

# Radiocirugía y radioterapia estereotáxica. Lineamientos del Colegio Mexicano de Cirugía Neurológica

Ramiro del Valle Robles,<sup>1</sup> Patricia Rojas Castillo,<sup>2</sup> Juan Ortiz Retana,<sup>2</sup> Salvador Ruiz González,<sup>1</sup> Luis Pérez Eupierre,<sup>1</sup> Miguel A. Pérez Pastenes,<sup>2</sup> Ernesto Gómez González,<sup>3</sup> Miguel Celis López,<sup>1</sup> José Jaramillo Magaña,<sup>4</sup> Eduardo Hernández Bernal,<sup>4</sup> Vicente Ramírez Castañeda,<sup>1</sup> Moisés Castillo Meza,<sup>2</sup> Armando Fernández Orozco,<sup>3</sup> Marco Zenteno Castellanos,<sup>5,8</sup> Roberto Corona Cedillo,<sup>5,8</sup> Angel Lee Aguirre,<sup>5,8</sup> Jorge Vázquez Lamadrid,<sup>8</sup> Manuel Martínez López,<sup>8</sup> Josué Estrada Valdés,<sup>6</sup> Adrián Rojas Hernández,<sup>7</sup> Alejandro Calvo Fernández,<sup>7</sup> Carlos Patarroyo González,<sup>1</sup> Abel Cuevas Solórzano,<sup>1</sup> Marco Barajas Romero,<sup>1</sup> Vinicio Toledo Buenrostro,<sup>3</sup> Gabriel Rodríguez Hernández,<sup>2</sup> Ana García Vera,<sup>6</sup> Cristina Vázquez Aceves,<sup>7</sup> Andrea Velazco Vázquez,<sup>2</sup> José Suárez Campos,<sup>3</sup> Ernesto Martínez Duhart,<sup>1</sup> Octavio Salazar Castillo,<sup>1</sup> Fabiola Peralta Olvera,<sup>1</sup> Aurora Aldana Herrero,<sup>2</sup> Angel Martínez Ponce de León,<sup>1,5</sup> Gustavo Villarreal Reyna,<sup>1,5</sup> Ricardo Valenzuela Romero,<sup>1</sup> Salvador de Anda Ponce de León.<sup>1</sup>

## RESUMEN

La radiocirugía consiste en la administración de altas dosis de radiación ionizante en fracción única a volúmenes cerebrales pequeños y bien definidos por medio de localización estereotáxica y la administración de múltiples haces de radiación angosta y convergente en un punto. La radioterapia estereotáxica tiene las mismas bases, con la excepción de que las dosis aplicadas son fraccionadas y que puede aplicarse a estructuras extracraneales. La radiocirugía fue desarrollada hace más de 30 años por el neurocirujano Lars Leksell de Suecia, sin embargo, fue hasta 1995 que se inició su aplicación en México. Actualmente existen siete centros en operación en nuestro país y hasta el momento no existe normatividad específica que regule este tipo de tratamientos ni organismo que certifique el entrenamiento de los profesionales que participan en los mismos. Por tal motivo, se ha formado recientemente la Sección de Radiocirugía y Radioterapia Estereotáxica del Colegio Mexicano de Cirugía Neurológica, la cual ha reunido a expertos y miembros del Colegio para emitir recomendaciones básicas para la operación de los centros que practican la radiocirugía y/o radioterapia estereotáxica. Se presentan los requisitos mínimos para la instalación y operación de un centro de radiocirugía y/o radioterapia estereotáxica, los perfiles de los profesionistas que participan en los procedimientos, los programas de control de calidad propuestos, así como el equipamiento mínimo de acuerdo con la modalidad de tratamiento. También se comentan algunas ventajas y advertencias sobre el uso de la radioterapia con intensidad modulada (RTIM) y los magnetos de alta intensidad.

**Palabras clave:** radiación ionizante, control de calidad, dosis única, fraccionamiento de la dosis, intracraneal, extracraneal, dinámica, intensidad modulada, estereotaxia, resonancia magnética.

Rev Mex Neuroci 2003; 4(1):27-36

## Stereotactic radiosurgery and radiotherapy: Guidelines of the Mexican College of Neurological Surgery

### ABSTRACT

Radiosurgery is the delivery of high doses of ionizing radiation in a single fraction to a small and well-delineated brain volumes located stereotactically and through multiple narrow radiation beams converging to a point. Stereotactic radiotherapy has the same basis, except that the dose is fractionated and can be delivered to extracranial structures. Lars Leksell, neurosurgeon from Sweden, developed Radiosurgery more than 30 years ago; however, its application in Mexico began until 1995. There are seven centers in operation in our country and at this time, there is not specific normativity or organization certifying training of professionals involved in this procedures. Therefore, a Stereotactic Radiosurgery and Radiotherapy section of the Mexican College of Neurological Surgery has been formed recently and gathered experts and other college members to provide the basic recommendations for the operation of stereotactic radiosurgery and radiotherapy centers. Minimum requirements for installation and operation of a radiosurgery and/or stereotactic radiotherapy center, the profile of professionals involved in the treatment, proposed quality control programs and minimal equipment according to treatment modality are presented. Some advantages and warnings about intensity-modulated radiation therapy and high strength magnetic fields are also discussed. **Keywords:** Ionizing radiation, quality control, single dose, dose fractionation, intracranial, extracranial, dynamic, intensity modulated, stereotaxy, magnetic resonance.

Rev Mex Neuroci 2003; 4(1):27-36

1 Neurocirugía  
2 Física médica  
3 Radioterapia

4 Neuroanestesiología  
5 Neurorradiología y terapia  
endovascular

6 Enfermería neuroquirúrgica  
7 Tec. en radioterapia  
8 Radiología y resonancia magnética

## ANTECEDENTES

Desde el origen del hombre, la humanidad ha estado expuesta a diferentes tipos de radiación ionizante.

