Mesa Redonda: Paciente pediátrico complejo

¿Qué tiene un protón que no tenga un fotón? Implicaciones en el paciente pediátrico

M. GARCÍA MARQUETA

Oncología Radioterápica. Hospital Universitario Marqués de Valdecilla. Santander, Cantabria.

RESUMEN

Introducción. La mejora en la supervivencia del cáncer infantil requiere intentar minimizar las secuelas de los tratamientos. La radioterapia tiene un papel clave en el tratamiento de muchos tumores pediátricos, aunque la irradiación de tejidos en desarrollo puede desencadenar importantes efectos adversos.

Desarrollo. Los protones depositan la mayor parte de su energía al final de su recorrido, con una marcada caída posterior (pico de Bragg). Esta distribución de dosis permite en casos seleccionados, reducir la irradiación de tejidos sanos en comparación a la radioterapia convencional, lo cual adquiere especial relevancia en pacientes jóvenes. La evidencia disponible respalda su utilidad en estos pacientes debido a su eficacia en el control tumoral y en la reducción de efectos agudos y tardíos de la radiación. Sin embargo, su administración requiere una infraestructura específica y equipos multidisciplinares especializados. En España, la creación de once salas en el Sistema Público de Salud supondrá un aumento drástico en la accesibilidad a la técnica. La creación de un Registro Único de Protonterapia permitirá generar evidencia prospectiva sobre resultados clínicos y efectos tardíos.

Conclusiones. La protonterapia ofrece ventajas dosimétricas especialmente relevantes en la población pediátrica. La expansión de la red pública y el registro multicéntrico representan oportunidades para ofrecer un acceso equitativo y evaluar su beneficio clínico a largo plazo en nuestra población.

Palabras clave: Oncología radioterápica; Protones; Tumores pediátricos; Pico de Bragg; Sistema Nacional de Salud.

WHAT DOES A PROTON HAVE THAT A PHOTON DOES NOT? IMPLICATIONS FOR THE PEDIATRIC PATIENT

ABSTRACT

Introduction. Improved survival in childhood cancer requires attempting to minimize treatment-related sequelae. Radiotherapy plays a key role in the treatment of many pediatric tumors, although the irradiation of growing tissues can trigger significant adverse effects.

Body. Protons deposit most of their energy at the end of their path, with a sharp dose fall-off known as Bragg peak. This dose distribution allows, in selected cases, a reduction in the irradiation of healthy tissues compared to conventional radiotherapy, which is of relevance in young patients. Available evidence supports its utility in these patients due to its efficacy in tumor control and the reduction of acute and late radiation effects. However, its acquisition and delivery requires dedicated infrastructure and specialized multidisciplinary teams. In Spain, the implementation of eleven facilities within the Public Health System will dramatically increase access to the technique. The creation of a National Proton Therapy Registry will generate prospective data on clinical outcomes and late effects.

Conclusions. Proton therapy offers dosimetric advantages that are particularly relevant in the pediatric population. The expansion of the public network and the multicenter registry represent opportunities to enhance equitable access and evaluate its long-term clinical benefit in our population.

Keywords: Radiation oncology; Protons; Pediatric malignancies; Bragg Peak; National Health System.

Correspondencia: marta.garcia2@scsalud.es

© 2026 Sociedad de Pediatría de Asturias, Cantabria, Castilla y León
Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Reconocimiento-No Comercial de Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es), la cual permite su uso, distribución y reproducción por cualquier medio para fines no comerciales, siempre que se cite el trabajo original.

https://doi.org/10.63788/9kr66y50

INTRODUCCIÓN

El cáncer en la infancia y adolescencia representa una entidad infrecuente, con una incidencia aproximada de entre 900 y 1000 nuevos casos anuales en España en los últimos años[1]. Los avances terapéuticos y el desarrollo de protocolos cooperativos multidisciplinares han contribuido a una mejora importante en la supervivencia de estos pacientes, con tasas de curación que superan actualmente el 80% en países con recursos asistenciales integrales[2].

