



Revisión de Artículos

Julia Garayoa Roca*

Comité de Redacción.

Estimados compañeros,

En esta nueva publicación de nuestra revista tomo el relevo a M^a Carmen Pujades en la coordinación de esta sección de Revisión de Artículos. Quisiera agradecer a M^a Carmen su implicación en estos últimos tiempos para presentarnos los artículos publicados por nuestros compañeros en revistas internacionales de todas las áreas de nuestra profesión. Aprovecho también para agradecerle la ayuda que me ha prestado para gestionar esta primera Revisión de Artículos, y le deseo éxito en su nuevo puesto como Editora de la revista.

En este número contamos con nueve reseñas de artículos publicados en revistas de prestigio internacional del ámbito de la física médica.

En la primera de las reseñas Javier Caravaca nos habla del diseño de un nuevo equipo de SPECT con detector en forma de anillo y especialmente ideado para poder adquirir de forma eficiente imágenes de emisores gamma de diferentes energías (^{99m}Tc y ¹⁷⁷Lu), sin necesidad de recurrir a los engorrosos cambios de colimador.

A continuación, contamos con diversas reseñas de artículos publicados en el campo de la Radioterapia. David Sánchez Artuñedo nos explica su trabajo en el que evaluaron cómo el *gamma passing rate* de las imágenes de tránsito obtenidas con el EPID en cada sesión de tratamiento se correlaciona con la cobertura del PTV en tratamientos de IMRT de mama.

Sergio Lozares nos presenta en su artículo publicado en *Physica Medica* un sistema de planificación de Radioterapia Intraoperatoria en cuyo desarrollo y comisionado han participado un variado grupo de profesionales de diversas disciplinas.

Jordi Sáez nos presenta los resultados de su trabajo en el que, gracias a la colaboración de más de 20 centros repartidos por todo el mundo, proponen un conjunto común de pruebas para evaluar diferentes modelos de MLC en diferentes sistemas de planificación.

En el hospital Ramón y Cajal de Madrid han tenido un verano prolífico en publicaciones que han tenido el detalle de compartir con nosotros. En primer lugar, Juan David García presenta el estudio donde han evaluado la viabilidad de sustituir la película radiocrómica por una matriz de diodos para realizar algunas de las pruebas de control de calidad de la unidad de tratamiento Cyberknife. Y en segundo lugar, David Sevillano nos cuenta su experiencia con el uso de un sistema de guía metálica más fino que la sonda Foley para la definición uretral en tratamientos de SBRT de próstata con Cyberknife.

Contamos también con un par de reseñas relacionadas con la terapia con protones. Por un lado Ramón Ortiz evalúa los potenciales beneficios de la radioterapia con minihaces de protones en comparación con la protonterapia estándar y la SBRT. Por otro lado, Elena Borderías nos adentra en el mundo de la planificación automática y nos cuenta su estudio sobre la robustez de los planes de tratamiento con protones que generan varios modelos de planificación automática basados en *machine-learning*.

Finalmente, en el ámbito de la Radiobiología, Alejandro Bertolet nos presenta su trabajo en el que, tras analizar los resultados de numerosos estudios de supervivencia clonogénica *in vitro*, plantean la necesidad de una mayor estandarización de los métodos empleados en este tipo de experimentos y dejan sobre la mesa una reflexión sobre el uso de estos datos experimentales para validar modelos de eficacia biológica relativa.

Me despido esperando que estas reseñas sean de vuestro interés y con mi más sincero agradecimiento a todos los autores que han contribuido a esta sección.

Un fuerte abrazo.

* Correspondencia
Email: garayoa.julia@gmail.com



Simulation studies of a full-ring, CZT SPECT system for whole-body imaging of ^{99m}Tc and ^{177}Lu

Huh Y, Caravaca J, Kim J, Cui Y, Huang Q, Gullberg G, Seo Y
Med Phys. 2023;50(6):3726-3737.

Javier Caravaca Rodríguez

Department of Radiology and Biomedical Imaging, University of California, San Francisco, California, USA.

javier.caravacarodriguez@ucsf.edu

<https://doi.org/10.1002/mp.16360>

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

El tratamiento del cáncer con radiofármacos de alta especificidad está ganando popularidad gracias a los excelentes resultados obtenidos en las últimas décadas. La radiación ionizante emitida por radioisótopos enlazados a marcadores biológicos daña el ADN de las células cancerosas directa o indirectamente, induciendo su muerte y la posibilidad de desacelerar la metástasis del cáncer o incluso de eliminarlo. Un radioisótopo aprobado para uso clínico en EE.UU. es el Lutecio-177 (^{177}Lu), que es el elemento activo de los radiofármacos LUTATHERA (cáncer neuroendocrínico) y PLUVICTO (cáncer de próstata). La detección, localización y monitorización de dichos radiofármacos en el cuerpo humano es extremadamente importante para evaluar la evolución del tratamiento o para determinar si el paciente necesita una nueva dosis u otro tratamiento diferente. La modalidad de imagen no-invasiva SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*) es capaz de tomar imágenes de ^{177}Lu , pero la calidad y resolución son muy bajas. Esto es debido a que los escáneres tienen una sensibilidad muy baja a altas energías. Además, el colimador, una pieza muy pesada del sistema, necesita ser reemplazado para cada energía. Así pues, la motivación de nuestro estudio es la de proponer un colimador y un diseño de escáner que permita la imagen de radioisótopos de diferentes energías de manera más rápida y eficiente, sin tener que físicamente cambiar el colimador.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades para realizar el trabajo?

