

RADIOCIRUGÍA DE LA COLUMNA VERTEBRAL

Peter C. Gerszten

Departments of Neurological Surgery and Radiation Oncology. University of Pittsburgh Medical Center.
Pittsburgh, Pennsylvania, USA

RESUMEN

La radiocirugía en la columna vertebral representa una extensión lógica de la terapia de radiación actual al combinar altas dosis ajustadas con tecnología de guía por imagen. En la actualidad, la radiocirugía en la columna vertebral se considera una alternativa segura y efectiva a la cirugía abierta para diferentes tipos de tumores malignos y benignos. Los resultados se han fijado en mejorar la seguridad, los signos y síntomas de radiculopatía y mielopatía relacionados con la compresión de tumores, y aliviar el dolor. Los beneficios potenciales más importantes de la erradicación radioquirúrgica de lesiones dorsales suponen tratamientos más cortos, atención médica de consulta externa, recuperación breve y una buena respuesta clínica. Asimismo, la radiocirugía se puede utilizar como tratamiento primario de salvataje para pacientes con lesiones en las que no se recomiendan técnicas de cirugía abierta o como tratamiento adicional a ésta.

Palabras clave: cirugía guiada por imágenes, cirugía robótica, metástasis de columna, radiocirugía estereotáctica, tumores de columna

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la última década, las técnicas quirúrgicas mínimamente invasivas han evolucionado en el campo de la cirugía de columna vertebral¹. Dichas técnicas siguen la tendencia natural en cirugía, de minimizar lesiones en tejidos normales al mismo tiempo que obtienen los mismos resultados quirúrgicos o incluso mejores. De un modo similar, ha aumentado de manera significativa el interés en la aplicación de técnicas mínimamente invasivas en el campo de oncología espinal. Los tumores de columna vertebral y de médula espinal afectan aproximadamente a 180.000 pacientes cada año en Norteamérica. Durante la última década, la oncología quirúrgica espinal se ha centrado en nuevos enfoques quirúrgicos de la columna, la aplicación de nuevos instrumentos para su reconstrucción, varias formas de sistemas de radiación, y lo más importante, evitar complicaciones. Con frecuencia, los pacientes con tumores de columna vertebral con metástasis están debilitados y se encuentran expuestos a un alto riesgo de morbilidad quirúrgica. El impacto de complicaciones quirúrgicas con el empeoramiento de la calidad de vida que lo acompañan no es ideal para pacientes con pocas expectativas de vida a causa de la enfermedad subyacente.

Las opciones de tratamiento habitual para metástasis en la columna vertebral incluyen radioterapia, terapia con radiofármacos, radioterapia más quimioterapia sistémica, terapia hormonal o descompresión quirúrgica y/o estabilización seguida de radioterapia³. El papel de la terapia de radiación en el tratamiento de tumores con metástasis en la columna vertebral se encuentra bien definido y es a menudo, la modalidad de tratamiento inicial³⁻⁹. Los objetivos de la terapia local de radiación

en el tratamiento de tumores de la columna han sido la paliación del dolor, la prevención de la progresión de una enfermedad local y las posteriores fracturas patológicas, y la detención de la progresión en el daño neurológico o incluso revertirlo¹⁰. Normalmente, la cirugía se reserva para la inestabilidad de la columna o la subluxación, los déficits neurológicos a pesar de otras formas de terapia, y el dolor de difícil tratamiento atribuible a una lesión aislada.

El factor principal que limita la dosis para el control local de tumores vertebrales con radioterapia convencional es la relativa falta de tolerancia a la radiación de la médula espinal. La radioterapia convencional de haz externo carece de precisión para ofrecer grandes dosis de fracción única de radiación en los tumores vertebrales situados cerca de estructuras radiosensibles como la médula espinal. Es la escasa tolerancia de la médula a la radiación la que, a menudo, limita la dosis de tratamiento a un nivel que se encuentra muy por debajo de la dosis terapéutica óptima^{4,11,12}. Por lo tanto, no es extraño que los tumores vertebrales progresen o recidiven después de la radioterapia. El confinamiento preciso de la dosis de radiación al área que se debe tratar, como en el caso de la radiocirugía intracraneal, incrementaría las probabilidades de éxito en el control de tumores y en la respuesta clínica, y al mismo tiempo, se reduciría el riesgo de lesiones neurológicas adyacentes¹²⁻²⁰. La radiocirugía de la columna vertebral brinda un alto grado de radiación conformada que ofrece dosis capaces de erradicar tumores, al mismo tiempo que reduce la toxicidad sobre la médula espinal en pacientes apropiados.

HISTORIA DE LA RADIOCIRUGÍA DE LA COLUMNA VERTEBRAL

La radiocirugía se define como la aplicación de una dosis grande de radiación de forma muy precisa en un área localizada mediante un procedimiento estereotáctico²¹. Esta técnica se utiliza mucho actualmente como

medio efectivo con el fin de controlar tumores intracraneales benignos y malignos²²⁻²⁸. La radiocirugía estereotáctica ha demostrado ser un tratamiento efectivo para la metástasis cerebral, ya sea con radioterapia parcial o total en el cerebro, con una media de control del 85% al 95%^{24,25}. En el pasado, la radiocirugía estereotáctica se limitaba a tratar enfermedades intracraneales, ya que sólo se podía conseguir la localización exacta gracias a un marco quirúrgico fijado al cráneo del paciente. El marco actúa como sistema de referencia inicial para proporcionar una localización exacta y una aplicación cuidadosa de la dosis de radiación. La radiocirugía intracraneal es práctica ya que las lesiones se encuentran dentro del cráneo, y éste se puede inmovilizar fácilmente y con rigidez con un marco estereotáctico.

