



## Revisión de Artículos

**Mª Carmen Pujades\***

Comité de Redacción.

Estimados compañeros,

En este número tomo el relevo a nuestro compañero Paco Clemente para coordinar la sección de Revisión de artículos. En primer lugar, agradecer a Paco su dedicación a la sección durante estos últimos cinco años y la cercanía con la que siempre nos ha presentado los trabajos más recientes de nuestro ámbito profesional a nivel internacional.

Para esta nueva publicación contamos con una muestra de siete reseñas de los ámbitos de imagen por resonancia magnética, radioterapia y protonterapia.

La primera de ellas, a cargo de Joseba Alonso, nos introduce la nueva generación de escáneres para realizar imagen por resonancia magnética.

En el campo de la radioterapia, Diego Jurado nos habla sobre cómo abordar las inhomogeneidades que se obtienen en la distribución de dosis al optimizar con algoritmos avanzados y Mayca Baños nos presenta un estudio sobre el uso de una matriz de detectores en el control de calidad específico a paciente para radioterapia espacialmente fraccionada (SFRT).

En el campo específico de la radioterapia intraoperatoria, Paula Ibáñez nos presenta una herramienta basada en métodos Monte Carlo para el cálculo de dosis y Enrique Sanchís nos muestra un sistema de diseño propio para la monitorización del posible sangrado.

Para finalizar, las últimas contribuciones se centran en protonterapia. Víctor V. Onecha nos presenta una herramienta para poder hacer un seguimiento *in vivo* de la dosis depositada durante los tratamientos y César Jesús Valls nos cuenta los avances en el desarrollo de instrumentos para realizar tomografía computerizada de protones (TCP).

Desde el Comité de Redacción esperamos que disfrutéis de esta sección tanto como lo hacemos nosotros al prepararla. Mi enhorabuena a los autores por su trabajo y muchas gracias por su contribución a esta sección. Nos vemos en el próximo número.

Un fuerte abrazo.

\* Correspondencia  
Email: mpuclau@gmail.com



## Magneto-stimulation limits in medical imaging applications with rapid field dynamics

Grau-Ruiz D, Rigla JP, Pallás E, Algarín JM, Borreguero J, Bosch R, López-Comazzi G, Galve F, Díaz-Caballero E, Gramage C, González JM, Pellicer R, Ríos A, Benlloch JM, Alonso J  
*Phys Med Biol* 2022;67(4).045016.

### Joseba Alonso

MRILab, Institute for Molecular Imaging and Instrumentation (i3M), Universitat Politècnica de València (UPV), E-46022 Valencia, España.

[joseba.alonso@i3m.upv.es](mailto:joseba.alonso@i3m.upv.es)

doi: 10.1088/1361-6560/ac515c

### ¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

La motivación principal para estudiar la respuesta del sistema nervioso a secuencias rápidas de pulsos magnéticos radica en que el mundo de la imagen por resonancia magnética (Magnetic Resonance Imaging, MRI) está viviendo un momento de explosión creativa. Los escáneres MRI han sido tradicionalmente grandes, pesados y caros, pero actualmente hay una comunidad de científicos trabajando en diseños ligeros, portátiles y de bajo coste, lo cual abre posibilidades de aplicación de la MRI en situaciones hasta ahora inconcebibles: en las habitaciones de los pacientes, en sus casas, e incluso en exteriores. Esta nueva generación de sistemas, por ser más pequeños, permite trabajar con frecuencias de pulsos magnéticos más altas que los sistemas convencionales, y hasta ahora no se había hecho ningún estudio de seguridad en este régimen.

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

El primer reto fue de naturaleza eminentemente técnica: el diseño y construcción de un aparato versátil que permitiese generar campos magnéticos intensos y con dinámicas rápidas. Para resolverlo, diseñamos un sistema de bobinas refrigeradas y de baja inductancia, capaz de soportar corrientes eléctricas de cientos de amperios. Además, hicimos uso de unos módulos comerciales capaces de suministrar hasta 300 kilovatios de potencia eléctrica. Por otro lado, para este estudio contamos con la participación de 51 sujetos, que se sometieron a pulsos magnéticos intensos de distintas características y capaces de estimular el sistema periférico nervioso en la zona del antebrazo. La propia gestión de los voluntarios y los permisos éticos necesarios para los estudios es una tarea que no debe infravalorarse. En este sentido, agradecemos enormemente la colaboración de los voluntarios y del Hospital La Fe de Valencia.

