OTRAS APLICACIONES DE LA ENERGÍA NUCLEAR: APLICACIONES EN MEDICINA (PARTE II). MEDICINA NUCLEAR Y RADIOTERAPIA

RAFAEL HERRANZ CRESPO
Exjefe del Servicio de Oncología Radioterápica
HOSPITAL GENERAL UNIVERSITARIO GREGORIO MARAÑÓN

ALMUDENA REAL
Jefa de la Unidad de Protección Radiológica del Público y del Medioambiente
CIEMAT

MEDICINA NUCLEAR

Definida como una rama de la medicina que emplea los isótopos radiactivos, las radiaciones nucleares, para la prevención, diagnóstico, terapéutica e investigación médica [1, 2]. Un 30 % de sus aplicaciones se emplean en oncología.

Utiliza dosis bajas o muy bajas en diagnóstico y más elevadas en terapia. Los isótopos radiactivos son producidos en reactores nucleares. El primero de ellos data de 1946. Se emplean como radiotrazadores asociados a moléculas transportadoras, formando un complejo que se denomina radiofármaco.

Los radiofármacos se definen como la combinación de especies orgánicas o inorgánicas, que unidas al elemento radiactivo, sirven de agente transportador y de depósito de este emisor de radiación al órgano o espacio a estudiar y poder ser detectado desde el exterior por las maquina adecuadas, gammacámaras, tomógrafos, generando imágenes o curvas de función, dependiendo del objetivo del estudio. Los radiofármacos son habitualmente inyectados por vía venosa y no tienen acción farmacológica alguna.

En casos puntuales el isótopo radiactivo empleado llega por sí mismo al objeto del estudio. Es el caso del I-131, cuyo comportamiento metabólico es idéntico al lodo estable, que se almacena en la glándula tiroides. Así puede utilizarse para medir su acumulación representando esa curva la función tiroidea o la distribución en la glándula y permitiendo obtener imágenes, gammagrafías tiroideas.

El control y garantía de calidad de esta especialidad se rige por el RD 1481/1997.

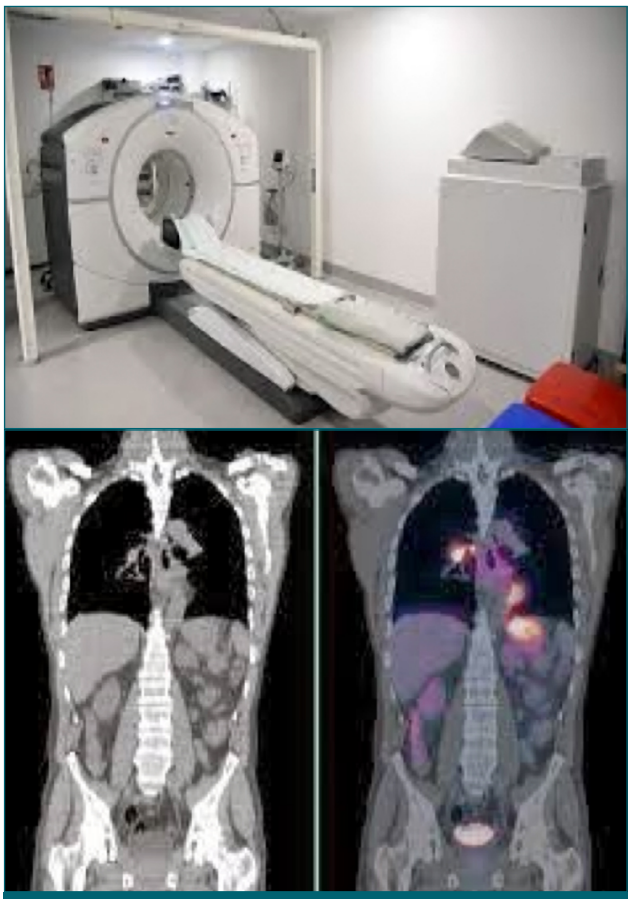

Figura 1. Medicina nuclear. Imagen PET TC.

Los **equipos utilizados** son históricamente detectores de radiación gamma, gammacámaras que sustituyeron a los antiguos gammágrafos lineales. En la actualidad dos son los instrumentos de detección más utilizados para técnicas diagnósticas. La gammacámara SPECT y el tomógrafo PET.