El tratamiento del cáncer infantil y adolescente consiste habitualmente en la combinación de varias modalidades terapéuticas, entre las cuales la radioterapia constituye una herramienta muy poderosa de tratamiento local, particularmente en tumores no completamente resecables o con alto riesgo de recaída local. Muchos pacientes necesitarán recibir radioterapia con el objetivo de alcanzar la curación, algunos incluso a edades muy tempranas[1].

La administración de radiaciones ionizantes en el paciente pediátrico supone un reto adicional, dado que su organismo se encuentra en fase de desarrollo y crecimiento, lo cual le otorga una mayor susceptibilidad al daño tisular secundario al tratamiento. Múltiples factores individuales y relacionados con la propia enfermedad y tratamientos recibidos contribuyen a la aparición de efectos tardíos como déficit neurocognitivo, alteraciones del crecimiento, endocrinopatías, infertilidad, problemas psicosociales, y segundos tumores[2]. Dado que la mayoría de estos pacientes serán largos supervivientes, el desarrollo de herramientas terapéuticas menos dañinas es fundamental.

La radioterapia es un tratamiento individualizado y adaptado al paciente y a su enfermedad en términos de indicación (pre o postoperatoria, radical), dosis y fraccionamiento (duración del tratamiento, dosis por sesión), volumen de tratamiento (área a irradiar) y técnica (radioterapia de intensidad modulada o IMRT y radioterapia volumétrica modulada o VMAT, como tratamientos estándar; y radioterapia estereotáctica craneal o extracraneal, SRS, SBRT, y braquiterapia, como técnicas especiales). En este contexto, la radioterapia externa con protones (en adelante, protonterapia) permite en muchos casos una mayor protección de los tejidos sanos, teniendo una especial relevancia en volúmenes de tratamiento grandes y en pacientes jóvenes.

El objetivo de este trabajo es revisar las bases físicas e infraestructurales que diferencian la protonterapia de la radioterapia convencional con fotones, describir las particularidades del flujo de trabajo pediátrico en oncología radioterápica, exponer las indicaciones actualmente aceptadas por el Ministerio de Sanidad y analizar la transformación del mapa asistencial e investigador en España.

DESARROLLO

Propiedades físicas e interacción con la materia[3]

La principal diferencia entre la radioterapia externa convencional con fotones y la protonterapia reside en la naturaleza de la propia radiación y, consiguientemente, sus mecanismos de interacción con los tejidos.

- Los fotones son "cuantos" de radiación electromagnética, sin masa ni carga, y depositan la mayor parte de su energía a poca profundidad de la superficie corporal, cediéndola a lo largo de su trayectoria. De esta forma, los fotones depositan dosis de entrada en los tejidos previos al tumor y tienen una dosis de salida, a continuación del tumor. Para concentrar la dosis en el área de interés, los haces de fotones inciden desde diferentes áreas del paciente resultando en un baño de dosis baja o intermedia en los tejidos sanos.
- Los protones son un tipo de radiación corpuscular con masa y carga positiva. Su dosis cerca de la superficie es más baja y más o menos constante. A medida que interaccionan con los tejidos, su velocidad se reduce y la pérdida de energía se incrementa de forma exponencial al final de su recorrido o rango, cuando se detienen por completo, seguido de una caída brusca de la dosis. Este depósito de energía muy localizado recibe el nombre de pico de Bragg.

Infraestructura

Mientras que la radioterapia convencional con fotones se administra mediante equipos compactos (habitualmente aceleradores lineales de electrones) alojados en un bunker de dimensiones estándar para generar rayos X de alta energía, la protonterapia requiere una infraestructura de mayor complejidad y su consiguiente coste. Se requiere un acelerador de partículas (frecuentemente un ciclotrón o sincrotrón) que acelera y extrae los protones a energías muy elevadas (del orden de 230-250 MeV). Desde allí, el haz de protones es canalizado y transportado mediante tubos de vacío e imanes (*beam line*) hasta la sala de tratamiento. Una vez allí, una estructura mecánica móvil de grandes dimensiones (*gantry*) gira hasta 360 grados alrededor del paciente para dirigir el haz con una gran precisión geométrica[4].