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

El principal resultado de este trabajo es que la validez de las leyes empíricas que determinan la dependencia de los límites de estimulación magnética en los regímenes convencionales de operación de los escáneres MRI, donde las frecuencias de las secuencias de pulsos magnéticos llegan hasta aproximadamente 1 kilohercio, es extensible a frecuencias más de diez veces superiores. Además, la versatilidad del aparato que hemos construido para estas pruebas permite hacer estudios relevantes no sólo para MRI, sino también para imagen médica con partículas magnéticas (Magnetic Particle Imaging, MPI), donde la distribución espacial de los campos es homogénea y las frecuencias de trabajo son incluso mayores.

### ¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

La estimulación periférica nerviosa limita el uso de escáneres de imagen médica tanto para MRI como para MPI. Nuestro estudio, por un lado, es el primero en comprobar los límites en frecuencias de hasta 12 kilohercios. Por otro lado, los resultados arrojan una variabilidad significativa en los límites de estimulación en función de ciertas características fisiológicas de los sujetos (como su peso o el perímetro del brazo). Dado el bajo coste del aparato que hemos construido para estos experimentos, una probable aplicación del mismo es su uso para medir la sensibilidad de un sujeto previo a la toma de imágenes, lo cual permitiría optimizar la secuencia de pulsos para tomas más rápidas o de mayor resolución espacial, siempre dentro del margen de seguridad personalizado para cada paciente.



## Impact of the dose quantity used in MV photon optimization on dose distribution, robustness, and complexity

Jurado-Bruggeman D, Muñoz-Montplet C, Hernandez V, Saez J, Fuentes-Raspall R  
Med Phys 2022;49:648-665.

### Diego Jurado Bruggeman

Servei de Física Mèdica i Protecció Radiològica, Institut Català d'Oncologia, Girona.  
[djurado@iconcologia.net](mailto:djurado@iconcologia.net)  
<https://doi.org/10.1002/mp.15389>

---

### ¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

Hace años adoptamos el algoritmo Acuros XB para las técnicas avanzadas. Al hacer el cálculo final de la optimización aparecían inhomogeneidades de dosis en hueso y metal que no teníamos con AAA, pero no queríamos corregirlas porque habría supuesto impartir dosis diferentes a los pacientes y queríamos ser prudentes. Esto no es así en todos los centros. Está demostrado que su corrección conlleva una pérdida de robustez y existen trabajos que discuten las posibles consecuencias clínicas a nivel conceptual. Concluyen que es deseable no realizar las correcciones, pero no abordan los nuevos retos que se plantean, como qué criterios de evaluación utilizar que incorporen estas inhomogeneidades, cómo dilucidar si las distorsiones en la distribución de dosis son debidas a efectos del medio o a un plan sub-óptimo, o cómo realizar las optimizaciones con estos algoritmos avanzados (tipo LBTE o Monte Carlo). Para resolver estas cuestiones, desarrollamos una forma de mostrar los valores de dosis de estos algoritmos sin distorsiones del medio. Esto se traduce formalmente en una nueva cantidad de dosis que permite trabajar de la manera clásica.

En este contexto de escenarios diversos (corrección vs no corrección), queríamos estudiar en detalle las implicaciones reales en los diferentes aspectos de la calidad del plan de forzar distribuciones de dosis iguales a las previas con los algoritmos avanzados para sus cantidades de dosis (medio o agua). Además, queríamos estudiar la viabilidad y la utilidad en la optimización de la cantidad de dosis que habíamos desarrollado.

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

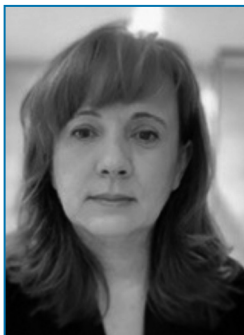
Las dificultades fueron pocas ya que todas las herramientas ya estaban implementadas bien dentro del propio sistema de planificación (optimización, robustez), bien en softwares desarrollados para trabajos previos (complejidad, nueva cantidad de dosis).