– *Gammacámara SPECT*, Tomografía por emisión de fotón simple. La más utilizada, tipo Anger, está formada básicamente por un sistema de detección de la radiación fotónica, emitida por el radiofármaco introducido en el organismo y depositado en el órgano o área anatómica en estudio y un sistema informático cada vez más sofisticado. La detección se realiza mediante detectores de centelleo, colimador y cristal de centelleo de loduro sódico más talio y tubos fotomultiplicadores que conducen estos fotones detectados en forma de corriente eléctrica, posteriormente ampliada en un amplificador y transportada a un analizador de pulsos. El objetivo es generar una imagen proporcional a lo detectado en el detector de centelleo. Esta información va a ser digitalizada y transformada en imágenes generalmente tridimensionales. Este equipo SPECT puede acoplarse a un TC, dando lugar a un equipo híbrido, que no solo capta y reproduce la imagen gammagráfica, sino que la sitúa en el espacio anatómico donde se produce esta emisión.

Figura 2. Gammacámara.

– *PET- TC.* Tomografía por emisión de positrones asociado a tomógrafo computarizado. La personalidad de este equipo se la proporciona el tipo de radiofármaco utilizado, emisor de positrones, electrones positivos. Sabido es que estas partículas son aniquiladas por electrones negativos, generando dos fotones gamma en sentidos opuestos. Por un sofisticado sistema de detección en detectores enfrentados, produciéndose en un circuito de coincidencia, pudiendo así localizarse exactamente el lugar de emisión de los dos fotones y trasmitirla a un tomógrafo donde su reconstrucción tridimensional demostrará gráficamente el depósito del radiofármaco y la TC asociada, lo situará en su localización anatómica. Estos equipos se utilizan en la detección de procesos inflamatorios, infecciosos o tumores generalmente malignos. El radiofármaco utilizado habitualmente es la desoxi-fluoro-glucosa, FDG, marcada con Flúor 18, radioisótopo emisor de positrones y de un periodo de semidesintegración muy corto (109,7 minutos). La glucosa asociada al ^{18}F lo transporta a procesos con metabolismo celular aumentado y con aumento de su demanda, muy característico de los tumores malignos en desarrollo.

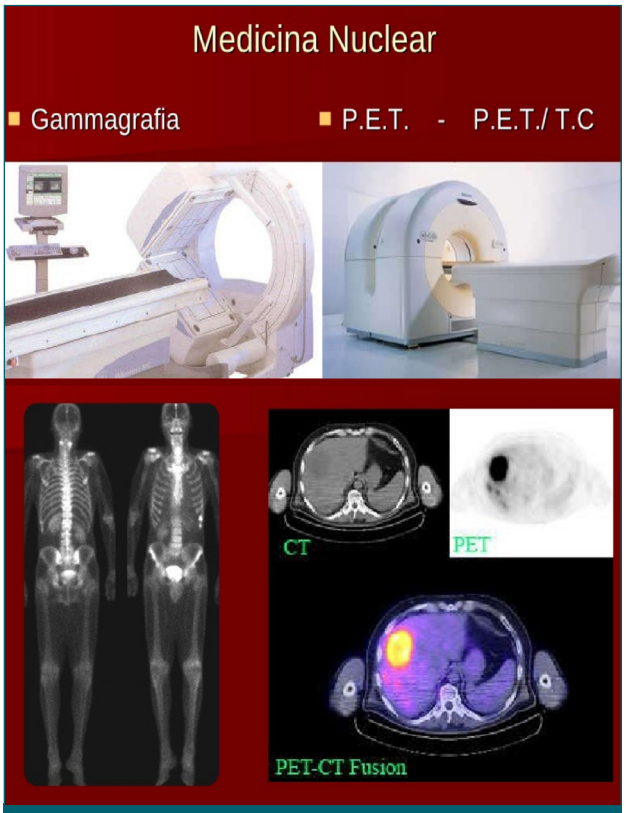

Figura 3. PET-TC.