El principal reto es el de obtener un diseño de escáner que permita la imagen de isótopos de energías más altas (como ^{177}Lu), sin que esto afecte la eficiencia y la calidad de la imagen para rayos gamma de baja energía, como ^{99m}Tc , muy popular en SPECT. Los elementos más importantes en los que se apoya este trabajo son un diseño propio de un colimador de tungsteno de alta sensibilidad y alta resolución de imagen, y el de un nuevo concepto de escáner estático con mayor área activa que se balancea mínimamente para cubrir más campo de visión. Con el propósito de obtener simulaciones lo más realistas posibles, implementamos un modelo del material del detector (CZT) que tiene en cuenta la eficiencia, la resolución en energía y la dependencia de ésta con la posición de la interacción del rayo gamma. También consideramos efectos como la atenuación de los rayos gamma en el paciente, o correcciones debidas a el movimiento atípico del escáner. Todos estos elementos se estudiaron para las dos energías relevantes: 140 keV para ^{99m}Tc y 208 keV para ^{177}Lu .

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

La conclusión es que un escáner como el propuesto puede obtener imágenes de ^{99m}Tc y ^{177}Lu con una resolución de 7.9 mm y 9.5 mm respectivamente en solo tres minutos. La sensibilidad de nuestro diseño es de aproximadamente el doble que las publicadas para otros escáneres de SPECT, lo que quiere decir que la exposición se podría reducir considerablemente sin afectar la calidad de la imagen. Nuestros resultados están en línea con estudios más recientes que caracterizan escáneres SPECT de última generación que implementan una tecnología de escáner estático parecida.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Trabajos como estos son importantes para demostrar que la obtención de imágenes cuantitativas de radioisótopos que emiten a más alta energía, como ^{177}Lu , es posible, lo que permite una evaluación de la evolución del tratamiento oncológico y una terapia con radiofármacos más personalizada para cada paciente.



Gamma passing rates of daily EPID transit images correlate to PTV coverage for breast cancer IMRT treatment plans

Sánchez-Artuñedo D, Reyes López V, Granado Carrasco R, Beltran-Vilagrasa M, Duch-Guillen MA, Hermida-López M
J Appl Clin Med Phys. 2023;24:e13913.

David Sánchez Artuñedo

Servei de Física i Protecció Radiològica, Hospital Universitari Vall d'Hebron, Barcelona.
david.sanchezartunedo@vallhebron.cat
<https://doi.org/10.1002/acm2.13913>

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

La dosimetría in-vivo es una herramienta de garantía de calidad y seguridad en radioterapia que permite la detección de desviaciones dosimétricas durante la administración del tratamiento de radioterapia.¹ Inicialmente, la técnica de dosimetría in-vivo más extendida consistía en la colocación de detectores puntuales en la superficie del paciente. Sin embargo, este método requiere un gran consumo de tiempo en la unidad de tratamiento² y las incertidumbres asociadas al posicionamiento y la respuesta del detector a las variaciones de la tasa de dosis reducen su utilidad en los tratamientos con técnicas moduladas.³ La dosimetría de tránsito permite superar estas limitaciones, lo que ha producido que su uso se esté extendiendo.^{2, 4, 5} La dosimetría de tránsito se basa en el uso de las imágenes de tránsito formadas por la radiación que alcanza el dispositivo de imagen portal, después de atravesar al paciente durante la irradiación de un campo de tratamiento.

Este estudio se centra en las imágenes de tránsito obtenidas durante el tratamiento de pacientes de cáncer de mama tratadas en un acelerador Halcyon (Varian Medical Systems). Se escogió esta localización tanto por ser uno de los cánceres más frecuentes,⁶ como porque hay múltiples causas que pueden llevar a una desviación entre la dosis administrada y la planificada: diferencias en el posicionamiento, cambios anatómicos en el volumen objetivo, etc... Las imágenes de tránsito obtenidas en cada sesión de tratamiento se pueden usar de dos maneras: 1) comparadas con una imagen de referencia obtenidas en las sesiones anteriores o 2) comparadas con una imagen de tránsito predicha calculada a partir del plan de tratamiento y del TC de planificación. Idealmente la opción 2 permite hacer una verdadera dosimetría de tránsito, ya que solo con esa metodología se podría detectar desviaciones sistemáticas que afecten a todas las sesiones de tratamiento. Desafortunadamente en el momento del estudio no había ningún software comercial con un modelo implementado en Halcyon. Por lo tanto, los usuarios de Halcyon solamente pueden usar las imágenes de tránsito obtenidas siguiendo la metodología 1, siendo la práctica habitual usar la imagen de la primera sesión como imagen de referencia.

A pesar de la literatura, no está claro que las diferencias observadas en las imágenes de tránsito impliquen una pérdida de cobertura del volumen objetivo (PTV). Además tampoco está claro hasta qué punto es válido usar una imagen de referencia como sustituto de una verdadera dosimetría de tránsito. Por lo tanto la motivación de este estudio fue doble: 1) estudiar la correlación entre parámetros dosimétricos del PTV y el análisis gamma de las imágenes de tránsito y 2) evaluar si es apropiado el uso de imágenes de tránsito en planes de tratamiento de cáncer de mama.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades para realizar el trabajo?

La mayor dificultad del trabajo vino del elevado número de sesiones de tratamiento que se analizaron, un total de trescientas. Hicieron falta varios meses para calcular el plan de tratamiento sobre cada uno de los cone beam CT (CBCT) de verificación pre-tratamiento, analizar las imágenes de tránsito y realizar el análisis estadístico. Una vez obtenidos los resultados de la comparación gamma de las imágenes de tránsito de cada sesión, conjuntamente con médicos del servicio de oncología radioterápica del hospital, se analizaron las sesiones con resultados fuera de la tolerancia preestablecida. En este caso la dificultad fue el análisis visual de las diferencias en las imágenes de tránsito y buscar la causa de las diferencias: posicionamiento subóptimo, cambios anatómicos...

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

El trabajo presenta información sobre la pérdida de cobertura en PTV en función del *passing rate* de las imágenes de tránsito. Los resultados obtenidos variaron entre pacientes, ya que las diferencias en la dosis administrada no depende solamente de la anatomía o el posicionamiento sino de otros factores como la robustez del plan.⁷ Sin embargo, se presentan valores promedio que pueden ayudar a valorar el impacto dosimétrico del análisis de una imagen de tránsito.