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

Hemos demostrado en casos reales que optimizar con algoritmos avanzados forzando obtener distribuciones como las de los algoritmos previos puede acarrear consecuencias clínicas, problemas de robustez y, en menor medida, un aumento de la complejidad. La causa es la introducción de ajustes locales de la fluencia allí donde haya un medio que tenga una respuesta de dosis diferente. Estos ajustes y sus consecuencias dependen en magnitud y sentido de la cantidad de dosis considerada. Por último, hemos demostrado que optimizar con la nueva cantidad de dosis mantiene las ventajas de los algoritmos avanzados y evita el resto de inconvenientes.

### ¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Esperamos convencer a los usuarios de los algoritmos avanzados de que vayan con cuidado al optimizar y no busquen reproducir a toda costa la homogeneidad y cobertura que tenían con los algoritmos anteriores. También nos gustaría concienciar a la comunidad y a los fabricantes de que hay que abordar el proceso de optimización y evaluación de forma diferente. Por último, nos gustaría que algún fabricante se interese en implementar para este fin la cantidad de dosis que hemos desarrollado.



## Sensitivity and specificity analysis of 2D small field measurement array: Patient-specific quality assurance of small target treatments and spatially fractionated radiotherapy

Banos-Capilla MC, Lago-Martin JD, Gil Deltoro P, Larrea Rabassa L  
Appl Clin Med Phy 2021;1-16.

### Mayca Baños Capilla

Hospital Vithas Valencia Consuelo, Valencia, España.

[BanosMC@Vithas.es](mailto:BanosMC@Vithas.es)

<https://doi.org/10.1002/acm2.13402>

### ¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

En 2019 se introdujo en nuestro servicio la radioterapia espacialmente fraccionada (SFRT). Esta técnica tiene unas características específicas a la hora de distribuir la dosis ya que se generan unos patrones de heterogeneidad en forma de múltiples regiones de pequeño volumen en los que se concentran altos niveles de dosis gracias a los cuales, se consigue mejorar la respuesta a la radiación en tumores resistentes o de gran volumen, sin aumentar la toxicidad en los órganos críticos que rodean al PTV.

El desafío fue, una vez creado los planes de tratamiento de alta modulación, conseguir realizar un control de calidad específico a paciente (SPQA) adecuado a esta distribución heterogénea de dosis y a los altos gradientes de los mapas de fluencia asociados a la SFRT.

El protocolo de SPQA comprende además de las medidas de dosis absoluta en puntos discretos, la verificación de la coincidencia de los mapas de fluencia calculados frente a los medidos. Inicialmente, las pruebas se comenzaron a realizar mediante el uso de películas radiocrómicas. El método nos proporcionaba la resolución espacial requerida para los tratamientos de SFRT. No obstante, el tiempo requerido para su calibración y procesado era elevado, motivo por el cual decidimos buscar un método alternativo que, contando con una resolución espacial adecuada, consiguiera mejorar los tiempos de procesado.

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

Nuestro sistema de verificación estándar, la película radiocrómica, presenta una baja dependencia con el tamaño de campo, tasa de dosis media, energía y la incidencia oblicua del haz frente a la variación de la respuesta que pueden presentar las matrices de detectores.

Por lo tanto, nuestro primer reto fue verificar si el equipo elegido cumplía con estas características de estabilidad de la respuesta frente a estos parámetros, o en su defecto que las medidas eran corregidas mediante la aplicación de los factores correspondientes.

Así mismo, para poder dejar las películas en un segundo plano, nuestro siguiente paso fue comprobar que a pesar de la disminución de la resolución espacial del array frente a la placa radiocrómica, este sistema de medida generaba resultados semejantes.

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

Comparando ambos métodos, (película radiocrómica y array 2D), obtuvimos con el array valores de la función gamma más altos que con la película. Esto se tradujo en un aumento del número de planes de tratamiento medidos con el array clasificados como correctos, frente a los obtenidos con la película.

Para evaluar la capacidad del array de clasificar planes como correctos o incorrectos, se propuso la realización de una serie de pruebas de sensibilidad del detector. Se generaron planes con errores sistemáticos introducidos en la longitud de arco, posición de gantry, tamaño de campo y desplazamientos en las posiciones de las láminas. Los planes "incorrectos" medidos con el array y calculados se compararon con los planes de referencia sin errores. Tomando como referencia los resultados teóricos esperados, obtuvimos los valores de sensibilidad y especificidad de la prueba.

### ¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Por un lado, a partir del estudio de las características del array, se propone la necesidad de realizar un estudio previo a su utilización de cualquier equipo de medida dentro del contexto del SPQA para determinar los

límites de aplicación y la métrica más adecuada para la clasificación de planes. Y por ello, hemos implementado en nuestro servicio, basado en estas pruebas, un protocolo para determinar la fiabilidad de los equipos de medida dedicados al SPQA.

Como verificación final, realizamos un estudio sobre una serie de 17 pacientes reales tratados con SFRT en los que se compararon los resultados derivados de ambos sistemas de medida, al aplicar la métrica adecuada, los resultados obtenidos fueron comparables.

Por tanto, en el caso particular del equipo estudiado, hemos podido establecer su idoneidad para verificar tratamientos muy conformados con altos gradientes de dosis, como los alcanzados en SFRT, SBRT, SRS y en particular para radiocirugía de múltiples blancos tratados con un isocentro único.



### **XIORT-MC: A real-time MC-based dose computation tool for low-energy X-rays intraoperative radiation therapy**

Ibáñez P, Villa-Abaunza A, Vidal M, Guerra P, Graullera S, Illana C, Udías JM

Med Phys 2021;48(12):8089-8106.

#### **Paula Ibáñez**

Nuclear Physics Group, EMFTEL and IPARCOS, CEI Moncloa, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

Instituto de Investigación Sanitaria del Hospital Clínico San Carlos, Madrid, Spain.

[pbibanez@ucm.es](mailto:pbibanez@ucm.es)

<https://doi.org/10.1002/mp.15291>

#### **¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?**

Este estudio fue motivado por la necesidad de crear una herramienta de cálculo de dosis para rayos X de baja energía que fuera ultra rápida y precisa (XIORT-MC) para ser incorporada en el planificador de radioterapia intraoperatoria *radiance*, desarrollado por la empresa GMV. La planificación en radioterapia intraoperatoria requiere el cálculo de dosis muy rápido, en fracciones de segundo, si es posible con la precisión del Monte Carlo, para poder así obtener y validar la planificación in situ tras la resección del tumor. Nuestra herramienta incluye dos algoritmos de cálculo de dosis basados en Monte Carlo: Un Monte Carlo acelerado y un algoritmo híbrido, implementados tanto en CPU como en GPU.

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

El mayor reto de este trabajo fue, a la hora de desarrollar el algoritmo híbrido, el de llevar al extremo los métodos de reducción de varianza con el fin de obtener dosis con poco ruido estadístico en el menor tiempo posible, manteniendo la misma precisión en la dosis del Monte Carlo estándar. El otro gran reto fue la implementación de dicho código en GPU para obtener distribuciones de dosis en menos de un segundo.

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

El resultado principal de este trabajo ha sido el desarrollo y validación del algoritmo híbrido de cálculo de dosis, mucho más rápido que un código Monte Carlo convencional gracias a sus métodos de reducción de varianza y la introducción de meta-historias, sin sacrificar la modelización en detalle de toda la física relevante. En CPU este código es entre 50 y 100 veces más rápido que un Monte Carlo convencional. En GPU, somos capaces de calcular distribuciones de dosis en situaciones realistas con la precisión de un Monte Carlo en menos de un segundo.

#### **¿Cuáles son las repercusiones del estudio?**

Con XIORT-MC se pueden calcular mapas de dosis de rayos X de baja energía en tiempo real y con la precisión del Monte Carlo. De hecho, una versión en CPU de dicho algoritmo ha sido incorporada en *radiance* como

motor de cálculo de dosis para el sistema Intrabeam y se ha distribuido en más de un centenar de hospitales en todo en mundo. Y estamos trabajando en el despliegue de la versión en GPU.



## Embedded bleeding detector into a PMMA applicator for electron intraoperative radiotherapy

García-Gil R, Casans S, Navarro AE, García-Sánchez A-J, Rovira-Escutia JJ, García-Costa D, Sanchis-Sánchez E, Pérez-Calatayud I, Sanchís E  
*Phys Med* 2022;94:35-42.

### Enrique Sanchís Peris

Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Valencia, España.  
[enrique.sanchis@uv.es](mailto:enrique.sanchis@uv.es)  
<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.12.018>

### ¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

Este estudio es el último de una serie de cuatro trabajos dirigidos a intentar ayudar en uno de los problemas que se presentan en la clínica en radioterapia intraoperatoria con aceleradores de electrones. En lechos quirúrgicos muy vascularizados puede ocurrir que se produzca un sangrado y como consecuencia un error en la profundidad real alcanzada por los electrones en vez de la prescrita.