– *Detectores de radiación asociados a sistemas de registros gráficos para estudios funcionales*. Curvas de acumulación eliminación renal por separado. Perfusión pulmonar. Estudio de la función tiroidea según acumulación de ^{131}I, etc.

Algunas características de los radioisótopos utilizados en medicina nuclear:

Radioisótopo	Periodo semidesintegración	Energía (KeV)
Talio 201	73 horas	71
Galio 67	3,3 días	93
Tecnecio 99m	6 horas	140
Yodo 125	9 días	364

Por su fácil manejo mediante elución de un generador de Molibdeno 99 y por sus características físicas, el radioisótopo más frecuentemente utilizado en medicina es el Tecnecio 99 m, por sí solo o en forma de radiofármacos diversos.

Respecto a las **dosis efectivas (mSv) administradas en las diversas exploraciones de la medicina nuclear:**

Tipo de exploración	Radioisótopo	Dosis efectiva. mSv
Ventilación pulmonar	Xe 133	0,3
Perfusión pulmonar	Tc 99m	1
Renal	Tc 99m	1
Tiroides	Tc 99m	1
Ósea	Tc 99m	4
Cardiaca dinámica	Tc 99m	6
PET cabeza	FDG F18	5
PRT-TAC cuerpo entero	FDG F18	20

Dosis todas ellas bajas o muy bajas y que en caso del ^{99m}Tc, además de ser muy corto su periodo de semidesintegración y rápida eliminación del organismo, tiene como característica fundamental su baja energía.

Algunas aplicaciones diagnósticas de la medicina nuclear:

- *Tiroides.* Estudios funcionales y morfológicos. Rastreo corporal a la búsqueda de posibles metástasis de Cáncer bien diferenciado del tiroides.
- *Pulmón*. Estudios de ventilación y vascularización, perfusión, morfología. Tromboembolismo pulmonar.
- *Renal-urinario*. Función y morfología renal individual. Eliminación ureteral. Acumulación vesical.
- *Cadiovascular*. Perfusión. Función ventricular. Infarto de miocardio.
- *Osteo-articular*. Metástasis óseas. Procesos inflamatorios y degenerativos.
- *Sistema nervioso central*. Vascularización y metabolismo cerebral. Morfología.
- Estudios de procesos inflamatorios. Linfomas.
- Localización de tumores primitivos y metastásicos. FDG ^{18}F. Colina ^{18}F. PET-TAC-RM.
- *Estudio del ganglio centinela*. Uso fundamental en cáncer de mama para evitar innecesarias linfadenectomías axilares, en ORL y en melanoma de extremidades.
- *Técnicas de radioinmunoensayo*. Marcado con sustancias radiactivas de fluidos o células. Reacción antígeno anticuerpo. Datos cuantitativos. Estudios hormonales.

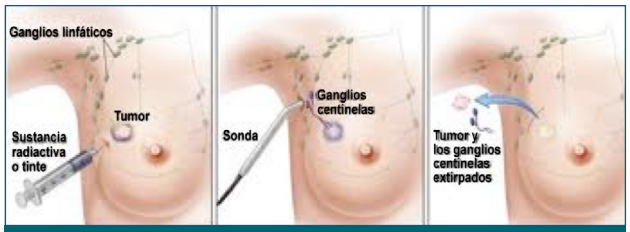

Figura 4. Ganglio centinela.

La característica común es su ausencia de toxicidad, bajas dosis de radiación e innecesario ingreso.

Aplicaciones terapéuticas de la medicina nuclear

- *Terapia metabólica*. Indicación fundamental en el tratamiento del cáncer bien diferenciado de tiroides, folicular, papilar o mixto. Radioisótopo 1^{31}I. Hipertiroidismo. Adenoma tiroideo tóxico. Enfermedad de Graves Bassedow.
- *Radioembolización*. Radioisótopo, Itrio 90 (^{90}Y). Indicaciones hepatocarcinoma, metástasis hepáticas.
- *Anticuerpos monoclonales marcados*. Ibritumomab ^{90}Y. Cuvatuzumab ^{90}Y. Indicaciones, linfoma no Hodgkin. Adenocarcinoma de páncreas metastásico.
- *Terapia del dolor*. Samario 153, ^{153}Sm; Estroncio 89, ^{89}Sr. Metástasis óseas.
- *Sinoviortesis*. Itrio 90, ^{90}Y; Renio 156, ^{156}Rn; Erbio 169, ^{169}Er. Artropatías dolorosas.
- Tumores neuroendocrinos. MIBG ^{131}I. Meta-yodo-bencil-guanidina ^{131}I. Fibrocitómas. Paragangliómas. Neuroblastómas. Ca. Medular de tiroides. Tumor carcinoide.