Además, en la mayoría de pacientes que presentaban sesiones con resultados en la comparación de las imágenes de tránsito fuera de tolerancia, se obtuvieron correlaciones fuertes entre el *passing rate* de las imágenes de tránsito y la pérdida de cobertura del PTV. Respecto a los órganos de riesgo, los resultados no fueron tan homogéneos, presentándose sesiones tanto con sobredosificación como con infradosificación del pulmón ipsilateral.

Al evaluar si es apropiado usar la primera sesión como imagen de referencia se constató que había sesiones con desviaciones en el tratamiento que no se detectaban al usar esta metodología. Además, se observó que no siempre la primera sesión era la sesión que se administraba de una manera más similar al plan de tratamiento.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Idealmente las imágenes de tránsito se deberían comparar con una imagen de tránsito de referencia calculada a partir del plan de tratamiento y el TC. Desgraciadamente no siempre es posible, bien sea por limitaciones de desarrollo, como en el caso de Halcyon, o bien porque los centros no dispongan de softwares especializados. Por ello, este trabajo puede ser de utilidad para aquellos usuarios que usen las imágenes de tránsito comparándolas con una imagen de referencia.

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ayudar a la implementación clínica del uso de las imágenes de tránsito y a la toma de decisiones ante una sesión con un resultado fuera de tolerancia. Los valores promedios de la pérdida de cobertura del PTV en función del *passing rate* de las imágenes de tránsito sirven para evaluar el impacto dosimétrico. Además, los ejemplos descritos del impacto en las imágenes de tránsito de una diferencia en el posicionamiento o un cambio anatómico pueden ayudar a valorar la causa de las diferencias obtenidas.

1. Mijnheer B, Beddar S, Izewska J, Reft C. In vivo dosimetry in external beam radiotherapy. 2013; 40(7): 1–19.
2. Olaciregui-Ruiz I, Beddar S, Greer P, et al. In vivo dosimetry in external beam photon radiotherapy: Requirements and future directions for research, development, and clinical practice. *Phys Imaging Radiat Oncol* 2020; 15(March): 108–116.
3. Tariq M, Gomez C, Riegel AC. Dosimetric impact of placement errors in optically stimulated luminescent in vivo dosimetry in radiotherapy. *Phys Imaging Radiat Oncol* 2019; 11(April): 63–68.
4. Esposito M, Ianiro A. Improving dose delivery accuracy with EPID in vivo dosimetry : results from a multicenter study. *Strahlenther Onkol* 2021; 179(7): 633–643.
5. Stevens SW, Moloney S, Bangiri A, et al. IPEM topical report: Results of a 2020 UK survey on the use of online treatment monitoring solutions for IMRT/VMAT. *Phys Med Biol* 2021; 66(22).
6. Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA Cancer J Clin* 2021; 71(3): 209–249.
7. Hernandez V, Rønn C, Widesott L, et al. What is plan quality in radiotherapy ? The importance of evaluating dose metrics , complexity , and robustness of treatment plans. *Radiother Oncol* 2020; 153: 26–33.



An open-source development based on photogrammetry for a real-time IORT treatment planning system

Lozares-Cordero S, Bermejo-Barbanoj C, Badías-Herbera A, Ibáñez-Carreras R, Ligorred-Padilla L, Ponce-Ortega JM, González-Pérez V, Gandía-Martínez A, Font-Gómez JA, Blas-Borroy O, González-Ibáñez D
Phys Med. 2023;112:102622.

Sergio Lozares

Servicio de Física y Protección Radiológica, Hospital Universitario Miguel Servet, Zaragoza.
slozares@salud.aragon.es
<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102622>

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

Disponemos del sistema Axxent (Xoft Inc.) para realizar tratamientos de IORT desde 2015. Lo hemos utilizado principalmente en casos de cáncer de mama (unas 1000 pacientes) y cáncer de endometrio (braquiterapia electrónica, con más de 400). En 2019 comenzamos a tratar casos de sarcomas y surgió la posibilidad de realizar una colaboración con la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Zaragoza, para que un alumno, Carlos Bermejo, hiciera su trabajo de fin de máster con nosotros.

Todo arrancó a raíz de un reencuentro con un amigo de la época universitaria que estudió Matemáticas, David González, actualmente catedrático en dicha escuela. Nos juntamos para ver si se nos ocurría algún proyecto de colaboración, y lo que comenzó con una impresión de lechos quirúrgicos en 3D, acabó con un sistema de planificación para IORT.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades para realizar el trabajo?

Nos repartimos el trabajo adecuando las principales características de cada uno, así que las dificultades fueron distintas para cada colaborador. En la parte de la dosimetría de película, siempre compleja, pudimos aprovechar la experiencia de un trabajo anterior que nos publicaron también en Physica Medica, comentado en esta sección hace un par de años.

La parte de la programación fue realizada por los ingenieros, ahí comenzaron con cálculos más sencillos de dosis absorbida para acabar implementando el TG-43 en el propio sistema de planificación.

También aparecen algunos autores médicos, necesarios para que nos dejaran captar las imágenes del paciente, con el correspondiente certificado ético, y que valoraron las imágenes obtenidas y la utilidad desde un punto de vista más clínico.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

Ahora disponemos (aún sin marcado CE) de una herramienta para poder evaluar la distribución de dosis absorbida en un lecho quirúrgico. Existen, en ocasiones, zonas especialmente sensibles que ahora pueden ser identificadas y evitadas de una manera más eficiente.

Además, todo con herramientas como una Tablet o un Smartphone, disponibles para todos. Lo ideal en estos casos es tener imágenes DICOM del lecho quirúrgico con un TC intraoperatorio o un C-arm en quirófano, una herramienta muy útil, pero hasta que eso llegue a una comunidad como Aragón, podremos utilizar nuestra aplicación.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

De momento las repercusiones se ciñen a nuestro propio hospital, aún no podemos distribuir el programa, pero mientras, seguimos intentando evolucionarlo, como los pokémon. Las siguientes versiones esperamos que dispongan de la posibilidad de contar con imágenes DICOM previas del paciente, así como un algoritmo de cálculo más preciso.