Históricamente, las instalaciones de protonterapia precisaban edificaciones complejas y aisladas, con grandes aceleradores que alimentaban varias salas de tratamiento con *gantrys* de más de 100 toneladas. Sin embargo, en los últimos años se ha producido una evolución hacia la fabricación de aceleradores más compactos y hacia la implantación de unidades de sala única, lo cual ha permitido reducir de



Figura 1. Etapas del proceso radioterápico.

forma drástica las dimensiones de los equipos y el espacio requerido[5].

Justificación clínica en el paciente pediátrico

El depósito de dosis más localizado y la ausencia de dosis de salida característicos de la protonterapia permiten, en muchas ocasiones, reducir la dosis a órganos críticos próximos al área de tratamiento y el baño de dosis integral a los tejidos circundantes, disminuyendo así el riesgo de efectos secundarios y la probabilidad de tumores secundarios, lo cual supone una importante ventaja para la población pediátrica y adolescente.

La evidencia recopilada en los últimos años respalda su valor en la oncología pediátrica, no sólo en cuanto a eficacia terapéutica, sino optimizando significativamente los efectos derivados del tratamiento. En términos de control tumoral, diversos estudios prospectivos y registros multicéntricos han demostrado altas tasas de control local en tumores pediátricos como el rabdomiosarcoma parameníngeo[6], neuroblastoma de alto riesgo[7] y tumores óseos pélvicos y lumbares[8]. En cuanto a efectos secundarios agudos (durante el tratamiento radioterápico), la distribución de dosis característica de la protonterapia se tradujo en una reducción de efectos gastrointestinales, esofagitis y requerimientos transfusionales tras la irradiación craneoespinal con técnica de preservación vertebral[9]. Asimismo, se ha registrado un menor detrimento del perfil neurocognitivo e intelectual en pacientes con meduloblastoma tratados con protonterapia, observándose una mayor preservación de la memoria de trabajo y velocidad de procesamiento[10,11]. Si bien el coste inicial de implantación y equipamiento de una unidad de protonterapia es muy superior al de un acelerador de radioterapia convencional, estudios de evaluación farmacoeconómica en oncología pediátrica han reportado su costo-efectividad a largo plazo. Un estudio de modelización económica y análisis de años de vida ajustados por calidad en meduloblastoma concluyó que el sobrecoste inicial se vio compensado por el ahorro directo en costes sanitarios al prevenir o reducir la incidencia de secuelas tardías como déficits hormonales, hipoacusia, cardiopatías crónicas y segundas neoplasias[12]. Un estudio retrospectivo basado en más de 450.000 pacientes de la National Cancer Database en Estados Unidos, observó una reducción significativa del riesgo de segundas neoplasias entre los pacientes tratados con protonterapia en 9 localizaciones tumorales en comparación a la radioterapia convencional[13].

Flujo de trabajo en Oncología Radioterapia y su adaptación al paciente pediátrico

El proceso radioterápico se compone de una secuencia de etapas rigurosamente estandarizadas, que se muestran en la figura 1.

Para contribuir a la adherencia y buena tolerancia al tratamiento, es recomendable adaptar muchas de estas etapas al paciente pediátrico y su entorno. Para ello se requiere una estructura asistencial especializada y coordinada. El equipo multidisciplinar imprescindible se compone de

oncólogos pediatras, personal de enfermería con experiencia en oncología pediátrica, técnicos superiores de radioterapia con competencia en el trato infantil, anestesiólogos y personal de enfermería de reanimación pediátrica, oncólogos radioterápicos, radiofísicos hospitalarios, y dosimetristas con experiencia en protonterapia. Es de un gran valor añadido contar con el apoyo de profesionales como psico-oncólogos, trabajadores sociales, nutricionistas y equipos de voluntariado para el abordaje integral de los pacientes y sus familias.