En las lesiones de la columna se ven afectados uno o más segmentos vertebrales. Sin embargo, las técnicas de radiocirugía estereotáctica para lesiones vertebrales desarrolladas hace una década, que utilizaban aceleradores lineales estándar, requerían la colocación de un sistema de marcos rígidos externos directamente en la columna y, por lo tanto, no se adoptó para el uso general. Muchos centros han intentado aplicar radiación ajustada a grandes fracciones en lesiones vertebrales empleando diferentes tecnologías^{12,15-21,29-37} desde que Hamilton et al²⁹ describieron por primera vez en 1995 la posibilidad de la radiocirugía estereotáctica vertebral con acelerador lineal. La técnica emergente de la radiocirugía en la columna vertebral representa una extensión lógica de la terapia de radiación más moderna y actual. Esta técnica ha demostrado recientemente ser precisa, segura y eficaz para los tumores de la columna vertebral^{12, 15, 16, 18-21, 29-33, 38}. Los desarrollos tecnológicos recientes, que incluyen imágenes en tres dimensiones (3D) para la localización y planificación del tratamiento, el advenimiento de la radioterapia con intensidad modulada (IMRT en inglés), y un mayor grado de precisión para alcanzar dosis apropiadas conservando intacto el tejido adyacente, han permitido expandir las aplicaciones de la radiocirugía al tratamiento de lesiones malignas y benignas de la región paravertebral y cuerpos vertebrales, así como de áreas intradurales e incluso intramedulares.

TOLERANCIA DE LA MÉDULA ESPINAL A LA RADIACIÓN Y A LA RADIOCIRUGÍA

Las lesiones de la médula espinal causadas por radiación, o mielitis, suponen una de las complicaciones más temidas relacionadas con la radiación de la columna vertebral. Existe poca experiencia clínica en lo que se refiere a la tolerancia de la médula espinal a altas dosis por fracción, y los resultados en el caso de una única dosis no se encuentran bien definidos^{20,39}. Por lo tanto, todavía se depende de los datos clínicos derivados de las series de irradiación de haz externo en las que se irradia el espesor completo de la médula espinal. Emami et al⁴⁰ estimaron la dosis total (DT) 5/5 (la dosis total con la que existe una probabilidad del 5% de mielitis necrotizante a los cinco años de tratamiento) es

5 Gy, 5 Gy y 4,7 Gy para longitudes de la médula espinal de 5, 10 y 20 cm respectivamente en fraccionamiento convencional. Estos niveles de dosis se basan en estimaciones que se deducen de datos que datan de 1948 y que se han adoptado ampliamente en la práctica clínica. Tradicionalmente, se ha confirmado que la tolerancia a la radiación con fraccionamiento convencional es de 45 a 50 Gy con el fin de reducir el riesgo de necrosis en la médula espinal. Una dosis de 45 a 50 Gy en fraccionamiento convencional (de 1,8 a 2 Gy por fracción) se encuentra dentro de los límites de tolerancia a la radiación de la médula espinal (DT 5/5). Existen casos en los que se ha proporcionado un único tratamiento de 8 Gy en un segmento grande de médula espinal sin aparecer mielopatía^{41,42}.

Al revisar los casos de 172 pacientes tratados con radioterapia fraccionada (múltiples sesiones de tratamiento) en la médula cervical y torácica en la *University of California*, San Francisco (con dosis total de 40 a 70 Gy fraccionada a lo largo de un período de 2-3 semanas), Wara et al⁴³ confirmaron que se produjeron nueve casos de mielopatía por radiación. Tres de los nueve pacientes presentaban problemas neurológicos leves en la médula espinal sin síntomas significativos a largo plazo. La longitud de la médula espinal expuesta a la radiación varió de 4 a 22 cm. Hatlevoll et al⁴⁴ investigaron los casos de 387 pacientes con carcinoma bronquial tratados con un régimen dividido de radiación a lo largo de varios días que utilizaba grandes fracciones únicas. Diecisiete pacientes desarrollaron mielitis por radiación con una dosis media total de 38 Gy. Kim et al⁵ informaron sobre siete pacientes con mielopatía transversa de un grupo de 109 pacientes tratados con radioterapia definitiva para cánceres situados en la cabeza y el cuello con una dosis total de 57 a 62 Gy en un área media de 10x10 cm. Abbattucci et al⁴⁵ encontraron 8/203 casos de mielopatía por radiación al trabajar con una dosis total de 54 a 60 Gy en la médula cervical y en la médula torácica. McCunniff et al⁴⁶ sólo encontraron un caso de mielopatía por radiación entre 652 pacientes que fueron sometidos a más de 60 Gy utilizando fraccionamiento convencional. Phillips et al⁴⁷ informaron de tres casos de mielitis transversa de los 350 pacientes que padecían de tumores en el tórax tratados con una dosis de radiación total de 33 a 43,5 Gy.

PLAN DE TRATAMIENTO Y DOSIS

El procedimiento de radiocirugía de la columna vertebral se puede dividir en cuatro componentes distintos: 1) inmovilización y/o posicionamiento para guía por imágenes; 2) tomografía computarizada (TAC) para planear el tratamiento y la reproducción de radiografías reconstruidas digitalmente (DRR en inglés); 3) plan de dosis de radiación y 4) la dosis real proporcionada. La radiocirugía vertebral se puede llevar a cabo sin ningún problema en una clínica de consulta externa. La prescripción del tratamiento incluye cuantificación de *volumen y dosis*. Se deben identificar en el plan tanto el volumen crítico del tumor en el blanco del tratamiento

con irradiación (CTV en inglés) como los órganos críticos que se deben evitar. Un equipo constituido por un cirujano, un técnico especialista en radioterapia oncológica y un radiofísico conciben todos y cada uno de los planes de tratamiento radioquirúrgicos para la columna vertebral. El plan de tratamiento se diseña para cada caso, basándose en la geometría del tumor, la proximidad a la médula espinal y la localización del tumor. La lesión se delimita con las imágenes de la TAC o con la capacidad de fusión de una resonancia magnética (IRM). Es decir, se puede dibujar el contorno de la lesión sobre una imagen de una resonancia, que ofrece una mejor resolución anatómica. Se utiliza una técnica de "plan de tratamiento inverso" de manera que el tumor recibe la dosis máxima permisible con la restricción de la dosis de tolerancia máxima de la médula espinal, así como de otras estructuras de importancia como el intestino delgado y los riñones.