Alrededor de 14% de la radiación nuclear que recibe el hombre corresponde al uso en medicina y el resto proviene del entorno natural al cual nos exponemos todos. La proporción mayor de radiactividad natural proviene del radón en el aire con 50%, la radiación gamma desde la tierra con 14%, desde alimentos y bebidas como fuente interna en 11.5% y ocupacional alrededor del 0.3%.<sup>1</sup>

Los rayos X y los rayos gamma son las radiaciones electromagnéticas de onda corta más utilizadas para el diagnóstico y tratamiento en medicina por su capacidad de daño al ionizar las moléculas de los núcleos celulares. Desde que los rayos X fueron descubiertos en 1895, sus efectos favorables y dañinos se han estudiado con gran detalle.

Durante la primera mitad del siglo XX el uso de radiación ionizante para diagnóstico médico y el abuso para destrucción masiva al final de la Segunda Guerra Mundial, permitió avances muy significativos en el conocimiento de los efectos biológicos, los cuales pueden medirse en forma anticipada a corto, mediano y largo plazos.

Una de las principales aportaciones ha sido la necesidad de regular en forma muy estricta toda actividad relacionada con la posesión y uso de fuentes de radiación ionizante.<sup>2</sup>

## DEFINICIÓN

En los años 60 del siglo pasado, cuando aún persistían índices altos de morbimortalidad en las cirugías cerebrales, el neurocirujano sueco Lars Leksell desarrolló la radiocirugía gamma (Gamma Knife, Elekta Co.) para controlar algunos trastornos psiquiátricos y movimientos anormales, sin la necesidad de abrir el cráneo.<sup>3</sup> Este procedimiento consiste en la administración de altas dosis de radiación ionizante en fracción única a volúmenes cerebrales pequeños y bien definidos por medio de localización estereotáxica y la administración de múltiples haces de radiación angosta y convergente en un punto. La radioterapia estereotáxica tiene las mismas bases, con la excepción de que las dosis aplicadas están fraccionadas y pueden aplicarse a estructuras extracraneales. Por su naturaleza, estos procedimientos requieren de un alto grado de control de calidad, además de profesionistas bien preparados y entrenados para los procedimientos de radiocirugía y radioterapia estereotáxica, así como contar con equipamiento e instalaciones adecuadas. Actualmente existen varias aplicaciones de la radiocirugía, entre las cuales se encuentran la unidad Leksell Gamma Knife (rayos gam-

ma), el ciclotrón o acelerador de partículas (iones pesados y protones) y los aceleradores lineales de electrones dedicados o modificados (rayos X de alta energía). Dichas modalidades de tratamiento se administran generalmente bajo anestesia local y con pocas horas de hospitalización.

## RADIOCIRUGÍA Y RADIOTERAPIA ESTEREOTÁXICA

Debido a los buenos resultados obtenidos alrededor del mundo, en México se inició la radiocirugía en mayo de 1995 con el bisturí de rayos gamma y en octubre de 1998 con el acelerador lineal.

En México solamente existen en funcionamiento las modalidades de *Gamma Knife*, acelerador lineal modificado y para fines de este año se espera el inicio de operaciones del primer acelerador lineal dedicado a radiocirugía y radioterapia estereotáxica y que incluye capacidad para radioterapia con intensidad modulada. Actualmente existen tres centros hospitalarios privados y cuatro gubernamentales que aplican tratamientos de radiocirugía (dosis única) y radioterapia estereotáxica (dosis fraccionada). Sólo un centro opera fuera del área metropolitana.

Al día de hoy no existe normatividad oficial para este tipo de tratamientos, por lo que con representación multiinstitucional se formó la Sección de Radiocirugía y Radioterapia Estereotáxica del Colegio Mexicano de Cirugía Neurológica en el año 2001.

El control de calidad en radiocirugía y radioterapia estereotáxica involucra una serie de procedimientos clínicos y técnicos, así como un grupo multidisciplinario que participa en el tratamiento, en el cual se incluye a médicos neurocirujanos, radioterapeutas, neurorradiólogos, físicos médicos, neuroanestesiólogos, técnicos en radioterapia y personal de enfermería.

Los especialistas involucrados en la selección de la indicación clínica del tratamiento deben estar familiarizados con todas las opciones de tratamiento, quirúrgicas y no quirúrgicas, sobre la base de un análisis individual de riesgos y beneficios para cada paciente en particular, ya que de lo contrario persistirán las tendencias de ofrecer la modalidad de tratamiento que el especialista domina o prefiere, sin anteponer la necesidad del paciente.

Un centro de radiocirugía y/o de radioterapia estereotáxica debe cumplir, independientemente de la modalidad, con ciertos requisitos antes del arranque clínico y durante la operación normal del servicio.

Los requisitos mínimos que se recomiendan son:

1. Realizar el cálculo y diseño de blindajes para la sala de tratamiento de acuerdo con las caracte-

terísticas del equipo y el tipo de radiación que produce.<sup>2</sup>

2. Obtener autorización para la construcción de la sala de tratamiento por parte del órgano regulador nacional, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), especificando las características de los blindajes con el cálculo correspondiente, sistemas de seguridad y de emergencia en la sala de tratamiento.<sup>2</sup>
3. Construir la sala de acuerdo con la autorización emitida por la CNSNS. La sala debe estar equipada con sistema de video e intercomunicación con el paciente, monitor de radiación, paros de emergencia, indicadores luminosos de radiación y letreros de seguridad de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) aplicables. Se recomienda que la sala de tratamiento tenga facilidades para anestesia y monitoreo cardiorrespiratorio para los pacientes pediátricos, psiquiátricos y con movimientos involuntarios.
4. Obtener licencia de operación ante la CNSNS.<sup>2</sup> En el caso del *Gamma Knife*, se debe obtener licencia de operación para equipo que contiene material radiactivo (Cobalto 60). En el caso de acelerador lineal modificado, si ya se cuenta con licencia de operación para tratamientos de radioterapia, se deberá solicitar modificación a la licencia para incluir la aplicación en tratamientos de radiocirugía y radioterapia estereotáxica. En el caso de aceleradores lineales dedicados, la licencia deberá obtenerse específicamente para radiocirugía y radioterapia estereotáxica, con blindajes específicos para RTIM. Esta licencia debe estar vigente en todo momento que el servicio esté en operación.
5. Contar o desarrollar el manual de procedimientos y las constancias de medición del rango de confianza en la precisión de las imágenes digitalizadas de tomografía, angiografía y resonancia magnética.<sup>3</sup>