Lo que aún no tenemos es nombre, así que, si a algún lector se le ocurre uno bueno y divertido, que no dude en escribirme.



Universal evaluation of MLC models in treatment planning systems based on a common set of dynamic tests

Saez J, Bar-Deroma R, Bogaert E, Cayez R, Chow T, Clark CH, Esposito M, Feygelman V, Monti AF, Garcia-Miguel J, Gershkevitch E, Goossens J, Herrero C, Hussein M, Khamphan C, Kierkels RGJ, Lechner W, Lemire M, Nevelsky A, Nguyen D, Paganini L, Pasler M, Pérez Azorín JF, Ramos Garcia LI, Russo S, Shakeshaft J, Vieilleigne L, Hernandez V
Radiother Oncol. 2023;186:109775.

Jordi Sáez

Servicio de Oncología Radioterápica, Hospital Clínic de Barcelona, Barcelona.
jordi.saez@gmail.com
<https://doi.org/10.1016/j.radonc.2023.109775>

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

Este trabajo es una consecuencia de múltiples discusiones que Víctor Hernández y yo mismo hemos mantenido a lo largo de los años. En 2017 publicamos un artículo (*Phys. Med. Biol.* 62, 2017, 6688–6707) donde introducíamos unos tests dinámicos para el colimador multi-láminas (MLC) que nos permitían conocer con mucho detalle las características de la extensión lateral de las láminas del MLC (el denominado *tongue-and-groove*) a través de medidas con una cámara Farmer. En aquel artículo, a pesar de mostrar resultados solo para el sistema de planificación y cálculo (SPC) Eclipse (Varian Medical Systems), ya hacíamos un guiño a que el procedimiento era aplicable a cualquier SPC. Como continuación natural de aquel trabajo nos propusimos aplicar el método a otros SPC, como publicamos para RayStation (RaySearch Labs) unos años más tarde (*Phys. Med. Biol.* 65, 2020, 155006). Sin embargo, desde 2017 ya estábamos trabajando para aplicar nuestros conocimientos a otros MLCs y a otros SPCs. Así este trabajo lo iniciamos en 2017 con el desafío de incluir el mayor número de MLCs y de SPCs y demostrar así que una evaluación válida para cualquier MLC-SPC es posible.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades para realizar el trabajo?

Para completar con éxito este trabajo contamos con la colaboración de más de 20 centros repartidos por todo el mundo. Con un número tan grande de físicos implicados avanzar en el proyecto era complicado. Sin embargo, solo podemos estar agradecidos a todos por la paciencia y disponibilidad mostradas. Desde un punto de vista puramente técnico, la principal dificultad fue trabajar con sistemas de planificación que no conocíamos y a los que no teníamos acceso directo. La importación de objetos DICOM modificados en Mónaco (Elekta) fue la que intentamos primero y conseguirlo nos llevó varios meses de pruebas ensayo-error. En el caso de Pinnacle (Philips) fue necesario recurrir a su lenguaje de *scripting* propietario. Afortunadamente, incorporamos a Luis Isaac Ramos, gran experto en este SPC que nos allanó el camino. Cabe destacar que las medidas experimentales no entrañaban dificultad de ningún tipo para ninguno de los centros participantes.

Pero sin duda, quizás la mayor dificultad fue la redacción de un artículo que no profundizara en la parte más técnica del trabajo para conseguir una visión más generalista y agnóstica del problema de evaluación del MLC en los SPC. ¡Al final conseguimos escribir el artículo sin ninguna ecuación!

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

Uno de los resultados más importantes de este trabajo es que mostramos que es posible utilizar exactamente las mismas pruebas en diferentes modelos de colimadores multi-láminas (MLC) y diferentes sistemas de planificación y cálculo (SPC). ¡Evaluamos 16 combinaciones diferentes! El título del artículo intenta transmitir que el procedimiento que se describe se puede aplicar en cualquier caso. La cantidad y variedad de sistemas evaluados nos permitió extraer varias consideraciones, tanto a nivel experimental como de modelado del MLC en los SPC.

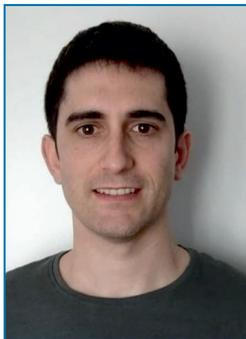
Por un lado, los resultados experimentales demuestran que existe poca variabilidad en las características dosimétricas del MLC para cada modelo: Millennium, HD120, Halcyon, Agility y MLCi2. Los valores de la transmisión promedio, así como la reducción de dosis debida al *tongue-and-groove*, son prácticamente idénticos en cada modelo. Solo observamos diferencias en los valores de *offset*, que se deben fundamentalmente a diferencias en la calibración del posicionamiento del MLC. Pero incluso para el *offset*, las diferencias en algunos modelos

son mínimas (Halcyon, Agility). Estos resultados contrastan con los obtenidos para los sistemas de planificación evaluados, que muestran una variabilidad mucho mayor, especialmente para Agility y HD120.

En nuestra opinión, es una muestra clara de las dificultades que los físicos encontramos para determinar de manera fiable algunos parámetros para el modelado del MLC al no disponer, hasta ahora, de pruebas suficientemente sencillas y sensibles. Y toda esta información la obtuvimos utilizando un detector que está disponible en cualquier departamento de física médica: ¡la cámara Farmer!