La dosis de radiación en el tumor se determina basándose en su histología, la tolerancia de la médula espinal y la previa exposición a la radiación de tejidos normales, especialmente de la médula espinal. Todavía no se ha experimentado lo suficiente con la radiocirugía de la columna vertebral para establecer normas sobre dosis ideales para este tipo de técnicas de tratamiento. Algunos centros han administrado dosis de 6 a 30 Gy en una a cinco fracciones^{16,17,20,48-50}. La dosis para tumores se mantiene de 12 a 20 Gy en el 80% de la línea dibujada en el límite del volumen que se quiere tratar en el caso de terapia de fracción única. La dosis intratumoral máxima oscila entre los 15 y los 30 Gy. Una dosis máxima de 20 Gy o de 16 Gy en el margen del tumor parece proporcionar un buen control de éste y pocos riesgos de sufrir lesiones por radiación en la médula espinal o la cola de caballo³⁷. Se ha asociado un incremento del riesgo de radiculitis con una dosis biológica equivalente de más de 60 Gy. Sin embargo, las dosis y los programas de fraccionamiento varían un poco dependiendo del centro clínico. En la literatura, se encuentran programas publicados que incluyen una dosis máxima de 20 Gy aplicada en cinco fracciones^{16,18,50}, una dosis ordinaria de 21 Gy en tres fracciones⁵¹, 30 Gy en cinco fracciones^{13,17} y un refuerzo de 6 a 8 Gy tras una irradiación convencional (25 Gy en 10 fracciones)²⁰.

En cada caso de radiocirugía vertebral, se delimita la médula espinal o la cauda equina como una estructura de vital importancia, y se define el canal espinal al nivel de la cauda equina. Por lo tanto, el volumen crítico supone el canal espinal completo al nivel de la cauda equina y no el tejido neural real. En lo que se refiere a la radiocirugía de fracción única, se recomienda que la dosis máxima en la médula espinal se mantenga por debajo de 10 Gy, aunque, para la cauda equina, la dosis máxima segura puede que ronde un poco por encima, hasta 14 Gy aproximadamente. Aunque estos límites en las dosis son bastante conservadores en lo que se refiere a la auténtica tolerancia de la médula espinal y de la cola de caballo, dada la naturaleza catastrófica de la mielitis por radiación, es prudente dar una menor

cantidad. Normalmente, la dosis máxima para la médula espinal se proporciona a una pequeña parte de ésta, mientras que la dosis media es de 4 Gy.

POSICIÓN DEL PACIENTE Y TÉCNICAS DE INMOVILIZACIÓN

Las dos mayores dificultades que se deben superar para de la radiocirugía de la columna vertebral son la localización de la zona y su correspondiente inmovilización. El lugar donde se va a colocar al paciente para el tratamiento es esencial, por ello debe ser preciso y de confianza. Se han utilizado varios enfoques para adoptar una posición correcta e inmovilizar a los pacientes, así como en la técnica de cómo proporcionar radiación en la columna de un modo radioquirúrgico. Hamilton et al²⁹ adoptaron un enfoque parecido al que se utiliza para la radiocirugía intracraneal, en la que se coloca un sistema de referencia externo rígido en la estructura ósea del paciente. Al paciente se le realizó una TC en posición prona con el marco quirúrgico, durante la que se delineó la zona exacta y se localizó el isocentro dentro del sistema de coordenadas del marco quirúrgico. A continuación se colocó el marco sobre la camilla del acelerador lineal y se llevó a cabo el tratamiento con el paciente inmovilizado.

A partir de la experiencia inicial de la radiocirugía de la columna con marcos quirúrgicos, se han desarrollado múltiples técnicas sin marco, con éxito. En el *MD Anderson Cancer Center* (Houston, Tejas) se desarrolló un sistema casi simultáneo de radioterapia estereotáctica e imágenes con TACs que integra un escáner de TAC mediante rieles, con un acelerador lineal. Se inmoviliza a los pacientes en posición supina a través del vacío dejado en una especie de colchón con almohadilla que se moldea al cuerpo con una cubierta de plástico. Tras realizarse la TC se traslada a los pacientes directamente a la camilla del acelerador lineal para tratamiento con el sistema de rieles¹³.

El *Memorial Stereotactic Body Frame (MSBF)* se desarrolló en el *Memorial Sloan-Kettering Cancer Center* (Nueva York) y también emplea la inmovilización externa mediante unas placas de presión. A los pacientes se les realiza una TAC cuya unidad se encuentra en la misma sala del acelerador lineal. Cuando se utiliza de un modo únicamente estereotáctico, el uso de un marco corporal no invasivo no puede garantizar que la zona exacta quede inmovilizada del todo para evitar la irradiación en la médula espinal. Por este motivo, se requiere alguna forma de guía por imagen en el momento del tratamiento. Al utilizar el MSBF, se registra de forma automática la TAC previa al tratamiento de 2mm de grosor por corte, junto con la TAC del tratamiento empleando puntos de referencia óseos. Un segundo registro del sistema de referencia en los escáneres del tratamiento y los anteriores a éste permite determinar el margen de error de posición del paciente en el marco corporal. Finalmente, se realiza una verificación de la posición para el tratamiento a partir de la comparación de las imágenes de TAC en 3D e imágenes portales

ortogonales con radiografías reconstruidas digitalmente del estudio TC de planeamiento inicial⁵⁰.

La unidad del *Novalis Shaped-Beam Surgery (Brain-LAB, Westchester, Illinois)* es una máquina especializada de tratamiento que emplea un acelerador lineal de 6 megavoltios (mV) equipada de un colimador de microhojas múltiples que utiliza unidades de rayos X en sala y detectores digitales de panel plano de silicón amorfa. Este sistema genera dos radiografías reconstruidas digitalmente del escáner de simulación de TC con la misma orientación que las dos imágenes de rayos X (keV). A continuación, el sistema compara de manera automática las estructuras internas de las imágenes de kV con las reconstruidas de manera digital, y luego ajusta la posición del paciente basándose en cualquier desviación isocéntrica⁴⁹.