El cálculo del grado de distorsión de las imágenes de resonancia magnética requiere especial atención, debido a que por factores físicos inherentes a la no homogeneidad de los tejidos y su interacción con el campo magnético con el que trabaja cada centro, todos los equipos de resonancia magnética tienen valores diferentes de distorsión espacial.<sup>4, 5, 6</sup>

En el uso de la angiografía por sustracción digital deberá considerarse el factor de distorsión, debido a la conversión de analógica a digital de las imágenes originales de rayos X, lo cual produce imágenes curvas, además del factor de magnificación. Dicho fenómeno deberá compensarse con sistemas (*software*) específicos para la corrección, o bien hacer una compa-

ración de las imágenes de la angiografía analógica convencional con las imágenes obtenidas mediante sustracción digital, quedando a criterio de los operarios, en caso de discrepancia, si la definición de las estructuras vasculares es geoméricamente confiable.<sup>7</sup>

Si el plan de tratamiento se diseña sobre imágenes distorsionadas espacialmente, el tratamiento con altas dosis de radiación ionizante se aplicaría físicamente fuera del objetivo correcto.<sup>8-11</sup> Es bien conocido que si un centro de radiocirugía no cuenta con todos los equipos modernos de imagenología, no podrá diferenciar correctamente las estructuras sanas de las anormales.

6. Los perfiles y funciones del personal entrenado y certificado para realizar los procedimientos son los siguientes:

#### **Médico neurocirujano**

Una vez que el neurocirujano haya acreditado su especialidad ante el Consejo Mexicano de su especialidad, deberá también acreditar su entrenamiento y experiencia clínica en radiocirugía de acuerdo con los lineamientos del Colegio Mexicano de Cirugía Neurológica en su sección de Radiocirugía y Radioterapia Estereotáxica, la cual está integrada por todas las especialidades médicas y profesionales que concurren en la realización de los procedimientos de radiocirugía y radioterapia estereotáxica.

Dichos lineamientos consideran fundamentalmente que el neurocirujano esté familiarizado con las técnicas de planeación quirúrgica estereotáxica, así como la acreditación del curso de seguridad radiológica para personal ocupacionalmente expuesto, impartido por una institución o empresa autorizada por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

Deberá también acreditar por lo menos un curso de introducción a la radiocirugía correspondiente al tipo de unidad de radiación de la cual sea operario.

Además del curso de introducción a la radiocirugía, deberá acreditar un número no menor de 50 tratamientos de radiocirugía y/o radioterapia estereotáxica, ya sea como director o asistente de las planeaciones de los tratamientos y que incluyen aquellos planes de tratamiento en los que haya participado durante el o los cursos de introducción a la radiocirugía y/o radioterapia estereotáxica.

Todo lo anterior acredita al profesional de la neurocirugía como un especialista capacitado para seleccionar las indicaciones y contraindicaciones clínicas de la radiocirugía y la radioterapia es-

tereotáctica, al tener que definir y diseñar un plan de tratamiento que considere la neuroanatomía, neurofisiología y radiobiología de las lesiones y tejidos sanos, en conjunto con el radioterapeuta, neurorradiólogo y físico, con especial interés en el análisis de todas las opciones de tratamiento sobre una base del estudio de los riesgos y beneficios para cada paciente en particular, debiendo quedar perfectamente explicado, en el consentimiento informado, las expectativas de éxito y eventuales complicaciones.

### **Médico radioterapeuta**

Tener título universitario de la especialidad, estar certificado por el Consejo Mexicano en Radioterapia; experiencia y entrenamiento en radiocirugía.

La función del médico radioterapeuta es discutir el caso clínico con el resto del grupo de profesionales de radiocirugía, indicar la dosis al volumen objetivo y las dosis máximas a estructuras críticas, dependiendo del diagnóstico, volumen de tratamiento y localización. Deberá discutir con el neurocirujano y el físico médico la distribución de la dosis para obtener el tratamiento óptimo.

### **Médico Neurorradiólogo**

Para participar en las técnicas de radiocirugía, el neurorradiólogo deberá acreditar la especialización en Radiología y estudios de postgrado en Neurorradiología, con lo cual deberá estar capacitado para el diagnóstico de aquellos problemas susceptibles de tratamiento con radiocirugía. Sin embargo, cuando las imágenes de rayos X, tomografía axial, angiografía cerebral y resonancia magnética se utilizan para administrar un tratamiento de radiocirugía, se requiere que el neurorradiólogo esté familiarizado con la definición espacial (estereotáctica) de los objetivos donde se ha de aplicar la radiación, así como profundos conocimientos de anatomía de las estructuras sanas que rodean el objetivo de tratamiento.

Actualmente la resonancia magnética ha permitido uno de los mayores avances para la definición anatómica y funcional tanto de las estructuras sanas como de diversas patologías.

