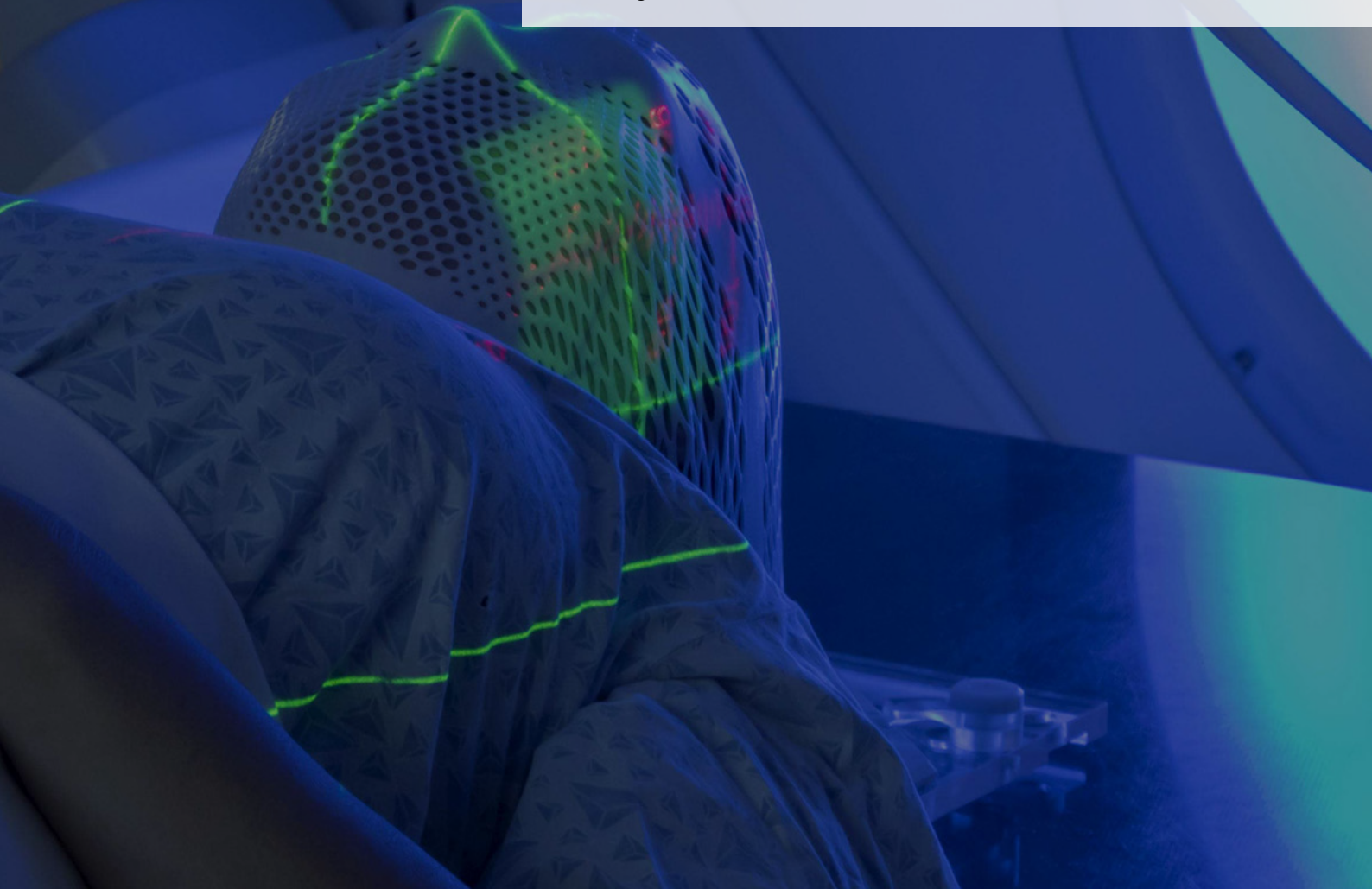




PROTONTERAPIA

SOLUCIONES ESPECÍFICAS DE APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LA FÍSICA

La terapia de protones o protonterapia cada vez se emplea en más instalaciones para el tratamiento de ciertos tipos de cáncer que se benefician de sus características únicas de profundidad-dosis. Así, la protonterapia tiene potencial para escalar la dosis de radiación al volumen tumoral en los casos donde se espera beneficio de tal escalada, a la vez que preserva mejor los órganos en riesgo.