En este contexto también cobran especial relevancia la humanización de los espacios (por ejemplo, con ambientación temática de las salas de espera, consultas y sala de tratamiento) y la preparación procedimental. En algunos países como Reino Unido se cuenta con la figura del *Play Specialist*, quien acompaña al paciente en todas las fases de tratamiento. Es habitual el empleo de juegos de rol, preparación con muñecos, peluches o gafas de realidad virtual para simular el tratamiento y su preparación.

Escenario actual en España y perspectiva de futuro

Históricamente, el acceso a la protonterapia para pacientes del SNS se realizaba mediante la derivación a centros internacionales (como Estados Unidos, Alemania, Suiza o Francia) o, desde 2019, mediante la derivación a las dos únicas salas operativas en dos centros privados de la Comunidad de Madrid. Debido a la limitada accesibilidad de la técnica y su elevado coste, su indicación en el SNS prioriza las patologías que cuentan con mayor evidencia en cuanto a ventaja dosimétrica y clínica. El marco regulatorio vigente queda fijado por la resolución del 4 de abril de 2025 de la Dirección General de Cartera Común de Servicios del SNS y Farmacia[14]. La tabla I recoge las indicaciones aprobadas en niños, adolescentes y adultos jóvenes; y la tabla II, las indicaciones en adultos.

Dicho documento establece unos criterios generales que han de cumplirse en todos los casos: la intención curativa del tratamiento, un buen estado general del paciente (ECOG

TABLA I. Indicaciones en niños, adolescentes y adultos jóvenes (hasta los 26 años).

SNC	No SNC
– Meduloblastomas – Ependimomas – Gliomas (con exclusión de gliomas de alto grado) – Tumores rabdoides/teratoides atípicos – Craneofaringiomas – Tumores de células germinales y pinealomas – Tumores del plexo coroideo	– Cordomas/condrosarcomas – Rabdomiosarcomas – Sarcomas Ewing – Sarcomas de partes blandas: parameníngeos, orbitarios, de cabeza y cuello, torácicos (si próximos a corazón o columna), abdominales (si próximos a hígado o riñón) y pélvicos. Se excluyen los localizados en extremidades – Osteosarcomas – Retinoblastomas – Linfomas mediastínicos, oculares y pélvicos – Neuroblastomas – Tumores de Wilms

TABLA II. Indicaciones en adultos.

Tumores oculares	– Melanoma intraocular/uveal (cuando no esté indicada la braquiterapia)
Tumores óseos y de partes blandas	– Cordoma y condrosarcoma – Sarcomas primarios paraespinales
Tumores de SNC e intracraneales	– Tumores primarios que precisen irradiación craneoespinal – Tumores primarios de base de cráneo que por morfología o tamaño no sean abordables con técnicas avanzadas de fotones. – Gliomas de bajo grado. (se valorarán como criterios de selección: expectativa vida mayor de 50% a 10 años, buen estado neurocognitivo, KS > 80%, reducción de dosis a cerebro supratentorial y/o ambos hipocampos superior a 5% tras comparación de planes) – Meningiomas y tumor fibroso solitario en ubicaciones críticas (cerca de las vías ópticas y del tronco encefálico), – no abordables con técnicas avanzadas de fotones
Tumores de cabeza y cuello	– Tumores de nasofaringe (estadios avanzados con afectación de base de cráneo) – Tumores de fosa nasal y senos paranasales – Tumores de glándulas salivares irresecables

0-1) y una expectativa de vida igual o superior a 5 años sin comorbilidades que la limiten.

Otras situaciones en las que puede valorarse el tratamiento con protonterapia son: pacientes con síndromes genéticos con elevado riesgo de efectos adversos o segundos tumores, casos de reirradiaciones en las que la comparación dosimétrica sea favorable respecto a otras opciones, pacientes embarazadas en las que la técnica permita reducir la dosis sobre el feto y pacientes menores de 40 años sin otras alternativas de preservación de fertilidad. Se espera una nueva actualización de estas indicaciones en 2027.