En el caso de las malformaciones arteriovenosas, existen dos tipos de procedimientos, dependiendo de los cuales el neurorradiólogo deberá contar con un entrenamiento formal. Para procedimientos de angiografía diagnóstica, después de cursar la especialidad de radiología, debe acreditar un entrenamiento formal en neurorradiología por lo menos de dos años en una institución reconocida y experiencia mínima de 100 procedimientos angiográficos diagnósticos. En el caso de los procedimientos de angiografía terapéutica, además de

ser neurorradiólogo, neurólogo o neurocirujano, deberá contar con un entrenamiento formal en neurorradiología intervencionista (terapia endovascular neurológica), al menos de dos años en una institución reconocida, además de contar como mínimo con una experiencia de 500 procedimientos angiográficos diagnósticos y 50 embolizaciones. El neurorradiólogo debe dominar las técnicas de cateterización superselectiva de los vasos cerebrales cuando se requiera definir anatómica y funcionalmente en forma precisa las arterias cerebrales sanas así como las arterias malformadas.

### **Médico neuroanestesiólogo**

Será capaz, al finalizar su adiestramiento, de laborar en cualquier centro hospitalario que cuente con un servicio de cirugía general, cuidados intensivos y radiocirugía y podrá participar activamente en la elaboración de programas para el manejo integral de los pacientes a su cargo. En estas circunstancias, participará en la difusión de los conocimientos que adquirió durante su entrenamiento en neuroanestesiología para proporcionar un aspecto normativo integral para la aplicación a corto plazo de los conocimientos adquiridos, con el consecuente avance evolutivo de la especialidad.

Además, deberá tener habilidades en el manejo de pacientes de todas las edades, en el manejo de la vía aérea en situaciones especiales y aplicar sus conocimientos para la ventilación mecánica en situaciones donde la permanencia física del anestesiólogo no es posible; conocer los principios físicos de la Resonancia Magnética, la Tomografía Computada, Angiografía por sustracción digital, los diversos equipos de Radiocirugía y de los sistemas de estereotaxia más comunes aplicados a este tipo de procedimientos; conocer y aplicar los principios básicos de protección radiológica, higiene radiológica y sus consecuencias. Conocer y aplicar los procedimientos ante situaciones de urgencia radiológica y/o urgencia médica en casos de exposición ionizante ocupacional; conocer y aplicar la fisiopatología asociada a los traslados de pacientes bajo anestesia general a los diferentes sitios durante la aplicación de cualquier tratamiento radioquirúrgico; tener habilidades en el manejo de pacientes durante procedimientos invasivos de terapia neurovascular tanto en el diagnóstico como el tratamiento. Contar con la certificación correspondiente y demostrar fehacientemente su entrenamiento en cualquiera de estas áreas, así como mantener el nivel de entrenamiento requerido para su ejercicio.

### **Físico médico**

El físico médico que participa en los proyectos

deberá tener título profesional en el área de físico-matemáticas, con experiencia en el uso médico de las radiaciones ionizantes, especialmente en la calibración de equipos, planeación de tratamientos y protección radiológica en radioterapia. Además de estos requisitos, el físico deberá aprobar un curso de introducción a la radiocirugía acreditado por los fabricantes del sistema de radiocirugía y/o radioterapia estereotáxica.

El físico deberá acreditar su experiencia y entrenamiento ante el Colegio Mexicano de Cirugía Neurológica en la Subsección de Física Médica de la Sección de Radiocirugía y Radioterapia Estereotáxica. La función del físico médico inicia desde la aceptación del sistema de radiocirugía después de su instalación y la caracterización de los haces de radiación para la configuración del sistema de planeación. Deberá desarrollar e implementar el programa de garantía de calidad que incluye verificaciones periódicas del equipo de radiocirugía del sistema de planeación y la calibración radiológica completa. Durante los tratamientos, el físico deberá estar presente durante todo el procedimiento y vigilar los parámetros que pudieran afectar la exactitud del tratamiento: mediciones del contorno craneal, distorsión de imágenes, definición de las imágenes en el espacio estereotáxico y parámetros de tratamiento. Deberá participar con los médicos neurocirujanos y radioterapeutas en la planeación del tratamiento y la revisión final del mismo.

#### **Técnico radioterapeuta**

Deberá tener título de técnico en radiología, entrenamiento y experiencia en radioterapia y protección radiológica, entrenamiento en el manejo de los equipos de radiocirugía.

La función del técnico radioterapeuta será la de colaborar con el físico médico durante las verificaciones necesarias al equipo de radiocirugía previas al tratamiento de acuerdo con la modalidad y participar durante los tratamientos en la operación general del equipo.

#### **Personal de enfermería**

Deberá tener el título de licenciatura en enfermería, ser especialista en el área neuroquirúrgica, así como tener conocimientos básicos en procedimientos y cirugías basadas en estereotaxia. Sus funciones consistirán en proveer el apoyo, medicamentos y equipos necesarios durante la colocación del marco estereotáxico; realizar la parte asistencial y preventiva que el paciente requiere durante todo el procedimiento y apoyar al médico neuroanestesiólogo cuando el paciente requiera ser sometido a anestesia general, así como proveer y

mantener el material, equipo y medicamentos necesarios para tal efecto.

Se recomienda que todo el personal aquí descrito como parte del grupo interdisciplinario de profesionales acredite su entrenamiento y experiencia ante la Sección de Radiocirugía del Colegio Mexicano de Cirugía Neurológica y que además acrediten un curso de seguridad radiológica para personal ocupacionalmente expuesto, impartido por una institución o empresa autorizada por la CNSNS.