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Creemos que este trabajo es una invitación a la reflexión para los físicos médicos, sociedades científicas y grupos de auditorías de radioterapia. La consecuencia con el primer grupo, los físicos médicos a nivel individual, es que estos tests pueden ayudar a configurar el MLC y a comprender las limitaciones existentes en el modelo del SPC. Por otro lado, las recomendaciones recogidas en las guías de las sociedades científicas para el comisionado del MLC en los sistemas de planificación son actualmente muy inespecíficas. Nosotros hemos demostrado que es posible utilizar un mismo conjunto de pruebas directamente relacionado con las dosis promedio calculadas por los sistemas de planificación que aporta información muy detallada respecto al modelado del MLC. Por ello, creemos que este procedimiento, basado en medidas con una cámara Farmer y dosis promedio calculadas en el SPC, debería ser una herramienta clave para la configuración del MLC en los SPC. Finalmente, el procedimiento estándar para las auditorías de las técnicas de radioterapia de intensidad modulada es la realización de una prueba de principio a fin (E2E: *end to end*) habitualmente con un maniquí antropomórfico. Cuando el resultado de esta prueba es insatisfactorio no es posible determinar en qué etapa del proceso se produce el error. Sin embargo, los trabajos de IROC-MD Anderson apuntan a errores de modelado del haz, y concretamente del MLC, en el sistema de planificación como causa para la mayoría de centros que fallan. Nuestro trabajo demuestra que es posible obtener una información detallada del modelado del MLC de forma remota y sencilla por lo que el método que utilizamos podría constituir una herramienta complementaria en las auditorías E2E. Además, las auditorías E2E aportan información relativa al éxito o fallo de un único plan que puede no ser representativo de la práctica clínica habitual. Con la evaluación directa del MLC se dispondría de la información necesaria para valorar el impacto del modelado del MLC en cualquier plan.



Evaluation of a high resolution diode array for CyberKnife quality assurance

García-Fuentes JD, Sevillano D, Colmenares R, Capuz AB, Morís R, Cámara M, Galiano P, Williamson S, Béjar MJ, Prieto D, García-Vicente F
J Appl Clin Med Phys. 2023;24(9):e14053.

Juan David García Fuentes

Servicio de Radiofísica, Hospital Universitario Ramón y Cajal, IRyCIS, Madrid.
juandavidgarciafuentes@gmail.com
<https://doi.org/10.1002/acm2.14053>

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

El trabajo parte de la necesidad de realizar pruebas de control de calidad en la unidad de tratamiento CyberKnife (Accuray, Sunnyvale, California, USA). Todos los protocolos y guías internacionales aluden a la placa radiocrómica como medio de verificación para la mayoría de pruebas. Sin embargo, el empleo de radiocrómicas conlleva una serie de dificultades relacionadas con su manipulación, irradiación y escaneo, entre otros. El postprocesado de las placas aumenta la duración de las pruebas y el incorrecto proceder puede conducir a resultados inesperados que no reflejan fielmente el estado de la unidad de tratamiento.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades para realizar el trabajo?

Hasta poco antes de este estudio, las matrices de alta resolución eran una buena herramienta para la verificación de tratamientos, pero ningún sistema comercial ofrecía la posibilidad de realizar control de calidad en CyberKnife mediante una matriz de detectores. Con su actualización a la versión 8.5.1, la matriz SRS MapCheck (Sun Nuclear, Florida, USA) se postula como una sustituta de la película radiocrómica para tres pruebas concretas del programa de control de calidad.

El principal reto fue garantizar que los resultados de la matriz son equivalentes a los de la placa radiocrómica, así como determinar si la matriz es tan sensible a los cambios en comparación con el procedimiento estándar utilizando la película radiocrómica.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

Hemos determinado que en dos de las tres pruebas sugeridas la matriz detectora obtiene resultados comparables a la película radiocrómica. Además, es capaz de detectar cambios en las características del haz de una forma fiable, reproduciendo los errores introducidos de manera controlada. A estos resultados hay que añadir una mayor reproducibilidad de los resultados e independencia del operador que realiza la prueba, aspectos en los que mejora ampliamente a la película radiocrómica.

Para la tercera de las pruebas el procedimiento con la matriz es más complejo y los resultados no tienen la fiabilidad suficiente como para considerar un cambio en el procedimiento actual.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Estos resultados nos han dado la confianza necesaria para sustituir la película radiocrómica con la matriz de detectores para las dos pruebas mencionadas.

Con los nuevos procedimientos hemos ganado en tiempo, reproducibilidad de los resultados y simplicidad del método. Además, hemos logrado independencia de los resultados con respecto al operador que realiza las pruebas, al mismo tiempo que mantenemos la fiabilidad que la placa radiocrómica proporcionaba.



The use of a thin guide-wire for urethral definition in prostate SBRT treatments with Cyberknife

Sevillano D, Hervás A, García-Fuentes JD, Vallejo C, López F, Colmenares R, Capuz AB, Morís R, Cámara M, Galiano P, Williamson S, Chillida R, Béjar MJ, Prieto D, García-Vicente F

J Appl Clin Med Phys. 2023;24(8):e14006.

David Sevillano

Servicio de Radiofísica, Hospital Universitario Ramón y Cajal, IRYCIS, Madrid.

dsevillano@gmail.com

<https://doi.org/10.1002/acm2.14006>

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

Con la implementación de la SBRT de próstata con Cyberknife en el servicio se planteó la necesidad de buscar métodos para contornear la uretra. A su vez, se quería evitar cualquier procedimiento intervencionista durante el tratamiento, aunque este fuese imprescindible en la realización del TC de planificación. Es sabido que la sonda vesical convencional (sonda Foley) puede modificar la posición interna de la próstata, y esto no debería afectar al contorneado de la uretra si somos capaces de visualizar la próstata durante el tratamiento. Sin embargo, hay trabajos en los que se relata la modificación de la posición interna de la uretra con respecto a la próstata al utilizar este procedimiento (Dekura et al Radiat Oncol. 2019;14(1):226. doi:10.1186/s13014-019-1424-8). Se puede considerar que, cuanto menor sea el grosor del catéter utilizado, más realista será la posición de la uretra con respecto a la próstata.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades para realizar el trabajo?