El *CyberKnife Image-Guided Radiosurgery System® (Accuray, Inc., Sunnyvale, California)* cuenta con un acelerador lineal compacto de 6mV que es más pequeño y ligero que los aceleradores lineales utilizados en radioterapia convencional (Fig. 1). Sus pequeñas dimensiones permiten que sea montado en un manipulador robotizado de seis ejes controlado por ordenador, lo que facilita una gama mucho más amplia de orientaciones para el haz, que la de los aparatos de radioterapia convencionales. Se ajustan ortogonalmente (90°) dos



Fig. 1. El CyberKnife radiosurgical system (Accuray, Inc., Sunnyvale, California). Nótese las dos pantallas de silicón amorfa colocadas ortogonalmente a la camilla de tratamiento. La camilla puede moverse para posicionar los puntos de referencia delante de las cámaras. Se detecta una referencia radiográfica con la ayuda de guía por imagen en tiempo real. Se comunica a través de un aro de control en tiempo real la posición medida como se ve en las dos cámaras a un manipulador robotizado que dirige el haz al objetivo exacto.

cámaras de rayos X de diagnóstico para adquirir imágenes en tiempo real de la anatomía interna del paciente durante el tratamiento. Las imágenes son procesadas para identificar rasgos radiográficos (puntos óseos de referencia o marcas implantadas) y luego se comparan automáticamente con la TAC del paciente utilizada para el planeamiento. La posición exacta del tumor es comunicada a través de un circuito de tiempo real a un manipulador robótico que orienta el haz de radiación hacia el blanco elegido³¹.

Existen tecnologías más nuevas que incorporan un enfoque un poco diferente sobre los problemas de movimiento y deformación de los órganos internos e incertidumbres del quirófano. El *Elekta Synergy S (Elekta, Inc., Atlanta, Georgia)* fue el primer acelerador lineal controlado digitalmente con mejoras en la terapia de radiación guiada por imagen, y que permite la adquisición de imágenes de volumen en 3D de alta definición durante el tratamiento con el paciente ya en la posición correcta. La máquina combina un acelerador lineal con un sistema de imagen de volumen de 3D totalmente incorporado que permite que el área de tratamiento exacta se visualice en el momento preciso del tratamiento mientras el paciente se encuentra listo en la camilla. Luego, la camilla realiza de forma automática los ajustes necesarios en la posición del paciente con el fin de asegurar que se dirija la radiación de manera precisa (Fig. 2).

INDICACIONES CLÍNICAS PARA LA RADIOCIRUGÍA DE LA COLUMNA VERTEBRAL

Las indicaciones de la radiocirugía para lesiones vertebrales están evolucionando y seguirán haciéndolo



Fig. 2. El Synergy S (Elekta, Inc., Atlanta, Georgia) combina un acelerador lineal con un sistema de imagen de volumen de 3D totalmente incorporado que permite que el área de tratamiento exacta se visualice en el momento preciso del tratamiento mientras el paciente se encuentra listo en la camilla. Luego, la camilla realiza de forma automática los ajustes necesarios en la posición del paciente con el fin de asegurar que se dirija la radiación de manera precisa.

conforme incrementa la experiencia clínica, como ocurrió en la pasada década con sus indicaciones para lesiones intracraneales. La tabla 1 resume las lesiones más aptas para radiocirugía de la columna vertebral, mientras que la tabla 2 resume algunas de las indicaciones básicas para este tipo de cirugía. La radiocirugía vertebral puede aplicar radiación en cualquier sitio de la columna, ya sea extradural o intradural. Las mejores lesiones para este tratamiento pueden considerarse aquellas que requerirán abordajes quirúrgicos difíciles para una resección adecuada. Serían candidatos pacientes con diferentes e importantes tipos de comorbilidad que impiden una intervención quirúrgica abierta o con expectativa de vida relativamente corta que los marca como no apropiados para la cirugía. Otro parámetro para establecer quién puede ser un buen candidato sería el caso de tratar de detener la progresión de un tumor que puede acabar en inestabilidad de la columna o problemas neurológicos. La radiocirugía, empleada como terapia inicial, puede reducir la necesidad de tener que utilizar radiación de nuevo, ya que mejora el control de los tumores si se compara con las técnicas convencionales.

La indicación más frecuente para el tratamiento de tumores vertebrales es el dolor, y también lo es como indicación para radiocirugía de la columna en más del 70% de los casos. Es bien sabido que la radiación es un tratamiento efectivo para el dolor asociado a enfermedades de la columna. Se ha demostrado que la radiocirugía vertebral es muy efectiva al tratar el dolor relacionado con tumores, con una mejora a largo plazo total del dolor en 374 de los 435 casos (86%) dependiendo de la histopatología primaria³⁷. Se demostró la mejora del

dolor a largo plazo en el 96% de mujeres con cáncer de mama, el 96% de casos con melanoma, el 94% de casos con carcinomas renales, y el 93% de los casos con cáncer de pulmón⁵²⁻⁵⁴. Normalmente, el dolor disminuye algunas semanas, en ocasiones días, después del tratamiento. La radiocirugía de la columna vertebral también actúa de forma efectiva sobre el dolor radicular causado por la compresión de tumores de raíces nerviosas adyacentes.

La publicación más exhaustiva hasta el momento sobre control del dolor y mejoría de la calidad de vida tras la radiocirugía vertebral ha sido la del *Georgetown University Hospital*⁵¹. Se demostró con estadísticas que la radiocirugía mejoraba el control del dolor y mantenía la calidad de vida con un seguimiento de hasta 24 meses empleando escalas visuales análogas (VAS en inglés) sobre el nivel del dolor y una encuesta de salud de 12 puntos (SF-12). Pocos pacientes presentaron complicaciones a corto plazo, y éstas eran de poca importancia. El grupo del *Memorial Sloan Kettering* demostró un 90% de paliación de síntomas con un seguimiento de 12 meses como promedio y otros informan mejorías semejantes del dolor^{12, 5, 17-20, 55}.