El panorama nacional está experimentando una llamativa transformación como resultado del acuerdo en 2021 entre el Ministerio de Sanidad, las Comunidades Autónomas y la Fundación Amancio Ortega, mediante el cual se donaron 280 millones de euros para la incorporación de 10 equipos de protonterapia en la sanidad pública. Sumados al proyecto autonómico de Cantabria, el SNS dispondrá de 11 salas públicas distribuidas por todo el territorio (Galicia, País Vasco, Cataluña, Comunidad Valenciana, Andalucía, Madrid y Canarias) para garantizar la equidad asistencial y la proximidad geográfica.

La unidad de Valdecilla se encuentra integrada en un hospital de tercer nivel y dentro del propio Servicio de Oncología Radioterápica existente, lo cual facilita el acceso a atención inmediata ante complicaciones agudas o emergencias y ofrece una solidez operativa al disponer de aceleradores de fotones que facilitan establecer y activar planes de contingencia inmediatos ante incidencias técnicas o paradas de mantenimiento del ciclotrón, minimizando interrupciones en los tratamientos.

Como es habitual en medicina, la puesta en marcha de la técnica va más allá de la adquisición tecnológica y conlleva un cierto grado de subespecialización. Su implementación involucra a múltiples especialistas como ingenieros, arquitectos, radiofísicos, médicos especialistas, enfermeros, técnicos, informáticos y personal administrativo y de gestión. De forma paralela a las obras de construcción, el personal involucrado está realizando cursos de capacitación y estancias formativas en centros de referencia nacional e internacional. Asimismo, se está diseñando un plan de formación a nivel nacional dirigido a los especialistas del resto de hospitales que derivarán a los pacientes (médicos referentes), con el fin de homogeneizar los criterios de selección y optimizar los circuitos de derivación.

En este contexto, el Ministerio de Sanidad y las Comunidades Autónomas han constituido el Registro Único de Protonterapia, un proyecto multicéntrico y prospectivo, obligatorio para todos los pacientes tratados en el SNS. Además, para gestionar el acceso equitativo a la técnica, se ha incorporado un algoritmo clasificador de las solicitudes de derivación basado en parámetros clínicos previamente consensuados. Se planea añadir al seguimiento clínico habitual la medición de resultados desde la perspectiva del paciente (PROMs y PREMs). Desde el principio se ha buscado mantener una alineación e interoperabilidad con los registros europeos ya existentes y en desarrollo[15,16]. Este registro representa una oportunidad científica para superar las limitaciones de los ensayos clínicos aleatorizados en patologías raras, como es el caso de la oncología pediátrica, y generar evidencia sobre los resultados a largo plazo de los tratamientos.

CONCLUSIONES

- El proceso radioterápico debe adaptarse a las necesidades de la población infantil y adolescente, precisando un abordaje holístico por un equipo multidisciplinar con experiencia.
- La protonterapia ofrece una ventaja física respecto a la radioterapia convencional con fotones gracias a su particular depósito localizado de energía, permitiendo reducir en muchos casos la dosis integral a los tejidos sanos, lo cual se traduce en un menor riesgo de efectos adversos.
- La última resolución de la Cartera Común de Servicios del Sistema Nacional de Salud de 2025 incluye tratamientos con intención curativa en niños, adolescentes y adultos jóvenes con buen estado general.
- La puesta en marcha de 11 salas de protonterapia en el Sistema Público español, junto con la articulación del Registro Único de Protonterapia, sitúan a nuestro país en una posición privilegiada para la transición hacia un modelo asistencial más equitativo y la generación de evidencia prospectiva de alta calidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Registro Español de Tumores Infantiles (RETI-SEHOP). Informes RETI-SEHOP: Cáncer infantil en cifras Internet]. Valencia: Universitat de València; citado 2 nov 2026]. Disponible en: https://www.uv.es/uvweb/registro-espanyol-tumores-infantiles-RETI-SEHOP/es/cancer-infantil-cifras/informes-reti-sehop-1285944920873.html.
2. Sultan I, Alfaar AS, Sultan Y, Salman Z, Qaddoumi I. Trends in childhood cancer: Incidence and survival analysis over 45 years of SEER data. PLoS One. 2025;20(1):e0314592. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314592.
3. Park SH, Kang JO. Basics of particle therapy I: Physics. Radiat Oncol J. 2011;29(3):135-46. https://doi.org/10.3857/roj.2011.29.3.135.
4. Collings EW, Lu L, Gupta N, Sumption MD. Accelerators, gantries, magnets and imaging systems for particle beam therapy:

Recent status and prospects for improvement. Front Oncol. 2022;11:737837. https://doi.org/10.3389/fonc.2021.737837.