7. Contar con parámetros bien establecidos para la selección de pacientes, ya que no todos los casos son candidatos a este tipo de procedimientos. Los parámetros deberán incluir, por lo menos, diagnóstico, tamaño y localización de la lesión, expectativas del tratamiento, edad y condición del paciente. Asimismo, es necesaria la discusión con el paciente sobre las opciones de tratamiento existentes, la probabilidad de éxito del mismo y los posibles efectos colaterales.
8. Previo a la administración del tratamiento, se deberá entregar al paciente un documento donde los médicos describen las expectativas de éxito y riesgos de complicaciones para obtener el consentimiento. El consentimiento informado deberá estar firmado por los profesionales en neurocirugía, radioncología, física, así como el paciente y dos testigos con identificación oficial en el caso de pacientes adultos. En el caso de pacientes menores de edad, serán ambos padres o los tutores responsables legalmente acreditados quienes autoricen un tratamiento de radiocirugía y/o radioterapia estereotáxica. Una de las firmas de los profesionales deberá corresponder al encargado de seguridad radiológica ante la CNSNS.
9. El servicio deberá contar con un programa de control de calidad con procedimientos escritos que especifiquen el personal responsable, equipo utilizado, parámetros de referencia y frecuencia de las verificaciones de acuerdo con la probabilidad de cambio del parámetro y el impacto que pueda tener si el cambio se presenta. Se deberá contar con formatos de verificación diseñados de acuerdo con el sistema de radiocirugía que se utilice.

Este programa deberá abarcar, especialmente, todos aquellos aspectos que puedan condicionar una dosis inadecuada o un error en la localización del volumen de tratamiento. Para lograr esto, es necesario incluir por lo menos los siguientes puntos en el programa de control de calidad de radiocirugía:<sup>11</sup>

- Verificaciones periódicas del equipo de tratamiento: funcionamiento general, funcionamiento de paros de emergencia, parámetros mecánicos del equipo (coincidencia del isocentro mecánico con el isocentro radiológico), medición de tasa de dosis, perfiles de campo, curvas de isodosis, etc.
- Verificaciones periódicas de distorsión de imágenes, ya que las imágenes que se utilizan para la planeación del tratamiento (Resonancia Magnética, Tomografía axial computarizada y angiografía digital) pueden presentar distorsiones inaceptables para los procedimientos de radiocirugía, por lo que es necesario contar con fantasmas o simuladores, además de *software* especial que permitan determinar y corregir, cuando sea posible, las distorsiones que presentan las imágenes para planeación, especialmente las imágenes por resonancia magnética y las de angiografía digital.
- Verificaciones durante el procedimiento completo: verificación de la fijación del marco estereotáxico, mediciones de contorno craneal, adquisición de imágenes, revisión de distorsión de imágenes, definición de imágenes en el espacio estereotáxico, determinación de coordenadas, definición del volumen de tratamiento, distribución de la dosis, decisión de la dosis de prescripción, evaluación de tratamiento con histogramas dosis-volumen, protección de estructuras sanas adyacentes y cristalinos, autorización del tratamiento, verificaciones del equipo de tratamiento antes de iniciarlo, doble revisión de colocación de coordenadas o isocentros,<sup>8</sup> tamaño de colimador y otros parámetros que dependen del tipo de equipo de administración de dosis, programación de tiempo de tratamiento o unidades monitor y vigilancia del paciente durante la administración del tratamiento.

10. Aunque actualmente no se cuenta con normatividad nacional específica para radiocirugía en materia de protección radiológica y de control de calidad en estos equipos, existen Normas Oficiales Mexicanas que aplican parcialmente, por lo que se recomienda cumplir con aquellos aspectos relativos a dichas normas y además con las recomendaciones internacionales existentes sobre protección radiológica, determinación de la dosis absorbida y el control de calidad en radiocirugía y radioterapia estereotáxica.

La normatividad nacional relacionada es la siguiente:

- Reglamento General de Seguridad Radiológica.
- NOM-002-SSA2-1993: para la organización, funcionamiento e ingeniería sanitaria del servicio de radioterapia.
- NOM-032-NUCL-1997: especificaciones Técnicas para la Operación de Unidades de Teleterapia que utilizan material radiactivo.
- NOM-002-NUCL-1994: pruebas de fuga y hermeticidad de fuentes selladas.
- NOM-012-STPS-1999: condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, usen, manejen, almacenen o transporten fuentes de radiaciones ionizantes.
- NOM-026-NUCL-1999: vigilancia médica del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes.
- NOM-031-NUCL-1999: requerimientos para la calificación y entrenamiento del personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes.

Algunas de las recomendaciones y protocolos internacionales relacionados son los siguientes:

- *Absorbed Dose Determination in Photon and Electron beams. An International Code of Practice, 2a edición, IAEA, Technical Report Series No. 277.*
- *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water, IAEA.*
- *AAPM Report 54 Stereotactic Radiosurgery. Radiation Therapy Committee Task Group 42.*
- *Radiochromic Film Dosimetry: Recommendations of AAPM Therapy Committee Task Group 55.*
- *NCRP 49 Structural Shielding design and Evaluation for Medical use of X Rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV.*
- *NCRP 51 Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100 MeV Particle Accelerator Facilities (1977).*

11. Se deberá contar con el equipo de medición y control de calidad especial para realizar mediciones en los campos de radiación angostos que se usan en radiocirugía. El equipo mínimo recomendado es el siguiente:<sup>9</sup>

- Fantoma o simulador para determinación de la distorsión en las imágenes por Resonancia Magnética.
- En caso de requerir la determinación de densidad de tejidos, un fantoma de calibración de números Haunsfield para Tomografía.