La protonterapia es un tratamiento de radioterapia muy preciso, que ofrece importantes ventajas con respecto a otras modalidades de radioterapia convencionales. Los protones penetran en los tejidos a una cierta profundidad que depende de la energía de la partícula ("pico de Bragg"). Debido a esa característica única de profundidad-dosis, los protones depositan la mayor parte de su energía a la profundidad del pico de Bragg, evitando que los protones penetren más allá^{1,2}. También se reduce mucho la dosis entregada desde el punto de entrada del haz hasta el pico.

Así se pueden reducir las dosis distales y proximales de los tejidos sanos circundantes al tumor, por lo que permite escalar la dosis de radiación al volumen tumoral sin aumentar el riesgo de complicación en otros órganos. Esto permite en muchos casos críticos reducir la toxicidad del tratamiento y mejorar la tasa de control local, la calidad de vida y la supervivencia¹⁻³. Por lo tanto, cualquier tumor próximo a órganos en riesgo se beneficiaría de la protonterapia, y, de hecho, se ha visto que esta terapia protege al tronco cerebral, glándulas salivares, médula espinal y laringe¹.

Se ha demostrado la costoeficiencia de la protonterapia con respecto a la radioterapia convencional en pacientes pediátricos con tumores del sistema nervioso central, en algunos pacientes con tumores de la cabeza y cuello, en ciertos pacientes de cáncer de mama de alto riesgo cardíaco y en aquellos pacientes con tumores hepatocelulares. Para otras localizaciones anatómicas con excelentes alternativas entre terapias más establecidas (como, por ejemplo, el cáncer de próstata) sigue siendo un reto alcanzar evidencia suficiente de costoeficiencia para protones; incluso si cada vez es más evidente la preferencia de muchos pacientes debido a la expectativa de efectos secundarios menos agresivos^{3,4}.

Los beneficios dosimétricos de la protonterapia han provocado un aumento en su uso, que se traduce en más de 100 instalaciones operativas en el mundo⁵ y cerca de 250 000 pacientes tratados⁶. Además, con el desarrollo de técnicas más avanzadas de protonterapia, la nueva generación de equipos permite realizar terapia de intensidad modulada (IMPT por sus siglas en inglés), que consigue una distribución de dosis altamente conformada en los volúmenes tumorales¹.

Todo ello está aumentando la evidencia de beneficios clínicos derivados de las ventajas dosimétricas.



La protonterapia ha demostrado eficiencia clínica y costoeficiencia para el tratamiento de ciertos tipos de cáncer. Su aplicación segura requiere de una elevada precisión en la colocación y posicionamiento del paciente.

Los expertos esperan que el aumento en la utilización de IMPT produzca mejores resultados clínicos², por lo que consideran que en un futuro la protonterapia se convertirá en una modalidad de radioterapia más para la mayoría de cánceres sólidos¹.

La elevada precisión de la protonterapia requiere de la máxima exactitud en la colocación, posicionamiento y verificación del paciente, que supone la mayor parte del tiempo del tratamiento. Aplicaciones Tecnológicas de la Física dispone de las soluciones de tecnología avanzada necesarias para este proceso de posicionamiento de alta precisión y exactitud.



A continuación, expondremos el maniquí Prime de RTsafe, los softwares de automatización AutoContour y ClearCheck de Radformation, las soluciones de inmovilización mecánica de Orfit, el sistema de guiado por imagen superficial Catalyst PT de C-RAD y el módulo Proton Vert del simulador VERT.

PRIME DE RTSAFE PARA LA VALIDACIÓN END-TO-END DEL PROCESO DE PROTONTERAPIA

La empresa RTsafe ofrece productos y servicios de evaluación externa para control de calidad de la radioterapia, por medio de tecnologías de vanguardia de impresión 3D y de dosimetría real 3D. Sus soluciones se integran fácilmente en el control de calidad de máquinas y procesos de radioterapia.