Para modificar el sistema de sondaje, y emplear un sistema de guía metálica más fino que la sonda Foley, se contactó con el Servicio de Urología del hospital, que se encargó de formar al personal de enfermería en la utilización del nuevo sistema. Una vez implementada su utilización, a cada paciente se le realizaron dos TCs, uno con un catéter convencional y con la guía en su interior (este TC se realizaba para comprobar la correcta colocación de la sonda), y un segundo TC en el que se había retirado la sonda convencional, quedando solo la guía metálica, y que era el que se utilizaba para la planificación.

Fusionando ambos TCs a partir de las fiduciales de la próstata, se contornearon en todos los pacientes ambas uretras. Ambos contornos se exportaron a un programa propio para calcular las desviaciones existentes entre ellos en sectores concretos de la próstata, para poder hacer un estudio poblacional de estas desviaciones.

Para comprobar si el uso del nuevo sistema ofrecía ventajas en cuanto a la colocación de la próstata dentro de los parámetros geométricos permitidos por el equipo Cyberknife para realizar el tratamiento, se obtuvieron datos de las posiciones de la próstata, coordenadas de la mesa, interrupciones de tratamiento, etc.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

Se obtuvieron márgenes para supuestos PRVs que cubriesen el 90% de los pacientes en caso de realizar el sondaje al paciente con un catéter convencional. Se observaron márgenes de hasta 2 cm en la zona más próxima a la vejiga, lo que hace inviable esta aproximación.

En cuanto a los datos obtenidos durante el tratamiento, al comparar la población inicial de pacientes tratados utilizando la sonda Foley y aquellos posteriores con la guía metálica, no se obtuvieron diferencias significativas ni en las interrupciones de tratamiento debidas a posicionamientos de la próstata fuera de tolerancias, o al número de imágenes utilizados para posicionar al paciente antes del tratamiento. Sí se encontró que, en aquellos pacientes con guía metálica, desaparecían los errores sistemáticos en la rotación de pitch de la próstata, sugiriendo que el sistema de guía metálica permite una visualización de la posición de la uretra más realista que la sonda Foley.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

El estudio presenta un potencial problema en aquellas técnicas que requieran el sondaje de la uretra y en las que esta situación no continúe durante la irradiación, la técnica más susceptible de verse afectada sería la braquiterapia prostática de baja tasa. Según nuestros datos, las dosis observadas en la uretra podrían verse seriamente modificadas al terminar el tratamiento. Otra técnica que podría verse afectada es la realización de boost concomitantes en nódulos visibles en próstata en los que la dosis en uretra es un factor limitante y en los que el alto número de sesiones dificultaría el sondaje diario del paciente.



Proton minibeam radiation therapy for treating metastases: A treatment plan study

Ortiz R, Belshi R, De Marzi L, Prezado Y
Med Phys. 2023;50(4):2463-2473.

Ramon Ortiz

University of California San Francisco, Department of Radiation Oncology, CA, USA.
ramon.ortizcatalan@ucsf.edu
<https://doi.org/10.1002/mp.16203>

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

La radioterapia por mini-haces de protones, o *proton minibeam radiation therapy* (pMBRT) es una innovadora técnica de radioterapia que utiliza haces de protones submilimétricos (entre 0.4 y 1.0 mm) separados por varios milímetros (entre 2 y 4 mm). Las distribuciones de dosis en pMBRT se caracterizan por regiones de alta dosis (dosis pico) intercaladas por áreas de baja dosis (dosis valle). En estudios preclínicos, esta técnica ha

demostrado una significativa reducción del daño al tejido sano (piel y tejido cerebral, principalmente) a corto y largo plazo, así como un control tumoral equivalente o superior, en comparación a la protonterapia estándar. Estos resultados promueven el planteamiento de los primeros ensayos clínicos con esta técnica. Este estudio pretende contribuir a la preparación de estos ensayos clínicos evaluando los potenciales beneficios de pMBRT para tratar metástasis cerebrales, en pulmón y en hígado a partir de la comparación de distribuciones de dosis en pMBRT, protonterapia estándar y radioterapia estereotáctica (principal opción radioterapéutica actualmente para este tipo de lesiones).

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades para realizar el trabajo?

Aunque varios de los potenciales mecanismos radiobiológicos responsables de los beneficios de pMBRT han sido identificados, éstos aún no han sido modelados por completo ni las dosis de tolerancia de los tejidos sanos han sido determinadas. Para este estudio, poder predecir cuáles serían los efectos nocivos de la radiación en órganos de riesgo es imprescindible. Para ello, se adoptó una metodología basada en la premisa de que el daño en tejidos sanos está principalmente determinado por las dosis valle, como se sugiere en estudios preclínicos con haces micrométricos separados espacialmente. Estas dosis valle fueron convertidas a la dosis total normalizada a fracciones de 2 Gy para compararlas con dosis de tolerancia establecidas para la práctica clínica.

En el aspecto técnico, la optimización de los planes de tratamiento con pMBRT y el posterior cálculo de dosis no es posible aún con los softwares de planificación utilizados en la clínica. Las principales razones son que los modelos físicos y resolución en el cálculo de la dosis no son adecuados para resolver las interacciones y dimensiones de los mini-haces de protones. En este estudio se combinó el proceso de optimización de los planes de tratamiento utilizando un software de planificación clínico (ECLIPSE) con el cálculo de dosis de esos planes a partir de un software Monte Carlo (TOPAS). La simulación Monte Carlo fue parametrizada para incluir un colimador de mini-haces y los parámetros de los modelos físicos adecuados para simular el depósito de dosis.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