La radiocirugía de la columna vertebral se utiliza con frecuencia para tratar la progresión radiográfica de tumores después del fallo de los tratamientos de irradiación convencionales o después de cirugía. La mayoría de estas lesiones se ha tratado con radiación con dosis significativas para la médula espinal, lo que impide continuar con ese tratamiento. La radiocirugía vertebral se emplea frecuentemente para tratar lesiones en las que ya se han utilizado otras formas de radiación y, actualmente, este tipo de cirugía se usa a menudo como técnica de "rescate" para aquellos casos en los que no son apropiadas ni la radiación convencional, ni la cirugía abierta. La lesión ideal debe estar bien circunscrita de manera que se pueda delinear para el plan de tratamiento. El control radiográfico a largo plazo de tumores con metástasis en una serie de 500 casos fue del 88% en general³⁷. El control radiográfico de los tumores fue diferente dependiendo de la patología primaria: mama (100%), pulmón (100%), riñón (87%) y melanoma (75%). Yamada et al⁵⁰ informaron de una media de control radiográfico a largo plazo del 90%, y otros han obtenido resultados similares^{12, 16-18, 49, 51}. Es probable que la técnica se adopte como tratamiento inicial para encarar las metástasis en la columna en ciertos casos (ej: oligometástasis) conforme se vaya adquiriendo más experiencia, como ocurrió en la pasada década con la evolución de la radiocirugía para la metástasis intracraneal.

Las lesiones resistentes a la radiación (ej. células renales, sarcoma) que ya se han completado con irradiación de haz externo pueden tratarse con radiocirugía como sistema de refuerzo. Otras lesiones se han tratado sólo con radiocirugía, y muchas de estas lesiones son de pacientes que ya están siendo tratados por una lesión sintomática. Las segundas lesiones asintomáticas se trataron con radiocirugía para evitar más radiación en los elementos neurológicos y la supresión de la médula

Tabla 1. Lesiones ideales para la radiocirugía de la columna vertebral

- Lesiones bien circunscriptas
- Problemas de médula espinal mínimos
- Lesiones a las que ya se les ha administrado radiación
- Lesiones resistentes a la radiación que mejorarían con un refuerzo radioquirúrgico
- Tumor residual después de cirugía
- Lesiones quirúrgicas recurrentes
- Lesiones que requieren enfoques quirúrgicos complicados
- Corta expectativa de vida como criterio de exclusión para una intervención de cirugía abierta
- Diferentes tipos de morbilidad significativa que impiden una intervención de cirugía abierta
- Sin signos evidentes de inestabilidad vertebral

Tabla 2. Indicaciones para radiocirugía de la columna vertebral

- Dolor
- Modalidad de tratamiento primario
- Prevención de progresión de tumores
- Refuerzo con radiación para tumores radioresistentes
- Déficit neurológico progresivo
- Tratamiento de tumores residuales después de cirugía
- Progresión postoperatoria de tumores

ósea. Los beneficios de esta opción incluyen un único tratamiento con una dosis mínima de radiación en los tejidos adyacentes normales. Además, se puede aplicar una dosis radiobiológica mucho más grande que con radiación de haz externo. Se demostró que, en general, al utilizarse en modalidad de tratamiento primario, se ejerce control de tumores a largo plazo con imágenes de seguimiento en el 90% de los casos (en metástasis de mama, pulmón, riñón, y el 75% de metástasis de melanoma)^{37,52,53}. Degen et al⁵¹ informaron de un 100% de media en control de tumores en lesiones que no se habían tratado con radiación. Los tumores resistentes a la radiación (ej. carcinoma de riñón, melanoma, sarcoma) se pueden tratar con radiocirugía vertebral tras irradiación convencional con o sin terapia de radiación con intensidad modulada como tratamiento de refuerzo con los mismos resultados en control radiográfico a largo plazo. Ryu et al^{20,50} encontraron que esto suponía un paradigma de tratamiento muy efectivo.

La radiocirugía de la columna vertebral se puede utilizar en pacientes con déficit neurológico progresivo cuando se estima que una intervención quirúrgica abierta no es apropiada. En la mayoría de estos pacientes, ya se ha empleado radiación convencional en la lesión vertebral sintomática. Según nuestra experiencia, 36 de 42 pacientes (86%) con déficit neurológico progresivo experimentaron al menos una leve mejora clínica³⁷. En la mayoría de estos casos no era posible la descompresión quirúrgica abierta debido a varios tipos de morbilidad médica. Yamada informó del 90% y 92% de la paliación de síntomas en pacientes tratados por debilidad y parestesias respectivamente⁵⁰. Degen informó que en una serie de sujetos el nivel de déficit neurológico mejoró en 16 pacientes, no hubo cambios en 24 y empeoró en 11⁵¹.

Si se elimina un tumor sólo parcialmente durante una cirugía abierta, la radiocirugía se puede emplear para tratar el tumor residual más adelante, y como terapia postoperatoria tras reseca un tumor epidural que causaba una gran compresión en la médula espinal. Este tipo de tumores se puede eliminar con el fin de procurar una descompresión inmediata, se pueden emplear instrumentación de la columna para ofrecer estabilidad si es necesario, y el resto del tumor se puede tratar de manera segura más tarde con radiocirugía, lo que disminuye la morbilidad quirúrgica. El tratamiento con radiocirugía se puede emplear sin demora, a menudo en cuestión de días, ya que se aplica una dosis mínima de radiación en la piel y tejido subcutáneo que, no afecta el proceso de cicatrización. No existe necesidad de modificar la incisión que se realiza durante la cirugía abierta, y el material de fijación de la columna se puede colocar sin preocupaciones a pesar de que se vaya a utilizar la radiocirugía más tarde. El volumen específico que se debe tratar no es problema, cualquiera sea la posición o cantidad de material de fijación alrededor del tumor. Es posible entonces, que el enfoque actual de estas lesiones cambie, debido a la efectividad de la radiocirugía. Los procedimientos de abordaje anterior se podrán evitar en ciertos casos mediante la

descompresión e instrumentación posterior, seguidos de radiocirugía para la lesión anterior. Estos tratamientos se pueden administrar sin demoras durante el postoperatorio, dado el rápido declive de la dosis para el área a tratar, en vez de tener que esperar como se debe hacer con la radiación de haz externo.

Es muy probable que la cirugía abierta para tratar metástasis en la columna evolucione como ocurrió en los casos de lesiones intracraneales malignas, aliviando el déficit neurológico y disminuyendo la morbilidad quirúrgica. Rock et al⁵⁶ evaluaron de manera específica la combinación del procedimiento de cirugía abierta seguida de radiocirugía de refuerzo, y llegaron a la conclusión de que suponía un paradigma de tratamiento asociado con una probabilidad significativa de estabilizar o mejorar la función neurológica, así como de buena tolerancia y con poca o ninguna morbilidad. Nuestra institución también ha encontrado que la radiocirugía combinada con la cirugía abierta es un excelente tratamiento para eliminar el lecho residual del tumor.