El maniquí Prime de RTsafe se trata de un fantoma antropomórfico de cabeza que permite el control de calidad de máquina en la terapia de protones. La anatomía del maniquí proviene de datos reales de CT y DICOM. Los tejidos óseos

se realizan mediante impresión 3D de alta precisión con materiales de densidad equivalente a los huesos. Los tejidos blandos se consiguen llenando el maniquí de agua. De esta manera, reproduce con fidelidad las estructuras y densidades anatómicas, logrando un contraste realista entre tejidos óseos y blandos en imágenes de resonancia y de tomografía computarizada.

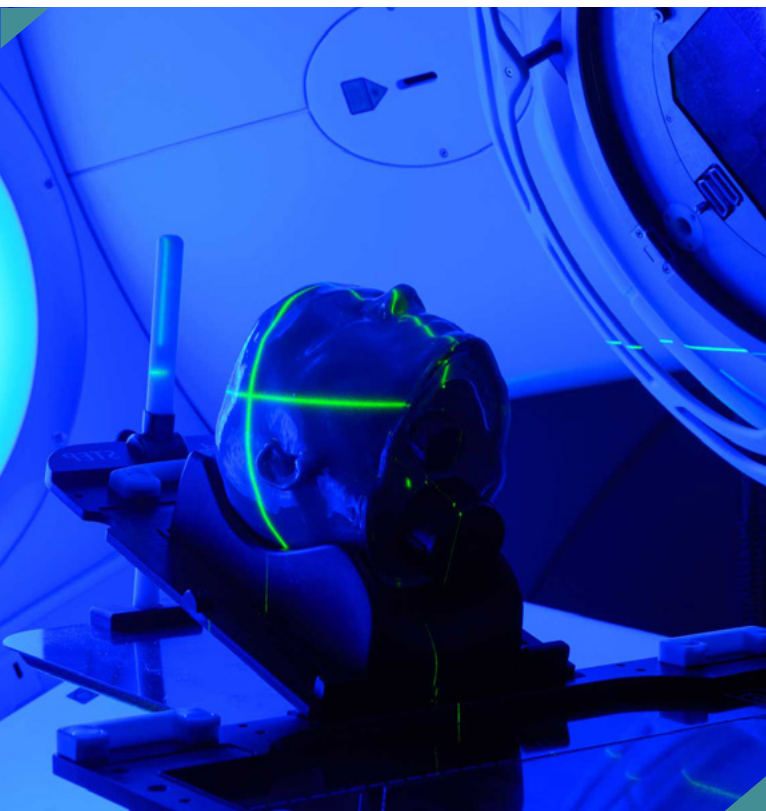
El maniquí Prime de RTsafe permite la validación End-to-End del proceso de protonterapia por medio de la impresión 3D de alta calidad e insertos dosimétricos de punto, película 2D o gel polimérico 3D.

El interior del fantoma cuenta con insertos dosimétricos intercambiables, para realizar dosimetría de punto, de película 2D y de gel polimérico 3D^{7,8}. Además, el maniquí Prime se puede combinar con opciones avanzadas de dosimetría remota ofrecidas a través de servicio postal.

Gracias a sus avanzadas características, el maniquí Prime es la herramienta ideal para la validación End-to-End del proceso de protonterapia, que permite verificar el rango de los protones, evaluar la exactitud espacial de la dosis (incorporando incertidumbres de colocación, del haz y del rango de protones), y también permite la verificación de la

CLEARCHECK Y AUTOCONTOUR DE RADFORMATION PARA VERIFICACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE PLANES

Dentro del flujo de trabajo de la protonterapia, los planes de tratamiento requieren contornear los objetivos (tanto PTV como OAR), definir los haces de protones, calcular la dosis, realizar la verificación pretratamiento y, posteriormente, evaluar y aprobar el plan.



La empresa Radformation ofrece soluciones innovadoras de software de automatización para facilitar estos pasos de planificación, verificación y documentación de los planes de tratamiento. Además de automatizar tareas de los radiofísicos, los softwares de Radformation se caracterizan por su integración con el planificador Eclipse™ de Varian como Script Plugin, si bien sus herramientas AutoContour y

AutoContour, próximamente disponible en Europa, y ClearCheck automatizan el contorneado de órganos y la evaluación y documentación de planes de protonterapia.