En general suelen precisar de ingreso en habitaciones especialmente preparadas, blindadas, con acceso limitado a personal profesionalmente expuesto y con recogida de residuos.

Consideraciones acerca de la protección radiológica. Radiodiagnóstico y medicina nuclear.

Tanto para el radiodiagnóstico como para la medicina nuclear es interesante mencionar las reflexiones de la American Association of Physicist in Medicine (EE.UU., 2011):

- Los riesgos de las imágenes médicas con dosis a pacientes por debajo de 50 mSv para procedimientos únicos o de 100 mSv para múltiples, durante cortos periodos de tiempo, son demasiado bajos para ser detectados o pueden no existir.
- Los procedimientos deben de ser realizados a las dosis más bajas que sean apropiadas para obtener la imagen. Evaluar siempre la relación riesgo/beneficio de los procedimientos siguiendo el Principio ALARA.
- Las predicciones cáncer y muerte en poblaciones de pacientes expuestos a dosis baja son altamente especulativas y deben desaconsejarse. Producen temores infundados, gastos excesivos, no realización de exploraciones necesarias y una radiofóbia generalizada.

RADIOTERAPIA
Generalidades

Procedimiento terapéutico, conocido desde hace más de un siglo. El primer informe de una curación con este procedimiento data de 1889, es decir solo 4 años después del descubrimiento de los rayos X y solo 1 después de la descrip-

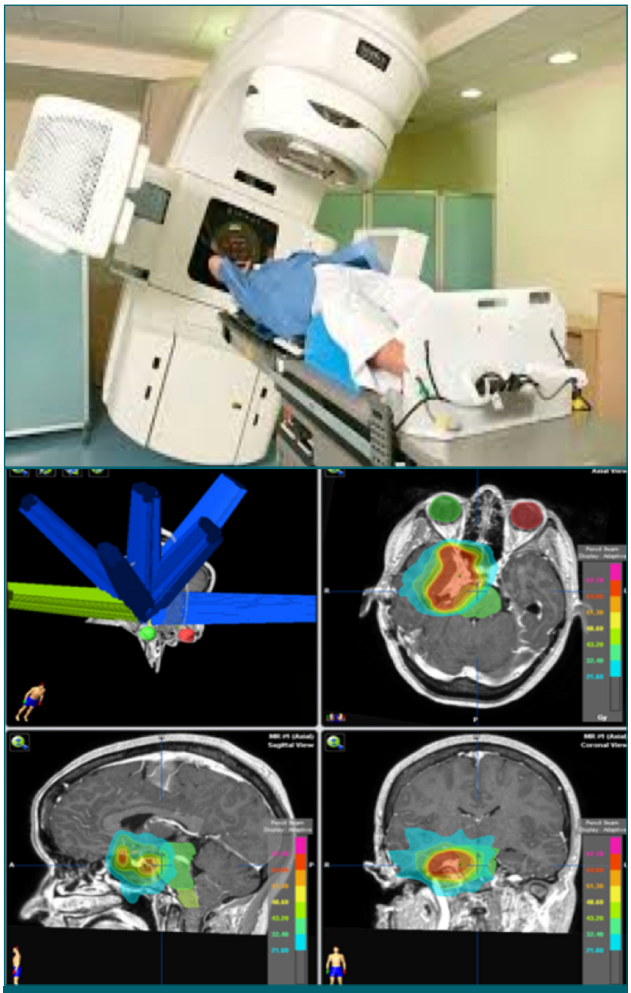

Figura 5. Radioterapia. Acelerador lineal. Dosimetría tumor cerebral.

ción del radio. En España, el introductor del procedimiento fue el médico Celedonio Calatayud en 1906. Es a partir de 1922, cuando la oncología se establece como disciplina médica, cuando se incorporan a las diferentes formas de tratamiento del cáncer y se inicia una evolución tecnológica creciente. La cobaltoterapia y la entrada progresiva de equipos conocidos como aceleradores lineales (LINAC), así como el uso de materiales radiactivos, radio, ya abandonado; iridio; Cesio han ido implantando la radioterapia como un instrumento terapéutico imprescindible junto a la cirugía, la medicina, quimioterapia, inmunoterapia y hormonoterapia, en el tratamiento del cáncer.