- Fantoma o simulador y *software* para determinación y corrección de distorsión en imágenes de angiografía digital.
- Cámara de ionización para mediciones absolutas (de 0.1 mm), detector tipo diodo o diamante para mediciones relativas, con diámetros activos máximos de 3 mm.
- En el caso de aceleradores lineales, un fantoma con sistema de barrido.
- El siguiente equipo propio o servicio contratado a laboratorio certificado:
  - a) Cristales termo luminiscentes (TLD) de dimensiones iguales o menores a 2 mm para sistemas de acelerador lineal y de 1 mm para Gamma Knife.
  - b) Película radiocrómica y fotodensitómetro de alta resolución (0.1 mm).<sup>10</sup>

## DISCUSIÓN

Como se indicó, la radiocirugía demanda un estricto control de calidad, además de un equipo de profesionales especializados y un mínimo de equipamiento e instrumentos de precisión adicionales al sistema de administración de radiación. Por lo que se considera que esta tecnología médica, relativamente nueva en nuestro país, requiere iniciar un proceso de reglamentación tanto en materia de protección radiológica y control de calidad, como de certificación de los profesionales que participan en los procedimientos.

Por otra parte, la planeación de la radiocirugía y la radioterapia estereotáxica se realiza en una estación de trabajo con las diversas modalidades de imágenes digitalizadas, lo que implica que el diseño del tratamiento se realiza sobre las imágenes y no en el paciente en tiempo real.

También se deberá tener en cuenta que los beneficios y complicaciones de la radiocirugía y radioterapia estereotáxica no se obtienen en forma inmediata, en comparación con la cirugía tradicional a cráneo abierto, lo cual implica que a mediano y largo plazo, incluso años después del tratamiento, se pueden presentar complicaciones atribuibles al efecto biológico de la radiación ionizante y confundir o manipular la información hacia el paciente y su familia de que dichas complicaciones son parte de la historia natural de la enfermedad.

Tanto la radiocirugía como la radioterapia estereotáxica tienen limitaciones especiales cuando se aplican en el cerebro. El cerebro por sí mismo es una de las estructuras con menor tolerancia a la radiación en comparación con el resto del organismo. Un daño cerebral por radiación puede ser catastrófico.

Si una porción pequeña del cerebro se daña en forma significativa por el tratamiento, es poco pro-

bable que otra parte no dañada del cerebro sustituya su función. Estos problemas inherentes a la poca tolerancia a la radiación representan limitaciones estrictas en la aplicación de la radiación estereotáxica, por ejemplo, mientras mayor volumen tenga un tumor se tiene que reducir la dosis de radiación y el tratamiento puede quedar fuera de efectividad. Además, para un objetivo con un volumen teóricamente esférico de 4 mm de diámetro, si se diseña un tratamiento en la imagen de dicho volumen con una distorsión espacial de 2 mm, implicaría que 67% de la dosis de radiación la recibiría el paciente en tejidos sanos fuera del objetivo.

A principios de los años 90, investigadores del Hospital Karolinska en Estocolmo, Suecia, iniciaron tratamientos estereotáxicos en el cuerpo fuera del cráneo, que incluían técnicas especiales para disminuir el movimiento respiratorio y facilitar la precisión estereotáxica del tratamiento. Sin embargo, debido a que los tratamientos se aplican en varias fracciones y sin precisión submilimétrica no puede ser llamado radiocirugía. No obstante, se continúa avanzando en el capítulo de la radioterapia estereotáxica extracraneal, habiendo llegado a la administración de dosis muy altas de radiación en órganos como el hígado y el riñón, bajo el término de radioeliminación estereotáxica extracraneal (ESR, *Extracranial Stereotactic Radioablation*).

Otra modalidad de radioterapia estereotáxica de avanzada es la radioterapia de intensidad modulada (RTIM)<sup>12</sup> para el tratamiento de tumores con haces externos de radiación. Durante este procedimiento se requiere de mayor tiempo de trabajo en las computadoras y un número mayor de personas dedicadas al control de calidad en comparación con la radioterapia conformal tridimensional (3D CRT). Este hecho incrementa los costos por lo sofisticado del tratamiento, el cual debe administrarse sin errores ya que *per se* la intensidad modulada implica que los haces de radiación no son uniformes.

Si bien, por una parte, la variación en la intensidad del rayo permite soluciones superiores a la radioterapia conformal tridimensional, también durante el tratamiento se requiere identificar con toda precisión aquellas zonas de sobretratamiento (zonas calientes) o zonas frías para autorizar el tratamiento.

Con RTIM, en caso de que un tumor infiltre tejido sano, éste deberá quedar fuera de las zonas calientes ya que de lo contrario se incrementarán las complicaciones inducidas por radiación.

El blindaje actual con el que operan los centros de radioterapia con acelerador lineal no necesariamente es suficiente para posibles planes de tratamiento con RTIM, lo cual implicaría que la

gente que trabaja en áreas vecinas a las áreas de tratamiento podrían recibir dosis inaceptables de radiación.

Tanto la RTIM que se administra con colimadores que tienen la forma del tumor (desarrollados por *NOMOS Corporation*) mediante una tomoterapia seriada (terapia de arcos en cortes), como la técnica de intensidad modulada con colimador dinámico de multihojas (disponibles en *Varian Medical Systems*, Elekta y BrainLAB), implica que entre mayor número de componentes tengan que ser monitoreados mientras el tratamiento es administrado, mayor será la probabilidad de error si alguna de las calibraciones no se ha medido con precisión y con estricto apego a la norma.

Otro método de RTIM es el que se aplica con colimador multihojas segmentario (SMLC), en el cual el arco de radiación no se mueve mientras que el haz de radiación está encendido y cuando las hojas del colimador se mueven el haz de radiación se apaga (*Step and Shoot Therapy*).

Un enfoque totalmente diferente de RTIM guiada por imágenes utiliza un acelerador lineal pequeño sobre un robot industrial (Universidad de Stanford), el cual utiliza haces muy pequeños de radiación dirigidos virtualmente a un tumor desde cualquier posición del paciente, lo que permite mayor flexibilidad que otros métodos en la aplicación de dosis conformacionales. Inicialmente fue probado para radiocirugía estereotáxica y recientemente ha sido autorizado para el tratamiento radioquirúrgico de tumores en cualquier parte del cuerpo.<sup>12</sup>

La habilidad de la RTIM para disminuir la dosis de radiación en los tejidos sanos, ha motivado a los médicos a incrementar la dosis de campo hacia el tumor, lo que mantiene la misma dosis en los tejidos sanos, como en la radioterapia conformal tridimensional. Esto puede disminuir los tiempos de tratamiento o aplicarse durante el mismo tiempo pero con menos efectos colaterales.