Los planes de tratamiento con pMBRT resultaron en una cobertura del volumen tumoral equivalente a los planes de protonterapia convencional y radioterapia estereotáctica. Este resultado fue obtenido utilizando planes pMBRT de uno o dos campos de radiación y una sola fracción (como los usados en estudios preclínicos), estrategia que es raramente posible con técnicas convencionales debido a la excesiva toxicidad inducida a tejidos sanos. En cambio, en pMBRT, la dosis valle se mantuvo por debajo de las dosis de tolerancia de los órganos de riesgo. Además, la dosis media en estos órganos disminuyó en comparación a los planes estereotácticos. La reducción de los campos de radiación y fracciones con respecto a otras técnicas supone varias ventajas técnicas y radiobiológicas como por ejemplo la reducción de tiempo del tratamiento y prevenir incertidumbres de posicionamiento entre fracciones, así como reducir el volumen de tejido sano expuesto a un baño de bajas dosis.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Los resultados de este estudio pretenden guiar y promover las discusiones sobre la preparación de los ensayos clínicos con pMBRT. Por una parte, el estudio sugiere que pMBRT podría llevar a un aumento en el índice terapéutico en el tratamiento de metástasis. Además, subraya dos de los aspectos a abordar para la adaptación de las prácticas clínicas actuales a las singularidades de pMBRT y propone metodologías para avanzar en estos ámbitos.



Machine learning-based automatic proton therapy planning: Impact of post-processing and dose-mimicking in plan robustness

Borderías-Villarroel E, Huet Dastarac M, Barragán-Montero AM, Helander R, Holmstrom M, Geets X, Sterpin E
Med Phys. 2023;50(7):4480-4490.

Elena Borderías Villarroel

UCLouvain, Institut de recherche expérimentale et clinique, Molecular Imaging and Radiation Oncology Laboratory, Brussels, Belgium.
elena.borderias@uclouvain.be
<https://doi.org/10.1002/mp.16408>

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

En nuestro grupo de investigación, el laboratorio MIRO basado en Bruselas y que pertenece a la UCLouvain, varias de mis compañeras han trabajado en la creación de redes neuronales profundas (deep neural networks (DNN)) para la predicción de dosis. La principal motivación de este estudio fue intentar que los avances en estos modelos de predicción de dosis con inteligencia artificial se tradujeran en planes de protones clínicos generados de forma automática.

Las DNN son entrenadas en bases de datos de dosis clínicas para aprender la correspondencia entre una anatomía dada y la dosis clínica recibida. En otras palabras, estas DNN, reciben como *input* el CT del paciente con los contornos delineados y “aprenden” a dar como *output* correspondiente la distribución de dosis clínica para ese paciente. Sin embargo, una vez tenemos una dosis predicha por una DNN, ésta no puede utilizarse directamente. Tras la predicción de dosis, se obtiene la distribución de dosis que debería recibir el paciente en cada voxel del CT pero no sabemos cómo suministrar esa dosis ya que la información del plan es inexistente. Por ello, para alcanzar una automatización completa en la planificación del tratamiento, es necesario añadir una etapa de optimización que pueda proporcionar la información del plan de tratamiento. A este proceso de optimización que tiene como objetivo encontrar el plan capaz de suministrar una dosis similar a la dosis predicha se le conoce como dose-mimicking.

En el caso de la protonterapia, cuyas distribuciones de dosis son especialmente sensibles a los cambios de densidad en el paciente y a los errores de reposicionamiento debido al rango finito del protón, conviene que esta optimización (dose-mimicking) se realice de manera robusta. La dosis resultante de la optimización robusta (que incluye errores de *setup* y *range*) debe ser además evaluada para asegurar que el plan resultante es efectivamente robusto a los errores simulados durante el proceso de optimización. Además, un paso intermedio de post-processing (tras la predicción de dosis y previamente al dose-mimicking) puede aplicarse sobre la dosis predicha para facilitar que la dosis resultante de este proceso de planificación automático se ajuste a los objetivos clínicos.

La motivación de nuestro estudio fue estudiar la calidad y el valor clínico de estos planes de protones generados de manera automática. Por un lado queríamos conocer cuál era el impacto de aplicar el proceso post-processing, o no aplicarlo, y por otro lado, como la combinación del post-processing (o no) con dos algoritmos distintos de dose-mimicking afectaba la robustez de los planes de protones.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades para realizar el trabajo?

Uno de los mayores retos fue la integración total del proceso de automatización del tratamiento en el TPS (RayStation). Aunque este TPS tiene una interface de scripting bastante potente que permite automatizar muchos procesos no es siempre sencilla la integración. Otro reto fue encontrar los parámetros adecuados del dose-mimicking. Realizamos muchas iteraciones hasta dar con parámetros que proporcionaban planes que cumplían nuestros objetivos clínicos para la mayoría de los pacientes. Finalmente, otra de las dificultades fue el análisis de los datos ya que teníamos que ver si la calidad subóptima del plan (o su mejora respecto del plan manual) tenía su origen en la predicción de la dosis, en la aplicación del post-processing o en el propio dose-mimicking.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

Los cuatro métodos de planificación automática generaron distribuciones de dosis que cumplieran con los objetivos clínicos. En muchos casos, incluso lograron reducir la dosis a los órganos de riesgo (OARs) en comparación con las dosis clínicas planificadas manualmente, especialmente al aplicar el post-processing. El potencial de reducción de la dosis en los OARs en pacientes con cáncer de cabeza y cuello es especialmente importante para disminuir los efectos secundarios, en particular la xerostomía y la disfagia, que tienen un gran impacto en la calidad de vida.

Desafortunadamente, esta mejora dosimétrica en los OARs debida al post-processing tuvo como consecuencia en algunos casos la pérdida de robustez de la dosis respecto a posibles errores en el tratamiento (*setup* y *range*). La pérdida de robustez se tradujo en estos casos en una pérdida de cobertura en el CTV en algunos de los escenarios evaluados. Además, también se demostró la superioridad del algoritmo de dose-mimicking basado en optimización voxel-wise respecto del otro dose-mimicking que utilizaba objetivos sobre volúmenes de isodosis durante la optimización.