Como dato acerca de su uso médico, se acepta que al menos un 70 % de pacientes oncológicos, reciben radiación terapéutica en algún momento de su tratamiento, con finalidades y procedimientos diferentes según veremos más adelante.

El año 1980 se puede tomar como inicio de actividades procedimentales que modifican la verificación de la idoneidad de los tratamientos. Hasta esa fecha, la planificación de la radioterapia se realizaba sobre imágenes radiológicas simples y verificaciones en dos dimensiones, 2D, en las que el especialista no llegaba a tener una idea certera de la localización exacta del tumor, con la consecuente e innecesaria irradiación de estructuras sanas. Es a partir de 1980, cuando llega la aportación de la ecografía, la TC, RM y los sistemas informáticos de cálculo dosimétrico, que permiten obtener imágenes virtuales de los volúmenes a tratar y una mejor delimitación de áreas tumorales y zonas a proteger de la radiación.

Figura 6. Planificación dosimétrica. Definición de volumen a irradiar. Cáncer de mama.

Esta progresión tecnológica, como se verá, ha ido en aumento. En Europa, las especialidades responsables de la radioterapia en su aplicación al tratamiento del cáncer son, la oncología radioterápica, reconocida inicialmente como radioterapia desde 1978 y con su nominación definitiva desde 1984 en el ámbito médico y la radiofísica hospitalaria desde 1993.

Se define la oncología radioterápica como una especialidad médica, eminentemente clínica, encargada de la epidemiología, prevención, patogenia, clínica, diagnóstico, tratamiento y valoración pronostica de las neoplasias y sobre todo del tratamiento basado en radiaciones ionizantes [3, 4, 5].

La radioterapia es una forma de tratamiento local del cáncer, que utiliza radiaciones de alta energía para dañar el ADN de las células tumorales, destruyendo así su capacidad de multiplicarse y crecer. Esta acción lesiva también puede ejercerse sobre los tejidos normales que atraviesa. Sin embargo los tejidos tumorales son más sensibles a la radiación, más a mayor capacidad de división celular y no pueden reparar la lesión ya que su ciclo celular ha sido bloqueado por ella.

Formas de clasificar la Radioterapia (RDT)

- Según sus Indicaciones:
  - RDT radical o exclusiva, como único procedimiento de actuación. Dosis altas. Próstata precoz. Laringe, cuerda vocal.
  - RDT adyuvante o complementaria a cirugía y/o quimioterapia.
  - RDT paliativa o sintomática. Dolor metastásico. Sangrado. Obstrucción.
- Según el momento de su aplicación:
  - RDT preoperatoria. Intención reductora del tumor.
  - RDT intraoperatória. RIO, en el propio quirófano.
  - RDT posoperatoria.
  - RDT concomitante o alternante con la quimioterapia.
  - RDT de primera intención.
- Según el procedimiento:
  - Radioterapia externa o teleterápia. Fuente de radiación a distancia del paciente.
  - Braquiterapia o curiterapia. Brachy, próximo o en el interior del tumor.

Modalidades y tipos de radiacíon ionizante que se usan para tratar el cáncer

La radiobiología, ha demostrado que la ionización que esta radiación produce en las moléculas y células de los tejidos, tras su interacción con la materia y siempre con una intensidad proporcional a la energía, dosis y tasa de dosis, relación dosis tiempo, aportada, va a provocar una serie de reacciones de tipo bioquímico en cualquier componente de la célula, siendo los más críticos los que se producen en los núcleos y especialmente en su blanco óptimo para el efecto buscado, el ADN, que con su destrucción va a impedir la reproducción de las células alcanzadas, efecto directo. Pero aún existe otro mecanismo de actuación, producido incluso por fuera del lugar y el momento de la cesión de energía. Es como una reacción en cadena. Las moléculas de agua que conforman un volumen en torno al 80 % del contenido celular, son fraccionadas en sus componentes H y OH, que reaccionan con el medio biológico, rico en oxigeno y dan lugar a la formación de una molécula altamente tóxica, peróxido de hidrógeno, H_2O_2, agua oxigenada, que contribuye a aumentar el carácter lesivo por un efecto indirecto.