Algo que debe ser enfatizado acerca de la RTIM es que requiere de gradientes altos de dosis en portales de radiación individual y del más alto nivel de precisión en todos los pasos de la planeación y aplicación del tratamiento.

No importa qué tan preciso haya sido planificado el tratamiento o qué tan bien se mire el plan en la pantalla de la computadora, es bien conocido que existen variaciones diarias en la posición del paciente, en la localización del tumor dentro del paciente y en los órganos normales supuestamente protegidos de la radiación.

Durante el curso del tratamiento estos cambios en las posiciones de los tejidos normales y el tumor producirán cambios significativos entre la dosis de

radiación planeada y la dosis administrada. Para mejorar estas limitaciones se están desarrollando técnicas basadas en ultrasonido diario, marcadores metálicos dentro del tumor para verificación diaria con rayos X o tomografía computada.

Existen, por lo tanto, muchos retos técnicos que tendrán que ser resueltos en el campo de la RTIM para que podamos confiar en la seguridad, facilidad y reproducibilidad como fueron imaginados desde un principio. Aunque la RTIM es prometedora, mientras que no se haya ganado mayor experiencia y familiaridad, los especialistas involucrados y los pacientes deberían mantener cierta cautela.

Debido a que las fuentes de radiación son fijas a diferencia de los aceleradores lineales, en términos de precisión, conformación tridimensional, reproducibilidad, desde hace 30 años la radiocirugía gamma es el estándar de oro de la radiocirugía intracraneal para el tratamiento de fístulas arteriovenosas, tumores benignos, neuralgia del trigémino, algunos tipos de epilepsia focal, metástasis y algunos tumores primarios malignos recurrentes posterior a la radioterapia. En caso de tumores cerebrales primarios infiltrantes y lesiones tumorales extracraneales, la radioterapia estereotáxica con acelerador lineal es la primera opción de tratamiento con radiación ionizante.

Los grandes avances obtenidos desde que se modificaron los primeros aceleradores lineales a finales de los 80, hasta el desarrollo del acelerador dedicado y el acelerador robotizado, se pueden dar a nivel intracraneal tratamientos similares al Gamma Knife. En la actualidad con dichos equipos se pueden obtener los mismos beneficios a nivel extracraneal donde el *Gamma Knife*, por su diseño, no tiene ninguna aplicación.

Desde hace siete años, la radiocirugía en nuestro país se ha enfocado principalmente hacia el aspecto asistencial. Sin embargo, a través de la Sección de Neuroradiocirugía y Radioterapia Estereotáxica del Colegio Mexicano de Cirugía Neurológica se han emitido los requerimientos básicos para el control de calidad y operación de los centros que practican la radiocirugía y/o radioterapia estereotáxica.<sup>13-16</sup>

- De acuerdo a los resultados de una evaluación reciente por la citada Sección, se ha encontrado que entre los siete centros actualmente en operación existen diferencias muy significativas de uno a otro en el equipamiento, control de calidad y experiencia de los profesionales.
- Estos centros no cuentan con todas las modalidades de imagen y entre aquellos que sí cuentan con resonancia magnética, no todos cono-

cen el grado de distorsión espacial que por no homogeneidad de campo están presentes en todos los resonadores. Así mismo, la menor o mayor intensidad del magneto de 0.5 a 3.0 Tesla implica mayor capacidad en la definición anatómica y funcional de las estructuras cerebrales y mayor capacidad en el análisis bioquímico de las lesiones, pudiéndose anticipar al análisis histopatológico. Sin embargo, un magneto de 3.0 Tesla con un campo magnético más intenso, puede tener, para fines de planeación estereotáxica en radiocirugía, mayor distorsión espacial por no homogeneidad de campo y otros efectos indeseables, entre los que se encuentran estimulación nerviosa periférica y dolor secundario, así como corrientes de aire helicoidales alrededor del marco estereotáxico, los cuales tendrán que ser evaluados rigurosamente sobre posibles efectos adicionales en la distorsión de las imágenes.

Si no se conocen los beneficios y complicaciones de la radiocirugía y la radioterapia y dada la heterogeneidad con que se están practicando en nuestro país, al igual que con otras disciplinas médicas; si no se cuenta con criterios específicos de normatividad para la aplicación y tratamiento y certificación de los operarios, es muy posible que se originen reclamos ante la sospecha de negligencia médica y/o institucional.

Si los beneficios y las complicaciones de la radiocirugía y la radioterapia no se obtienen en forma inmediata, debemos estar alertas por la gran heterogeneidad con la que se está practicando esta especialidad médica en nuestro país, ya que así como otras disciplinas médicas están ahora con mayor frecuencia requiriendo de instancias oficiales para dirimir conflictos en la relación médico paciente, debemos esperar que también desde el campo que nos ocupa en este escrito se originen reclamos ante la sospecha de negligencia médica.