Finalmente, este estudio demuestra que las dosis generadas con herramientas de planificación automática basadas en la predicción de la dosis deben someterse a un proceso iterativo de evaluación robusta que permita ajustar los parámetros tanto del post-processing como del dose-mimicking.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Las repercusiones de este estudio son diversas ya que existe una amplia gama de aplicaciones para los planes clínicos obtenidos a través de planificación automática. En primer lugar, podrían inferirse en pocos minutos los planes para diferentes modalidades de tratamiento (por ejemplo, protonterapia frente a radioterapia convencional), con el fin de derivar al paciente al tratamiento más óptimo. En segundo lugar, y en el contexto de apoyo a la planificación manual, los planes generados automáticamente podrían usarse como guía para informar al planificador sobre dónde hay margen de mejora. En tercer lugar, la carga de trabajo de planificación podría reducirse de manera significativa tomando el plan generado automáticamente como punto de partida y aplicando únicamente ligeras modificaciones. Además, la introducción de la automatización podría reducir la variabilidad entre planificadores y entre centros. Por último, la planificación automática podría permitir la amplia implementación de la protonterapia adaptativa en imágenes diarias de alta calidad (por ejemplo, imágenes de CT repetidas o CBCTs corregidos). En todos los escenarios mencionados anteriormente, la planificación automática permite ahorrar tiempo, utilizar eficientemente los recursos e incluso mejorar la calidad del plan generado manualmente.



A systematic analysis of the particle irradiation data ensemble in the key of the microdosimetric kinetic model: should clonogenic data be used for clinical relative biological effectiveness?

Suarez-Garcia D, Cortes-Giraldo MA, Bertolet A
Radiother Oncol. 2023;185:109730.

Alejandro Bertolet

Department of Radiation Oncology, Massachusetts General Hospital and Harvard Medical School, Boston, MA, USA.

abertoletreina@mgh.harvard.edu

<https://doi.org/10.1016/j.radonc.2023.109730>

¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

En terapia con partículas, determinar la eficacia biológica relativa (RBE, por sus siglas en inglés) correspondiente a la fluencia de los haces empleados en cada punto del paciente es un problema central, especialmente cuando hablamos de partículas más pesadas que los protones, como iones de carbono o helio. La determinación de esta RBE se suele llevar a cabo mediante experimentos en ensayos in vitro, comparando la fracción de supervivencia clonogénica de poblaciones celulares expuestas a haces de referencia (rayos X o γ) y haces de

partículas. Estos resultados experimentales sirven para concebir y calibrar modelos que permitan predecir la RBE en la fase de planificación de tratamientos como función de las propiedades físicas de los haces, fundamentalmente la transferencia lineal de energía (LET, por sus siglas en inglés). En este sentido, esfuerzos como la base de datos PIDE (Particle Irradiation Data Ensemble), producida en el GSI alemán, ofrecen una recolección de experimentos realizados por diversos grupos, variando la calidad de la radiación a estudiar y las líneas celulares irradiadas. Sin embargo, la alta variabilidad entre experimentos y las diferencias fundamentales entre modelos biológicos *in vitro* e *in vivo* requieren análisis rigurosos y sistemáticos de estos resultados antes de lanzarse a proponer modelos para la práctica clínica.

¿Cuáles fueron los principales retos y dificultades para realizar el trabajo?

Analizar resultados de ensayos en condiciones experimentales dispares representó el principal desafío de este trabajo. Decidimos centrarnos en el marco teórico del Microdosimetric Kinetic Model (MKM), usado en la práctica clínica de terapia con iones de carbono en Japón, y que ofrece explicaciones algo más profundas que el mero concepto de LET. En el MKM, la respuesta de una determinada célula a la radiación se relaciona con la dosis acumulada en regiones subnucleares llamadas dominios, que, a su vez, son específicos de cada célula o sistema biológico. El cálculo de estos dominios y las consideraciones y análisis estadísticos correspondientes representaron, a su vez, el mayor trabajo por hacer.

¿Cuál ha sido el hallazgo y los resultados más importantes del estudio?

Para comprobar la variabilidad experimental y la validez del MKM, calculamos el valor mediano entre experimentos de cada línea celular, observando enormes variabilidades entre grupos diferentes e incluso experimentos similares en las mismas condiciones. Aunque las mismas tendencias de RBE creciente frente a la LET (o su versión microdosimétrica, lineal energy) hasta un cierto punto de saturación se observan en muchas de las líneas celulares incluidas en nuestro estudio, la magnitud de la RBE varía considerablemente, lo cual llama a la cautela a la hora de usar estos datos para calibrar y validar modelos de RBE.

¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

En general, este estudio transmite un mensaje a la comunidad experimental en radiobiología, abogando por una mayor estandarización de los métodos experimentales, así como un análisis sistemático de la aplicabilidad de los resultados en ensayos clonogénicos a organismos vivos. Igualmente, aquellos investigadores trabajando en modelos computacionales de biofísica y radiobiología deberían ser conscientes de la posibilidad de usar resultados parciales o sesgados para calibrar sus modelos y, asegurarse de usar enfoques más mecanísticos y basados en modelos biológicos más cercanos a un paciente que la supervivencia clonogénica *in vitro*.

¿En qué se basa nuestra innovación en iCT? En las necesidades de diagnóstico de más de 6.700 millones de personas.

Del mismo modo que las enfermedades afectan a todos por igual, Brilliance iCT de Philips se adapta a todo tipo de pacientes. Adquiere imágenes nítidas de cualquier parte del cuerpo, desde lactantes de poco peso hasta adultos con



sobrepeso. Los pacientes recibirán el grado de calidad que se merecen en sus exploraciones mediante una dosis baja sin que ello afecte a la calidad de la imagen. Visite nuestra página web en www.philips.com/CT.

***Porque nuestras innovaciones se inspiran en usted.**

PHILIPS
sense and simplicity