Será por tanto la suma de estos dos efectos, directo e indirecto, junto a las características propias del tejido alcanzado, índice de reproducción celular fundamentalmente, la que junto a las características físicas de la radiación aportada, serán las responsables del efecto buscado que, como se sabe, en el caso de la radioterapia es siempre la muerte de las células tumorales.

- **Teleterapia.** Genéricamente puede hacerse una clasificación inicial en dos tipos:
  - *Radiación con Fotones de Alta Energía*. Rayos X y radiación gamma.
  - *Radiación con Partículas.* Electrones, protones, neutrones, iones de carbono, partículas alfa y partículas beta.

Será el oncólogo especialista quien deberá seleccionar el tipo de radiación más adecuado para cada caso en particular, dependiendo del tipo de tumor y su profundidad o

localización anatómica, junto con la proximidad a órganos críticos cuya lesión debe de evitarse

— *Radiación con Fotones:*

Es la forma más común de radiación utilizada en el tratamiento del cáncer. Los haces de rayos X y gamma, procedentes de fuentes radiactivas, como Co-60 y ^{137}Cs fueron hasta casi finales de los 80 del siglo XX, máquinas de teleterápia habituales en los Servicios de Oncología Radioterápica. La incorporación de los aceleradores lineales (LINAC) de electrones, que generan fotones de su misma energía mediante interacción con un metal, tungsteno habitualmente, antes de su proyección sobre el paciente, permite alcanzar dosis muy elevadas proporcionadas por radiaciones de entre 4 y 25 MeV. La respuesta es proporcional en las células, en relación directa a este aumento de energía.

— *Radiación con partículas:*

– *Haces de electrones.* Producidos en un acelerador lineal y proyectados sobre el objeto de tratamiento. Son partículas de carga negativa y con escasa capacidad de penetración en el cuerpo, siendo absorbidos en las primeras capas del mismo. Es la radiación idónea para el tratamiento de la piel y de ganglios linfáticos superficiales.

– *Haces de protones.* Proporcionan un depósito de energía muy elevado al final de su trayecto (Pico de Bragg), mientras que antes de alcanzar este, prácticamente no ceden nada. La consecuencia es de un máximo efecto destructivo en ese pico final y mínima lesión de estructuras por las que atraviesa hasta alcanzarlo. La energía de la radiación es mucho más elevada que en las anteriores. Los cálculos para el depósito de la dosis en el espacio adecuado, requieren de una precisión máxima, 1-2 mm, de tipo mínimo 3D, con espesores de corte de 1 a 2 mm y métodos de simulación muy comprobados (Montecarlo), todo ello en manos de radiofísicos expertos. Su indicación máxima está en tumores dentro o muy próximos a órganos de riesgo, como el Sistema Nervioso Central, coroides, cordomas de Clivus, tumores pediátricos y un cada vez más largo etcétera a la luz de la experiencia. Su máxima limitación es el elevado coste económico de la instalación.

– *Haces de Neutrones.* Existen muy pocas instalaciones en el mundo. Su uso ha ido disminuyendo por la dificultad de conseguir una distribución eficaz de su energía. Además, el daño al ADN es muy elevado y su dificultosa dosimetría puede provocar alteraciones en los tejidos sanos. Tumores de cabeza, cuello o próstata son algunas de sus indicaciones.

– *Iones de carbono.* También conocida como radiación de iones pesados, debido a que hace uso de una partícula de mayor peso que el protón o el neutrón. La partícula es parte del átomo de carbono la cual en sí, contiene protones, neutrones y electrones. Debido al elevado peso de esta partícula, puede causar más daño a la célula a la que se dirige y en la que establece una elevada capacidad destructiva. Sin embargo los efectos sobre los tejidos sanos cercanos pueden ser más elevados. Es un tipo de terapia muy poco disponible en el mundo.