En el caso de los tumores benignos en la columna y la radioterapia existe menos experiencia. La radiocirugía se ha empleado con éxito para tratar lesiones intradurales extramedulares como los schwannomas, los neurofibromas y los meningiomas con una respuesta excelente a largo plazo, parecida a la experiencia con la radiocirugía intracraneal⁵⁷. En nuestra institución, con la experiencia de 73 tumores intradurales extramedulares benignos en la columna, se demostró una mejora a largo plazo del dolor en el 73% de los casos y el control radiográfico a largo plazo de los tumores en todos los casos. Aunque la extirpación quirúrgica sigue siendo la opción primaria de tratamiento para la mayoría de tumores benignos, se ha observado que la radiocirugía presenta beneficios clínicos a corto plazo para este tipo de lesiones, y se determinará su eficacia a largo plazo con seguimiento ulterior. Asimismo, se definirá su papel en pacientes con neurofibromatosis con más experiencia clínica. También se han tratado malformaciones arteriovenosas⁵⁸, y lo que es más importante, se ha demostrado que la radiocirugía de la columna es muy segura con las dosis que se utilizan actualmente, incluso para las lesiones intramedulares. Teóricamente, es posible que exista el riesgo de que con la radiocirugía los tumores benignos se transformen en malignos, sin embargo, nunca se ha informado de que esto haya ocurrido.

POSIBLES VENTAJAS DE LA RADIOCIRUGÍA DE LA COLUMNA VERTEBRAL

La radiocirugía cuenta con varias ventajas sobre otros tratamientos alternativos.

La radiocirugía de la columna evita la necesidad de aplicar radiación en grandes segmentos de la médula espinal y la dosis de radiación en los tejidos circundantes es mínima.

Con un tratamiento temprano de radiocirugía esteoreotáctica para lesiones de la columna, se pueden evitar

procedimientos vertebrales extensos para conseguir descompresión y fijación en este tipo de pacientes, que ya se encuentran débiles de por sí.

También se puede aplicar una dosis radiobiológica mucho más grande comparada con la de radiación de haz externo y se puede evitar la necesidad de irradiar grandes segmentos de la columna vertebral, lo que hace que disminuyan las reservas de médula ósea de los pacientes oncológicos.

Al evitar la cirugía abierta y preservar la función de la médula ósea el proceso de la quimioterapia resulta más fácil en los pacientes oncológicos.

Además, la mejora del control local, como en el caso de la radiocirugía intracraneal, se podría traducir en una paliación más efectiva y una tasa mayor de supervivencia.

Es posible que, si la experiencia clínica lo avala, la radiocirugía inicial se utilice de manera más habitual, como en casos de pacientes con metástasis sintomática única en la columna con un historial de resistencia a la radiación.

La radiocirugía se puede emplear para tratar lesiones a las que se les ha aplicado previamente radiación convencional de haz externo.

Una ventaja de tratar al paciente con radiocirugía de fracción única es que el tratamiento se completa en un solo día, en vez de varias semanas, lo que puede beneficiar a pacientes con expectativa de vida limitada o con dificultades de transporte a una instalación de tratamiento con radiación si se utiliza una terapia prolongada de fraccionamiento diario.

La radiación de fraccionamiento único puede presentar más ventajas que la radioterapia fraccionada en algunos tumores, como los carcinomas renales. Actualmente, se está investigando la radiobiología de la radioterapia de grandes fracciones en determinados tumores. La respuesta clínica, como el dolor o la mejora del déficit neurológico, podría ser más rápida con técnicas de radiocirugía. Esta rápida respuesta clínica está siendo bien documentada en publicaciones revisadas por pares^{15,51}. Finalmente, cabe destacar que el procedimiento es mínimamente invasivo y se puede llevar a cabo en consulta externa.

Actualmente, la radiocirugía de la columna vertebral es factible, segura y clínicamente efectiva para el tratamiento de diversos tumores vertebrales utilizando una amplia variedad de tecnologías diferentes, y supone una extensión lógica de la terapia de radiación más moderna.⁵⁹ Cuenta con la capacidad de mejorar sustancialmente (utilizaríamos la palabra significativamente si estuviéramos hablando de estadísticas) el control local de cáncer en la columna, lo que se puede traducir en una mejor paliación. Las posibles ventajas más importantes de la eliminación de lesiones vertebrales con radiocirugía son el relativamente corto plazo de tratamiento en consulta externa y un posible mejor control local del tumor con un riesgo mínimo de efectos secundarios; sin embargo, se deben realizar más estudios que confirmen estos beneficios. La radiocirugía de la columna ofrece una nueva e importante modalidad

terapéutica alternativa para el tratamiento de metástasis en la columna en pacientes a los que no se puede operar o no son buenos candidatos para ello, a los que se les ha administrado radiación en el tumor anteriormente, los que presentan lesiones que no son apropiadas para técnicas de cirugía abierta, o como método de tratamiento coadyuvante a ésta.