Para abordar la posibilidad de monitorizar esta situación, se desarrolló un detector capacitivo con su correspondiente electrónica de lectura, capaz de detectar niveles de fluidos de menos de cinco milímetros respecto de una condición de referencia. En este trabajo final, el objetivo ha sido construir el sistema de medida (detector, electrónica, alimentación y lectura inalámbricas) de forma completamente independiente del acelerador, quedando el sistema totalmente embebido en el propio aplicador plástico, en su pieza más próxima al paciente.

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

Las dificultades abordadas fueron principalmente:

1. La introducción de la parte electrónica en el aplicador de manera que no perturbase el haz, tanto en su aspecto terapéutico como en un potencial incremento de la dosis periférica, que es crítica para este acelerador LIAC HWL, que hace viable su uso en quirófanos convencionales. Para ello, ha sido fundamental la ayuda de PTW Iberia en la coordinación del vaciado de la parte superior del aplicador, así como la gentileza de Sordina en la cesión de aplicadores de diferente tamaño para el estudio.
2. La alimentación inalámbrica del circuito, logrando una configuración capaz de realizar y mantener la carga en tiempos compatibles con el acto clínico.
3. La realización de una aplicación para *Smartphone* con comunicación inalámbrica para la gestión de calibrados, situación de referencia y monitorización de posibles fluidos desde el exterior del quirófano.

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

Los resultados logrados en el estudio han sido excelentes en nuestra modesta opinión, resolviendo los planteamientos y objetivos previstos. Se ha obtenido una solución completamente inalámbrica e independiente del acelerador, implementada íntegramente en el aplicador. A su vez, esta modificación no afecta ni al haz clínico (cuya componente de electrones procedentes de la pared del aplicador es notable) ni a la dosis periférica, ni desde luego a su necesaria capacidad de esterilización.

### ¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Este trabajo completa la serie de estudios sobre la monitorización del posible sangrado. Pone de manifiesto que es posible, mediante una modificación mínima del interior del aplicador, incorporar un sistema de monitorización que evite las potenciales desviaciones debidas a sangrados en radioterapia intraoperatoria. El trabajo



demuestra esa posibilidad y deja la resolución en un estado de valoración por parte de la empresa fabricante de aplicadores, deseando su implementación clínica lo más próxima posible para aumentar la calidad y seguridad en determinados casos en el tratamiento de radioterapia intraoperatoria, que constituye una técnica y unos equipos que se están incorporando de forma importante en numerosos hospitales.

El grupo de autores también quiere mostrar su satisfacción por la enriquecedora experiencia de la colaboración entre universidad, empresas y hospitales, lo que demuestra una vez más que es una manera adecuada para obtener una combinación excelente de motivación, metodología, combinación de perspectivas, utilidad clínica, relevancia y producción científica.



## Dictionary-based software for proton dose reconstruction and submillimetric range verification

Onecha VV, Galve P, Ibáñez P, Freijo C, Arias-Valcayo F, Sanchez-Parcerisa D, España S, Fraile LM, Udías JM  
Phys Med Biol 2022 9;67(4). 045002.

### Víctor V Onecha

Grupo de Física Nuclear, EMFTEL & IPARCOS, Universidad Complutense de Madrid, CEI Moncloa, Madrid, España

Instituto de Investigación Del Hospital Clínico San Carlos (IdISSC), Ciudad Universitaria, Madrid, España.

[vicvalla@ucm.es](mailto:vicvalla@ucm.es)

<https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac4efc>

### ¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

En el Grupo de Física Nuclear (GFN) de la Universidad Complutense de Madrid, estamos trabajando en un proyecto cuyo objetivo final es la verificación de la dosis depositada en un paciente en tiempo real durante un tratamiento de protonterapia. Para ello pretendemos usar la distribución de isótopos beta+ (producida por los protones) que podemos medir usando un sistema PET para estimar la dosis depositada a partir de ella.

La motivación de este trabajo nace de la necesidad de un programa que pueda hacer dicha transformación de forma rápida y precisa.