– *Partículas alfa y beta.* Producidas por elementos radiactivos especiales y que pueden ser introducidas en el organismo por vías diversas, inyectadas, deglutidas o colocadas en contacto. Véase lo descrito en el apartado de usos terapéuticos de la medicina nuclear.

- **Braquiterápia.** Del termino *brachy*, cercano, próximo, contacto. En lugar de lo comentado en la llamada teleterapia, con la fuente emisora de radiación a distancia del cuerpo. Las semillas, partículas o hilos radiactivos se colocan como tal o dentro de dispositivos tipo catéter, en el seno del tejido tumoral a irradiar, bien sea un tumor o bien el lecho tumoral cuando el tumor ya ha sido extirpado y quiere así ampliarse la eficacia terapéutica. Se usa complementariamente a la teleterápia o bien por sí sola de manera radical. Indicaciones precisas en tumores muy localizados y de tamaño adecuado a la técnica.

Hay dos tipos de Braquiterapia:

— *Braquiterapia Intersticial.* Varios tubos finos y huecos, catéteres, se insertan en la zona a tratar donde permanecerán varios días. A través de ellos se insertarán las fuentes lineales radiactivas, ^{192}Ir y ^{137}Cs principalmente o también en forma de pequeños cilindros o esféricos, *perdigones*. Estas fuentes de radiación pueden permanecer de manera continuada, de ma-

Figura 7. Acelerador lineal electrones/fotones.

Figura 8. Braquiterapia intersticial. Cáncer de mama.

nera permanente hasta su autodestrucción; pueden extraerse y volver a introducirlos durante días o pueden permanecer el plazo de tiempo calculado en función de la dosis a administrar y la actividad propia de la fuente radiactiva y ser retirados. Indicaciones precisas son tumores de mama, labio, piel, parpado, pene o próstata entre otras. Requiere manipulación tipo quirúrgico con adecuada protección radiológica de los profesionales e ingreso del paciente en habitaciones aisladas y blindadas durante la totalidad de tratamiento, cuya duración será variable según sea alta o baja tasa de dosis.

— *Braquiterapia Intracavitaria.* Constituye el tipo más común de la braquiterápia. Previa colocación de un dispositivo capaz de transportar y alojar las fuentes radiactivas, en la cavidad que queramos irradiar debe comprobarse la adecuada colocación del dispositivo mediante TC y proceder a su planificación. Las fuentes de radiación semillas, perdigones, habitualmente son impulsadas a través de estos dispositivos y allí permanecen el tiempo necesario marcado por la dosimetría. Puede hacerse de forma continua o por diferentes sesiones. Las indicaciones más frecuentes son los tumores ginecológicos. Deben controlarse los efectos secundarios provocados en estructuras vecinas.

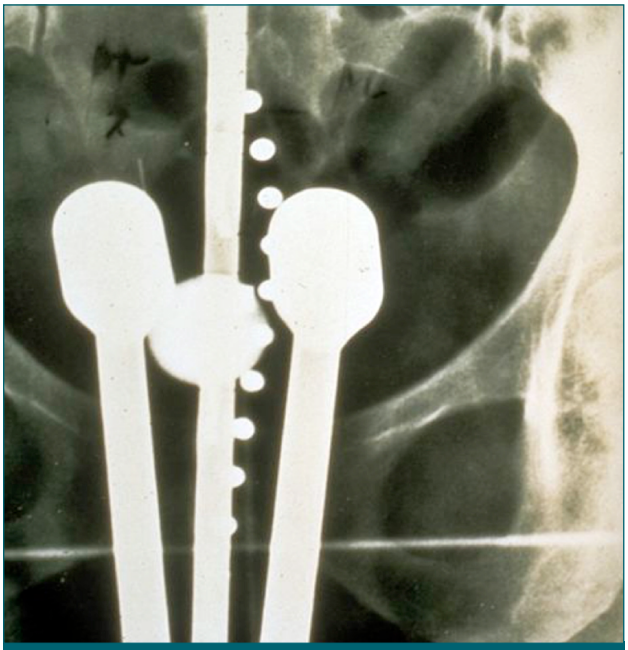

Figura 9. Aplicador ginecológico. Braquiterapia intracavitaria.