5. Yan S, Ngoma TA, Ngwa W, Bortfeld TR. Global democratisation of proton radiotherapy. Lancet Oncol. 2023;24(6):e245-54. https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00184-5.
6. Doyen J, Jazmati D, Geismar D, Frisch S, Schleithoff SS, Vermeren X, et al. Outcome and patterns of relapse in childhood parameningeal rhabdomyosarcoma treated with proton beam therapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2019;105(5):1043-54. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2019.08.005.
7. Jazmati D, Butzer S, Hero B, Ahmad Khalil D, Merta J, et al. Proton beam therapy for children with neuroblastoma: Experiences from the prospective KiProReg registry. Front Oncol. 2021;10:617506. https://doi.org/10.3389/fonc.2020.617506.
8. Worawongsakul R, Steinmeier T, Lin YL, Bauer S, Hardes J, Hecker-Nolting S, et al. Proton therapy for primary bone malignancy of the pelvic and lumbar region - Data from the prospective registries ProReg and KiProReg. Front Oncol. 2022;12:805051. https://doi.org/10.3389/fonc.2022.805051.
9. Chou B, Hopper A, Elster J, Crawford JR, McConnell K, Chang A, et al. Volumetric de-escalation and improved acute toxicity with proton craniospinal irradiation using a vertebral body-sparing technique. Pediatr Blood Cancer. 2022;69(5):e29489. https://doi.org/10.1002/pbc.29489.
10. Kahalley LS, Peterson R, Ris MD, Janzen L, Okcu MF, Grosshans DR, et al. Superior intellectual outcomes after proton radiotherapy compared with photon radiotherapy for pediatric medulloblastoma. J Clin Oncol. 2020;38(5):454-61. https://doi.org/10.1200/JCO.19.01706.
11. Sienna J, Kahalley LS, Mabbott D, Grosshans D, Santiago AT, Paulino ADC, et al. Proton therapy mediates dose reductions to brain structures associated with cognition in children with medulloblastoma. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2024;119(1):200-7. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2023.11.035.
12. Lundkvist J, Ekman M, Ericsson SR, Jönsson B, Glimelius B. Cost-effectiveness of proton radiation in the treatment of childhood medulloblastoma. Cancer. 2005;103(4):793-801. https://doi.org/10.1002/cncr.20844.
13. Xiang M, Chang DT, Pollom EL. Second cancer risk after primary cancer treatment with three-dimensional conformal, intensity-modulated, or proton beam radiation therapy. Cancer. 2020;126(15):3560-8. https://doi.org/10.1002/cncr.32938.
14. Ministerio de Sanidad. Resolución del 4 de abril de 2025 de la Dirección General de Cartera Común de Servicios del SNS y Farmacia, por la que se hacen públicos los acuerdos de la Comisión de Prestaciones, Aseguramiento y Financiación sobre la actualización de las indicaciones de la Protonterapia en la Cartera Común de Servicios del SNS. Boletín Oficial del Estado. 2025.
15. Langendijk JA, Orecchia R, Haustermans K, Zips D, Balosso J, Lacombe D, et al. Prospective data registration and clinical trials for particle therapy in Europe. Radiother Oncol. 2018;128(1):9-13. https://doi.org/10.1016/j.radonc.2018.06.001.
16. Journy N, Bolle S, Brualla L, Dumas A, Fresneau B, Haddy N, et al. Assessing late outcomes of advances in radiotherapy for paediatric cancers: Study protocol of the "HARMONIC-RT" European registry (NCT 04746729). Radiother Oncol. 2024;190:109972. https://doi.org/10.1016/j.radonc.2023.109972.