AutoContour no está aún disponible en Europa, aunque el marcado CE está en proceso. Sin embargo, ya se está usando en otros centros de protones para el contorneado automático de órganos en pocos segundos. AutoContour genera instantáneamente OAR y estructuras con alta calidad, a partir de más de 80 modelos de Deep Learning que abarcan la mayoría de regiones anatómicas.

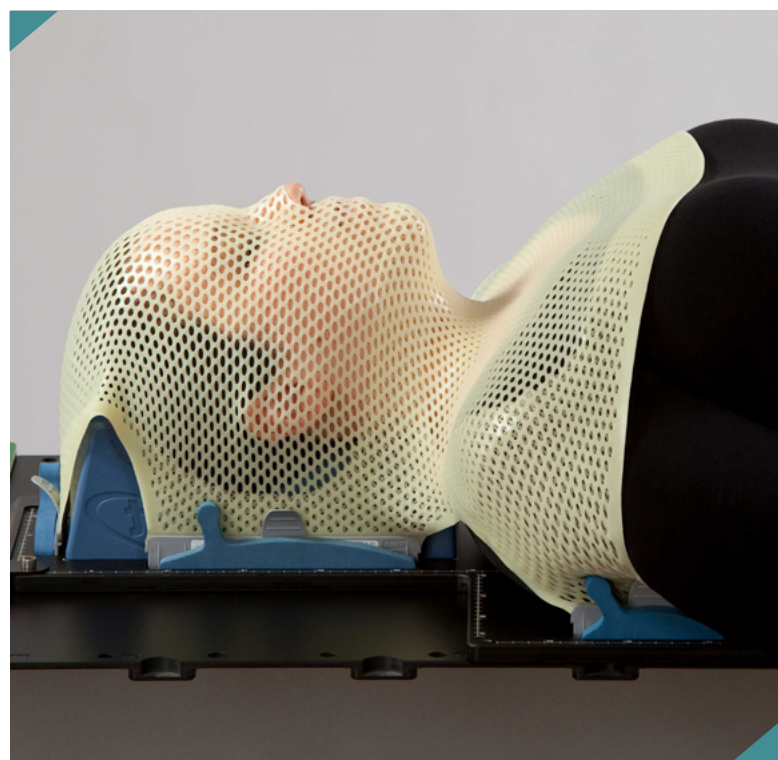
La automatización del proceso de contorneado supone un aumento en la seguridad del tratamiento, así como un nuevo estándar de calidad en los distintos planificadores para obtener estructuras consistentes. AutoContour funciona perfectamente con la mayoría de planificadores disponibles, aunque ofrece una integración única con Eclipse y ClearCheck, que agilizan el proceso.

Por otro lado, el software ClearCheck, solo compatible con el planificador Eclipse, tiene un amplio respaldo en la evaluación y documentación exhaustiva de planes completos de protonterapia, incluyendo restricciones de dosis, comprobación de estructuras y planes. Estas tareas requerirían supervisión manual, pero ClearCheck permite la validación automática de las comprobaciones básicas, facilitando el flujo de trabajo y ahorrando tiempo.

ORFIT: SOLUCIONES DE INMOVILIZACIÓN Y POSICIONAMIENTO DEL PACIENTE

Frente a las soluciones de inmovilización convencionales, los sistemas de Orfit consiguen, por un lado, la máxima comodidad del paciente durante la simulación y el tratamiento, mientras que logran alta precisión en el posicionamiento e inmovilización de los pacientes de protonterapia.

Las soluciones de Orfit están perfectamente adaptadas a las técnicas de terapia de protones más avanzadas e incluyen la mesa Aerial®, placas base HP PRO, diversos accesorios



(soportes para mano, cojines reposacabezas y de cuello, placa de indexación, tope craneal trasero, etc.) y máscaras Nanor®. Los distintos accesorios de Orfit están diseñados para el máximo confort del paciente.