## REFERENCIAS

1. Nias AHW. *An introduction to Radiobiology. Second Edition, 1998.*
2. Reglamento General de Seguridad Radiológica, Diario Oficial de la Federación, Noviembre 1988.
3. Leksell L. A note on the treatment of acoustic tumors. *Acta Chir Scand* 1971; 137 (8):763-5.
4. Kondziolka D, Dempsey PK, Lunsford LD, Kestle JRW, Dolan EJ, Kanal E, Tasker RR. A comparison between magnetic resonance imaging and computed tomography for stereotactic coordinate determination. *Neurosurgery* 1992; 30(3): 402-6.
5. Gauvin A. Geometrical distortion of magnetic resonance images. Master Thesis, McGill University, Mayo 1992
6. Posewitz A, Jones D, Young RE Evaluating MRI inaccuracies. *Proceedings of 7th Annual LGKS Mtg; 1995*
7. Wallin A, Lubbert K. Correction of angiographic images for stereotactical convergence radiation. *Electromedica* 1998; 66 No. 1: 8-11.
8. Flickinger JC, Lunsford LD, Kondziolka D, Maitz A. Potential human error in setting stereotactic coordinates for radiosurgery: implications for quality assurance. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1993; 27(2):397-401.
9. American Association of Physicist in Medicine Radiation Therapy Task Group 42. AAPM Report 54. *Stereotactic Radiosurgery. Nueva York, 1995.*

10. Sanders M, Sayeg J, Coffey CW, Patel P, Walsh J. Beam profile analysis using Gaf Chromic films. *Stereotactic and Func Neurosurg* 1993; 61:124-9.
11. The American Association of Neurological Surgeons Task Force, The American Society for Therapeutic Radiology and Oncology Task Force. *Consensus Statement on Stereotactic Radiosurgery: Quality Improvement. Neurosurgery* 1994; 34-1:193.
12. Knisely J, IMRT – Intensity Modulated Radiation Therapy, *Brain Talk* 7(2) International Radiosurgery Support Association 2002.
13. Del Valle, R. y cols. Simposio: Radiocirugía: Nueva Forma de Cirugía Incurtada; Parámetros de Control de Calidad. Presentado en la Academia Mexicana de Medicina el 31 de Octubre del año 2001. *Gaceta Médica. En prensa.*
14. Del Valle R y cols. Control de Calidad en Radiocirugía. *Revista Médica Sur: 9 (2)2002. En prensa.*
15. Del Valle, R. y cols.: Requerimientos básicos para la operación y control de calidad en los servicios de radiocirugía y radioterapia estereotáxica. *Revista CONAMED 7, (3), Julio-Septiembre 2002. En prensa.*
16. Del Valle R, y cols. Radiocirugía y Radioterapia Estereotáxica: Bondades y Riesgos. *Boletín de Difusión de Evaluación Tecnológica de Salud (IMSS-FUNSAUD). (3) Julio-Septiembre 2002. En prensa.*

## LECTURAS RECOMENDADAS

- Arndt J, Backlund EO, Larsson B, Leksell L. Stereotactic irradiation of intracranial structures: physical and biological consideration. *INSERM* 1979; 12:81-92.
- Berk HW, Agarwal SK. Quality assurance of Leksell Gamma-units. *Stereotact Funct Neurosurg* 1991; 57(1-2):106-12.
- Coffey CW, Sanders M, Cashon K, Miller R, Walsh J, Patel P. A tissue equivalent phantom for stereotactic radiosurgery localization and dose verification. *Stereotact Funct Neurosurg* 1993; 61.
- Ericson K, Söderman M, Maurincomme E, Lindquist C. Clinical experience with stereotactic digital subtraction angio-

- graphy with distortion correction software. *Stereotact Funct Neurosurg* 1996; 66(Suppl 1):63-70.
- Flickinger JC. An integrated logistic formula for prediction of complications from radiosurgery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1989; 17(4): 879-85.
- Flickinger JC, Schell MC, Larson Da. Estimation of complications for linear accelerator radiosurgery with the integrated logistic formula. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1990; 19(1): 143-8.
- Flickinger JC, Lunsford LD, Kondziolka D. Dose prescription and dose-volume effects in radiosurgery. *Neurosurg Clin N Am* 1992; 3(1):51-9.
- Flickinger JC, Lunsford LD, Kondziolka D. Dose-volume con-

siderations in neurosurgery. Boston; 1990.

- Gerbi BJ, Roback DM, Humphrey SD, Hall WA. Maintaining accuracy in stereotactic radiosurgery. *IJROBP* 1995; 32(4): 1199-203.
- Kalend AK, Wu A, Zwicker RD, Zheng Z. Comments of dose measurements for a narrow beam in radiosurgery. *Proceedings of ISRS*; Stockholm: 1993:172.
- Leber KA, Bergloff J, Langmann G, Mokry M, Schröttner O, Pendl G. Radiation sensitivity of visual and oculomotor pathways. *Stereotact Funct Neurosurg* 1995; 64(Suppl 1): 233-8
- Leber KA, Bergloff J, Pendl G. Dose-response tolerance of the visual pathways and cranial nerves of the cavernous sinus to stereotactic radiosurgery. *J Neurosurg* 1998; 88(1): 43-50.
- Maitz AH, Wu A, Lunsford LD, Flickinger JC, Kondziolka D, Bloomer WD. Quality assurance for Gamma Knife stereotactic radiosurgery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1995; 32(5): 1465-71.
- McLaughlin WL, Soares CG, Sayeg JA, McCullough EC, Kline RW, Wu A, Maitz AH. The use of a radiochromic detector for the determination of stereotactic radiosurgery dose characteristics. *Medical Physics* 1994; 21 (3):379-88.
- Novotny J, Vladyka V, Simonova G, Liscak R. Radiation safety during radiosurgical treatment. *Proceedings of ISRS*; Stockholm: 1993: 167.
- Shaw E, Kline R, Gillin M, Souhami L, Hirschfeld A, Dinapoli R, Martin L. Radiation therapy oncology group: radiosurgery quality assurance guidelines. *IJROBP* 1993; 27:1231-9.
- Tishler RB, Loeffler JS, Lunsford LD, Duma C, Alexander E III, Kooy HM, Flickinger JC. Tolerance of cranial nerves of the cavernous sinus to radiosurgery [see comments]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 1993; 27(2):215-2

