo tanto, tomar las imágenes de referencia después de una calibración y verificación independiente del MLC (que de todas formas, es necesario realizar solo una vez). Y finalmente, la aplicación Portal Dosimetry no permite realizar un análisis cuantitativo de la prueba valla dado que las herramientas de que dispone no están diseñadas para este propósito.

Conclusiones

Se han descrito unas pruebas de control de calidad del MLC basadas en sistemas EPID y en una aplicación disponible comercialmente. Por lo tanto, este trabajo tiene una aplicabilidad directa para un gran número de usuarios.

Se ha propuesto un modelo que relaciona los errores de posición y/o velocidad del MLC con parámetros medibles sobre las imágenes portales obtenidas en cada prueba. La exactitud de los modelos permite realizar un control de calidad del MLC reproducible y fiable. La sensibilidad submilimétrica de las pruebas, tanto en modo estático como en modo dinámico, permite utilizar el MLC de forma segura en las técnicas de 3D-CRT e IMRT dinámica.

Las pruebas descritas no requieren un montaje, y el tiempo que conlleva su realización y análisis es de unos pocos minutos. La implantación diaria de estas pruebas es sencilla y no supone una carga de trabajo adicional significativa.

Bibliografía

1. LoSasso T, Chui C, Ling C. Physical and dosimetric aspects of a multileaf collimation system used in the dynamic mode for implementing intensity modulated radiotherapy. *Med Phys* 1998;25:1919-27.
2. LoSasso T, Chui C, Ling C. Comprehensive quality assurance for the delivery of intensity modulated radiotherapy with a multileaf collimator used in the dynamic mode. *Med Phys* 2001;28:2209-19.
3. Chauvet I, Petitfils A, Lehobey C, Kristner J, Brunet Y, Lembrez R, et al. The sliding slit test for dynamic IMRT: a useful tool for adjustment of MLC related parameters. *Phys Med Biol* 2005;50:563-80.
4. Van Esch A, Bohsung J, Sorvari P, Tenhunen M, Paiusko M, Iori M, et al. Acceptance tests and quality control (QC) procedures for the clinical implementation of intensity modulated radiotherapy (IMRT) using inverse planning and the sliding window technique: experience from five radiotherapy departments. *Radiother Oncol* 2002;65:53-70.
5. Chui C, Spirou S, LoSasso T. Testing of dynamic multileaf collimation. *Med Phys* 1996;23:635-41.
6. Mei X, Nygren I, Villarreal-Barajas J. On the use of the MLC dosimetric leaf gap as a quality control tool for accurate dynamic IMRT delivery. *Med Phys* 2011;38:2246-55.
7. Chang J, Obcemea C, Sillanpaa J, Mechalakos J, Burman C. Use of EPID for leaf position accuracy QA of dynamic multi-leaf collimator (DMLC) treatment. *Med Phys* 2004; 31:2091-96.
8. Vieira S, Dirks M, Pasma K, Heijmen B. Fast and accurate leaf verification for dynamic multileaf collimation using an electronic portal image device. *Med Phys* 2002;29:2034-40.
9. Yang Y, Xing L. Quantitative measurement of MLC leaf displacements using an electronic portal image device. *Phys Med Biol* 2004;49:1521-33.

10. Mamalui-Hunter M, Li H, Low D. MLC quality assurance using EPID: A fitting technique with subpixel precision. *Med Phys* 2008;35:2347-55.
11. Parent L, Seco J, Evans P, Dance D, Fielding A. Evaluation of two methods of predicting MLC leaf positions using EPID measurements. *Med Phys* 2006;33:3174-82.
12. Wasbø E, Valen H. Dosimetric discrepancies caused by differing MLC parameters for dynamic IMRT. *Phys Med Biol* 2008;53:405-15.