La mesa Aerial consigue una precisión menor de 0.5 mm en el posicionamiento del paciente a lo largo de 100 mm. Aerial queda flotando en el aire, sin rieles ni obstrucciones por debajo, lo que contribuye a proporcionar una zona de tratamiento homogénea. Actualmente se están desarrollando los módulos pediátricos de esta solución.

Además de la mesa Aerial, Orfit ofrece las placas base HP PRO que se han diseñado específicamente para los requisitos de la protonterapia. Cada placa es ligera, homogénea y de baja densidad, y permite aproximar el gantry al paciente a través de una zona estrecha de cabeza y cuello. Presentan excelentes propiedades dosimétricas y están disponibles tanto para pacientes adultos como pediátricos (con una zona de hombros estrecha y más corta de cuello).

En [este vídeo](#) del Huntsman Cancer Institute se pueden ver en acción las soluciones de Orfit para protonterapia utilizadas en

Los sistemas Orfit para protonterapia aseguran la precisión y exactitud en la colocación y posicionamiento del paciente, así como la máxima comodidad del mismo.

Las máscaras Nanor se pueden combinar con la mesa Aerial y las placas base. Estas máscaras consisten en una matriz polimérica con nanopartículas, que forman una estructura interna exclusiva para limitar el encogimiento de las máscaras termoplásticas convencionales y la presión que ejercen sobre la cara del paciente. Las nanopartículas que dotan de estructura a la máscara termoplástica de Orfit consiguen gran resistencia con un grosor de tan solo 1.6 mm. Las máscaras Nanor para protonterapia están disponibles para cerebro; cabeza, cuello y hombros; y abdomen-pelvis.

El alto nivel de comodidad que proporcionan las soluciones de Orfit para terapia de protones optimiza la experiencia del paciente tanto en la simulación como en el tratamiento, consiguiendo un mayor estándar de cuidado.

Orfit cuenta con más de 30 años de experiencia desarrollando soluciones adaptativas para los criterios, cada vez más exigentes, de precisión en radioterapia, reduciendo las incertidumbres diarias en el posicionamiento del paciente.

VERT: CUBRIENDO LAS NECESIDADES DE FORMACIÓN EN PROTONTERAPIA

El uso de la protonterapia requiere de una extensa formación y entrenamiento del personal clínico, para que dispongan de los conocimientos fundamentales acerca de las diferencias entre las terapias de fotones y protones, y sus implicaciones clínicas y técnicas. Un informe de 2014 resalta que un programa general en radioterapia de fotones resulta insuficiente para adquirir las competencias básicas que permitan la utilización clínica de la protonterapia⁹.

Las tareas formativas se llevan a cabo habitualmente cuando las máquinas se encuentran disponibles. Sin embargo, las prolongadas listas de espera de los pacientes provocan sobrecargas en los servicios de radioterapia, lo que reduce el tiempo dedicado a la formación. Precisamente, el objetivo del sistema de simulación VERT (Virtual Environment for Radiotherapy Training) de Virtual es paliar este inconveniente en la formación en radioterapia.





Los estudios muestran que el entrenamiento con VERT mejora la confianza y satisfacción de los estudiantes¹⁰.

VERT dispone de un módulo específico de protones, Proton VERT, que también ha demostrado importantes beneficios en la formación de estudiantes de radioterapia¹¹.