Bibliografía

- Horn E, Henn J, Lemole J, GM. Thoracoscopic placement of dual-rod instrumentation in thoracic spinal trauma. **Neurosurgery** 2004; 54: 1150-4.
- Vitaz T, Oishi M, Welch W, Gerszten LC, Disa JJ, Bilisky MH. Rotational and transpositional flaps for the treatment of spinal wound dehiscence and infections in patient populations with degenerative and oncological disease. **J Neurosurgery Spine** 2004; 100: 46-51.
- Gerszten PC, Welch WC. Current surgical management of metastatic spinal disease. **Oncology (Huntington)** 2000; 14: 1013-36.
- Faul CM, Flickinger JC. The use of radiation in the management of spinal metastases. **J Neurooncol** 1995; 23: 149-61.
- Kim YH, Fayos JV. Radiation tolerance of the cervical spinal cord. **Radiology** 1981; 139: 473-8.
- Markoe AM, Schwade JG. The role of radiation therapy in the management of spine and spinal cord tumors. En: Rea GL, ed. **Spine tumors** American Association of Neurological Surgeons; 1994; 23-35.
- Shapiro W, Posner JB. Medical vs surgical treatment of metastatic spinal cord tumors. En: Thompson R, ed. **Controversies in Neurology** New York: Raven Press; 1983: 57-65.
- Sundaresan N, Krol G, Digiacinto CV. Metastatic tumors of the spine. In: Sundaresan B SH, Schiller AL, Rosenthal DL, ed. **Tumors of the Spine** Philadelphia: W.B. Saunders; 1990: 279-304.
- Sundaresan N, Digiacinto GV, Hughes JEO, Cafferty M, Vallejo A. Treatment of neoplastic spinal cord compression: Results of a prospective study. **Neurosurgery** 1991; 29: 645-50.
- Lu C, Stomper PC, Drislane FW, Wen PY, Block CC, Humphey CC et al. Suspected spinal cord compression in breast cancer patients: A multidisciplinary risk assessment. **Breast Cancer Research and Treatment** 1998; 51: 121-31.
- Loblaw DA, Laperriere NJ. Emergency treatment of malignant extradural spinal cord compression: An evidence-based guideline. **Journal of Clinical Oncology** 1998; 16: 1613-24.
- Ryu S, Chang S, Kim D. Image-guided hypo-fractionated stereotactic radiosurgery to spinal lesions. **Neurosurgery** 2001; 49: 838-46.
- Shiu AS, Chang EL, Ye J-S. Near simultaneous computed tomography image-guided stereotactic spinal radiotherapy: An emerging paradigm for achieving true stereotaxy. **Int J Rad Onc Biol Phys** 2003; 57: 605-13.
- Amendola B, Wolf A, Coy S, Amendola M, Blode L. Gamma knife radiosurgery in the treatment of patients with single and multiple brain metastases from carcinoma of the breast. **Cancer Journal** 2000; 6: 372-6.
- Benzil DL, Saboori M, Mogilner AY, Rocchio R, Moorthy CR. Safety and efficacy of stereotactic radiosurgery for tumors of the spine. **J Neurosurgery** 2004; 101: 413-8.
- Bilisky MH, Yamada Y, Yenice KM, Lovelock M, Hunt M, Gutin PH, et al. Intensity-modulated stereotactic radiotherapy of paraspinal tumors: A preliminary report. **Neurosurgery** 2004; 54: 823-30.
- Chang EL, Shiu AS, Lii M-F, Rhines LD, Mendel E, Mahajan A, et al. Phase I clinical evaluation of near-simultaneous computed tomographic image-guided stereotactic body radiotherapy for spinal metastases. **Int J Rad Onc Biol Phys** 2004; 59: 1288-94.
- Desalles AA, Pedrosa A, Medin P, Agazaryan N, Solberg T, Cabatan-Awng C, et al. Spinal lesions treated with Novalis shaped beam intensity modulated radiosurgery and stereotactic radiotherapy. **J Neurosurgery** 2004; 101: 435-40.
- Milker-Zabel S, Zabel A, Thilmann C, Schlegel W, Wannemacher M, Debus J. Clinical results of retreatment of vertebral bone metastases by stereotactic conformal radiotherapy and intensity-modulated radiotherapy. **Int J Rad Onc Biol Phys** 2003; 55: 162-7.
- Ryu S, Yin FF, Rock J. Image-guided and intensity-modulated radiosurgery for patients with spinal metastasis. **Cancer** 2003; 97: 2013-8.