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

El mayor reto que teníamos por delante cuando nos propusimos desarrollar este programa fue el de encontrar un algoritmo reconstructor que satisficiera todas las necesidades que queríamos. Existen diferentes propuestas anteriores a la nuestra, pero ninguna cumplía los requisitos que necesitábamos:

1. Velocidad de ejecución prácticamente inmediata.
2. Dosis estimada independiente del ruido de la imagen PET que se emplea como Input.

Además, durante el desarrollo de este programa nos encontramos dificultades en la implementación de nuestro algoritmo en GPU, ya que es necesario disponer de una base de datos de un tamaño considerable. Gran parte del tiempo de desarrollo de este trabajo se centró en la manera de combinar el algoritmo y la base de datos en la GPU, buscando la opción cuyo compromiso entre calidad de resultados, tiempo de ejecución y tamaño de la base de datos fuese la óptima.

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

Hemos conseguido desarrollar una herramienta capaz de estimar la dosis depositada a partir de imágenes PET en menos de 1 segundo y con un detalle y precisión tal, que nos permite predecir el rango del protón en el paciente con un error inferior al mm. Además, hemos probado este método sobre situaciones clínicas realistas en las que hemos obtenido resultados muy prometedores.

### ¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

En este trabajo presentamos una herramienta muy prometedora para poder hacer un seguimiento *in-vivo* de la dosis depositada durante un tratamiento de protonterapia. Este seguimiento permitiría identificar fallos o desviaciones en el tratamiento con respecto a lo planeado y así evitar erróneas deposiciones de dosis que podrían tener un impacto negativo en el paciente.

De la misma manera, esto podría abrir la posibilidad de usar PTV más compactos al tumor y no tener en cuenta ciertas incertidumbres que se podrían identificar durante la irradiación del paciente.



### A novel range telescope concept for proton CT

Granado-González M, Jesús-Valls C, Lux T, Price T, Sánchez F  
Phys Med & Biol 2022;67(3). 035013.

#### César Jesús-Valls

Institut de Física d'Altes Energies (IFAE) — The Barcelona Institute of Science and Technology (BIST), Campus UAB, E-08193 Bellaterra (Barcelona), España.

[cjesus@ifae.es](mailto:cjesus@ifae.es)

<https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac4b39>

### ¿Cuál ha sido la motivación para empezar este estudio?

El estudio empezó en 2020 como resultado de los contactos entre investigadores especialistas en el desarrollo de instrumentos para realizar tomografía computerizada de protones (TCP) e investigadores centrados en el estudio de la física de neutrinos. Tras estos contactos iniciales, nos percatamos de que recientes avances técnicos desarrollados para mejorar los actuales detectores de neutrinos, con algunas modificaciones, podrían superar las actuales limitaciones de los aparatos existentes para realizar TCP. Más concretamente, nos propusimos desarrollar un detector capaz de medir la energía de los protones con una resolución mejor que el 1% a un precio de coste asequible y que fuese capaz de operar a ritmos de medida sin precedentes, hasta dos órdenes de magnitud superiores a los de las alternativas actuales.

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

El trabajo está basado puramente en simulaciones numéricas las cuales pretenden recrear al detalle todos los elementos relevantes del sistema a fin de evaluar sus propiedades y su potencial médico. Las simulaciones numéricas son corrientes en el mundo de la física de partículas y han sido comprobadas en múltiples experimentos. En ese sentido, gran parte de los esfuerzos se centraron en desarrollar tal simulación; en asegurar su correcto funcionamiento y en encontrar las métricas más relevantes a fin de estudiar el verdadero potencial del sistema con tan pocas asunciones e idealizaciones como fuera posible.

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

Los resultados del estudio sugieren un enorme potencial para esta tecnología. Se espera sea capaz de generar imágenes de altísima calidad trabajando en condiciones clínicas realistas y a un precio de producción competitivo. De confirmarse experimentalmente las predicciones de las simulaciones, esta tecnología puede ser clave para convertir la TCP en una técnica cotidiana de imagen. Este avance sería de enorme relevancia para la utilización de la radioterapia de protones (RP) como alternativa terapéutica, una posibilidad con capacidad para mejorar el tratamiento de una fracción significativa de los pacientes oncológicos.

### ¿Cuáles son las repercusiones del estudio?

Este estudio es el primer paso hacia la validación y el desarrollo de esta nueva tecnología. Confirmadas las excelentes perspectivas ofrecidas por las simulaciones el siguiente paso consistirá en construir un primer prototipo y demostrar experimentalmente su viabilidad.