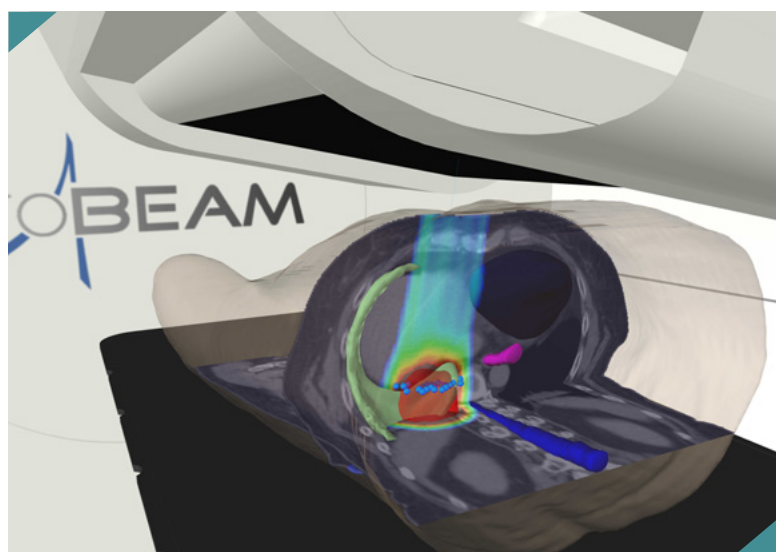
Proton VERT simula las funciones principales de la máquina de tratamiento e incluye visualizaciones 3D de los planes de tratamiento (CT, estructuras, dosis) mostradas in situ en la máquina, además de la simulación del haz. Mediante Proton VERT, los estudiantes y personal clínico exploran y aprenden los fundamentos físicos de la protonterapia, así como el manejo de la máquina de protones¹¹.

El módulo Proton VERT de Virtual para la formación y entrenamiento en protonterapia reduce el tiempo de uso de la máquina para tareas formativas, a la vez que aumenta los niveles de satisfacción de los estudiantes de radioterapia y mejora su comprensión de esta técnica.

De hecho, según un estudio reciente del uso de Proton VERT en la enseñanza de estudiantes de radioterapia, los niveles de satisfacción de los participantes fueron muy elevados. Todos ellos estuvieron de acuerdo en que Proton VERT mejoró su comprensión de la técnica de protonterapia gracias a la visualización de haces de protones y dosis¹¹.

El módulo Proton VERT permite la transición fácil, segura y efectiva de la terapia de fotones a protones, tanto para estudiantes como personal clínico, mediante la comparación visual de planes de tratamiento. Además, Proton VERT se puede usar como recurso para explicarle el tratamiento al paciente y disminuir su ansiedad, e incluso para presentar la terapia de protones a un público más amplio.

Aplicaciones Tecnológicas de la Física cuenta con las soluciones más avanzadas para garantizar la calidad de la protonterapia, de acuerdo a los estándares más exigentes. Si desea más información acerca de los productos específicos para la terapia de protones, puede contactarnos en el siguiente [enlace](#).



Referencias

1. Yuan, T. Z., Zhan, Z. J. & Qian, C. N. New frontiers in proton therapy: Applications in cancers. *Cancer Commun.* 39, (2019).
2. Mohan, R. & Grosshans, D. Proton Therapy – Present and Future. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 109, 26–44 (2017).
3. Zientara, N., Giles, E., Le, H. & Short, M. A scoping review of patient selection methods for proton therapy. *J. Med. Radiat. Sci.* 00, 1–14 (2021).
4. Verma, V., Mishra, M. V. & Simone, C. B. (OA46) Cost-effectiveness of Proton Beam Therapy for Oncologic Management. in 100th Annual Meeting American Radium Society (2018). doi:10.1016/j.jrobp.2018.02.085.
5. PTCOG - Facilities in Operation. <https://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-operation>.
6. PTCOG - Patient Statistics. <https://ptcog.ch/index.php/patient-statistics>.
7. Hillbrand, M. et al. PO-0809: A 3D polymer gel dosimeter coupled to a patient-specific anthropomorphic phantom for proton therapy. *Radiother. Oncol.* 123, S432–S433 (2017).
8. Pappas, E. et al. OC-0454: End-to-end QA methodology for proton range verification based on 3D-polymer gel MRI dosimetry. *Radiother. Oncol.* 123, S242 (2017).
9. Winey, B. et al. Core physics competencies for proton therapy training of radiation oncology and medical physics residents and fellows. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 88, 971–972 (2014).
10. Rooney, M. K. et al. Simulation as More Than a Treatment-Planning Tool: A Systematic Review of the Literature on Radiation Oncology Simulation-Based Medical Education. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 102, 257–283 (2018).
11. Rabus, A., Kirby, M. C., Nasole, L. & Bridge, P. Evaluation of a VERT-based module for proton radiotherapy education and training. *J. Radiother. Pract.* 20, 139–143 (2021).