21. Yin FF, Ryu S, Ajlouni M, Yan H, Jin JY, Lee SW, et al. Image-guided procedures for intensity-modulated spinal radiosurgery. **J Neurosurgery** 2004; 101: 419-24.
22. Auchter R, Lamond J, Alexander E. A multinstitutional outcome and prognostic factor analysis of radiosurgery for resectable single brain metastasis. **Int J Rad Onc Biol Phys** 1996; 35: 27-35.
23. Chang S, Adler J, Hancock S. The clinical use of radiosurgery. **Oncology** 1998; 12: 1181-91.
24. Flickinger J, Kondziolka D, Lunsford L. A multi-institutional experience with stereotactic radiosurgery for solitary brain metastasis. **Int J Rad Onc Biol Phys** 1994; 28: 797-802.
25. Kondziolka D, Patel A, Lunsford L. Stereotactic radiosurgery plus whole brain radiotherapy vs radiotherapy alone for patients with multiple brain metastases. **Int J Rad Onc Biol Phys** 1999; 45: 427-34.
26. Loeffler J, Alexander EI. Radiosurgery for the treatment of intracranial metastasis. New York: McGraw-Hill; 1993.
27. Loeffler JS, Kooy HM, Wen PY, Fine HA, Chen CWQ, Mannarino EG, et al. The treatment of recurrent brain metastases with stereotactic radiosurgery. **J Clinical Oncology** 1990; 8: 576-82.
28. Sperduto P, Scott C, Andrews D. Stereotactic radiosurgery with whole brain radiation therapy improves survival in patients with brain metastases: Report of radiation therapy oncology group phase III study 95-08. **Int J Rad Onc Biol Phys** 2002; 54: 3.
29. Hamilton A, Lulu B, Fosmire H, Stea B, Cassady JR. Preliminary clinical experience with linear accelerator-based spinal stereotactic radiosurgery. **Neurosurgery** 1995; 36: 311-9.
30. Chang S, Adler J. Current status and optimal use of radiosurgery. **Oncology** 2001; 15: 209-21.
31. Gerszten PC, Welch WC. Cyberknife radiosurgery for metastatic spine tumors. **Neurosurgery Clinics of North America** 2004; 15: 491-501.
32. Medin P, Solberg T, DeSalles A. Investigations of a minimally invasive method for treatment of spinal malignancies with linac stereotactic radiation therapy: Accuracy and animal studies. **Int J Rad Onc Biol Phys** 2002; 52: 1111-22.
33. Ryu S, Rock J, Rosenblum M, Kim JH. Patterns of failure after single-dose radiosurgery for spinal metastasis. **J Neurosurgery** 2004; 101: 402-5.
34. Colombo F, Pozza F, Chiarego G. Linear accelerator radiosurgery of cerebral arteriovenous malformations: An update. **Neurosurgery** 1994; 34: 14-21.
35. Hitchcock E, Kitchen G, Dalton E, Pope B. Stereotactic linac radiosurgery. **British J of Neurosurgery** 1989; 3: 305-12.
36. Pirzkall A, Lohr F, Rhein B. Conformal radiotherapy of challenging paraspinal tumors using a multiple arc segment technique. **Int J Rad Onc Biol Phys** 2000; 48: 1197-1204.
37. Gerszten PC, Burton SA, Ozhasoglu C. Single fraction radiosurgery for spinal metastases: Clinical experience in 500 cases from a single institution. **Spine** 2007; 32(2):193-9.
38. Isacson U. Potential advantages of protons. **Radiother Oncol** 1997; 45: 63-70.
39. Pieters RS, Niemierko A, Fullerton BC, Munzenrider JE. Cauda equina tolerance to high dose fractionated irradiation. **Int J Rad Onc Biol Phys** 2006; 64: 251-7.
40. Emami B, Lyman JT, AB. Tolerance of normal tissue to therapeutic irradiation. **Int J Radiat Oncol Biol Phys** 1991; 21: 109-22.
41. Tong D, Hendrickson F. The palliation of symptomatic osseous metastases: final results of the study by the radiation therapy oncology group. **Cancer** 1982; 50: 893-9.
42. Gerszten PC, Bilsky MH. Spine radiosurgery. **Contemporary Neurosurgery** 2006; 28: 1-8.
43. Wara WM, Phillips TL, Sheline GE, Schwade JG. Radiation tolerance of the spinal cord. **Cancer** 1975; 35: 1558-62.
44. Hatlevoll R, Host H, Kaalhus O. Myelopathy following radiotherapy of bronchial carcinoma with large single fractions: A retrospective study. **Int J Radiat Oncol Biol Phys** 1983; 9: 41-4.
45. Abbattucci JS, Delozier T, Quint R, Roussel A, Brune D. Radiation myelopathy of the cervical spinal cord: Time, dose and volume factors. **Int J Radiat Oncol Biol Phys** 1978; 4: 239-48.
46. McCuniff AJ, Liang MJ. Radiation tolerance of the cervical spinal cord. **Int J Radiat Oncol Biol Phys** 1989; 16: 675-8.
47. Phillips TL, Buschke F. Radiation tolerance of the thoracic spinal cord. **AJR Am J Radiol** 1969; 105: 659-64.
48. Klisch MD, Watson GA, Shrieve DC. Radiation and intensity-modulated radiotherapy for metastatic spine tumors. **Neurosurg Clin N Am** 2004; 15: 481-90.
49. Rock JP, Ryu S, Yin FF. Novalis radiosurgery for metastatic spine tumors. Neurosurgery Clinics of North America. 2004; 15: 503-9.
50. Yamada Y, Lovelock M, Yenice KM, Bilsky MH, Hunt MA, Zatzky J, et al. Multifractionated image-guided and stereotactic intensity modulated radiotherapy of paraspinal tumors: A preliminary report. **Int J Rad Onc Biol Phys** 2005; 62: 53-61.
51. Degen JW, Gagnon GJ, Voyadzis J-M, McRae DA, Lunsden M, Dietrich S, et al. Cyberknife stereotactic radiosurgical treatment of spinal tumors for pain control and quality of life. **J Neurosurg Spine** 2005; 2: 540-9.
52. Gerszten PC, Burton S, Ozhasoglu C, Vogel WJ, Welch WC, Baar J, et al. Stereotactic radiosurgery for spine metastases from renal cell carcinoma. **Journal of Neurosurgery: Spine** 2005; 3: 288-95.
53. Gerszten PC, Burton S, Welch WC, Brufsky AM, Lembersky BC, Ozhasoglu C, et al. Single fraction radiosurgery for the treatment of breast metastases. **Cancer**. 2005; 14: 2244-54.
54. Gerszten PC, Burton SA, Quinn AE, Agarwala SS, Kirkwood JM. Radiosurgery for the treatment of spinal melanoma metastases. **Stereotact Funct Neurosurg** 2006; 83: 213-21.
55. Ryken TC, Meeks SL, Pennington EC, Hitchon P, Traynelis V, Maryr NA, et al. Initial clinical experience with frameless stereotactic radiosurgery: Analysis of accuracy and feasibility. **Int J Rad Onc Biol Phys** 2001; 51: 1152-8.
56. Rock J, Ryu S, Shukairy MS, Yin FF, Sharif A, Schreiber F, et al. Postoperative radiosurgery for malignant spinal tumors. **Neurosurgery** 2006; 58: 891-8.
57. Dodd RL, Ryu MR, Kammerdsupaphon P, Gibbs JC, Chang SD Jr, Adler JR Jr. Cyberknife radiosurgery for benign intradural extramedullary spinal tumors. **Neurosurgery** 2006; 58: 674-85.
58. Sinclair J, Chang SD, Gibbs IC, Adler JR Jr. Multisession Cyberknife radiosurgery for intramedullary spinal cord arteriovenous malformations. **Neurosurgery** 2006; 58(6): 1081-9.
59. Yamada Y, Lovelock DM, Bilsky MH. A review of image-guided intensity-modulated radiotherapy for spinal tumors. **Neurosurgery** 2007; 61: 226-35.

ABSTRACT

Spine radiosurgery represents a logical extension of the current state-of-the-art radiation therapy of combining highly conformal dose delivery with image guidance technology. Spine radiosurgery is now considered to be a safe and effective alternative to open surgery for a variety of both benign and malignant spinal tumors. Outcomes have focused on improvement in pain scores, safety, and alleviating the signs and symptoms of radiculopathy and myelopathy related to tumor compression. The major

potential benefits of radiosurgical ablation of spinal lesions are short treatment times, delivery in an outpatient setting, rapid recovery, and good clinical response. Radiosurgery may also be utilized as a primary treatment for some lesions, as a salvage treatment for patients or lesions not amenable to open surgical techniques, or as an adjunct to open surgery.

Key words: *image-guided surgery, robotic surgery, spine metastases, spine tumors, stereotactic radiosurgery*