Complejidad de la Radioterapia. Fases de la planificación. Colaboración y responsabilidad de la Unidad de Radiofísica:

- Imágenes 3D, 4D, PET-TC, RM, posicionamiento y accesorios.
- Determinación del volumen blanco, volumen tumoral y volumen planificado.
- Definición de dosis.
- Conformación de campos. Colimadores multiláminas.
- Cálculo 3D distribución de dosis.
- Corrección según heterogeneidad de los tejidos.
- Selección del plan de irradiación según histograma dosis-volumen.
- Verificación por imágenes, antes y durante el tratamiento una vez aprobado el mismo.

Principales innovaciones

- Planificación 3D-4D
- Métodos de imagen, TC, RM, PET-TC, fusión.
- Procedimientos estereotáxicos. Cráneo, pulmón.
- Hipertermia. Secuencias QT-RDT-QT.
- Radioterapia conformada. Colimación multiláminas.
- Intensidad modulada. IMRT
- Imagen guiada. Visión portal. Control CT.
- Radioterapia intraoperatória. RIO.
- Nuevos fraccionamientos. Escalada de dosis.
- Braquiterapia. Alta tasa de dosis.
- Nuevas partículas protones, neutrones.

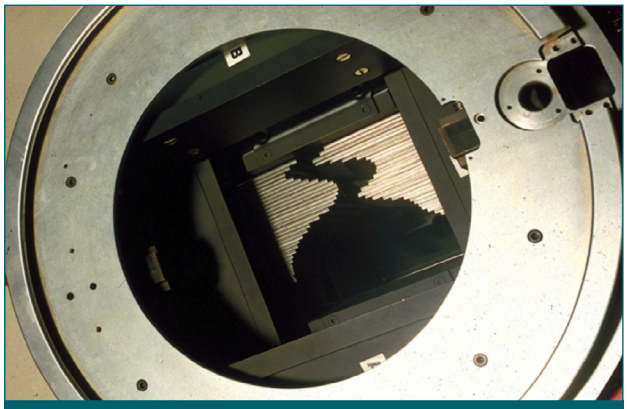

Figura 7. Colimador multiláminas.

Comentarios a las Innovaciones

Respecto a los *métodos de imagen*, los verdaderos avances llegan a partir de 1980 con la incorporación de la TC, que permite una radioterapia conformada en 3D, apoyada por nuevos sistemas de cálculos dosimétricos y permitiendo imágenes virtuales de los volúmenes a tratar, permitiendo así, concentrar mejor las dosis. Ya en los años 90, se amplían estos métodos de imagen con la incorporación de la RM y de la PET-TC, en beneficio de una mayor exactitud y precisión en la delimitación del volumen tumoral, minimizando así la lesión en los tejidos sanos.

La *radioterapia de intensidad modulada, IMRT,* es una forma más precisa de RDT3D, en la que se modula o controla la intensidad del haz de radiación.

Los modernos aceleradores lineales disponen de colimadores multiláminas, colimar es delimitar o definir forma, asimilados a sofisticados sistemas informáticos, que sitúan estos colimadores en la salida del haz de radiación, absorbiendo su energía en ellos y dando a este la forma definida previamente, de manera que lo formatean y adaptan al contorno exacto del volumen blanco.

Sistemas de control respiratorio y del movimiento fisiológico del paciente obteniendo imágenes en 4D, añadiendo al TC 3D esta cuarta dimensión dinámica. Esto se consigue añadiendo cámaras sensibles infrarrojas que permiten realizar y agrupar imágenes de TC en diferentes fases del movimiento respiratorio, permitiendo conocer en todo momento dónde se encuentra nuestro volumen a tratar y los órganos sanos a proteger. Este sistema de *Gating* o de control respiratorio, permite tratar al paciente solo cuando el movimiento se encuentra en la fase en la que se ha planificado el tratamiento. Un avance más en 5D es la que tiene en cuenta la biología de cada tumor y su heterogeneidad.

Los *sistemas de software* para la delimitación del blanco y de los órganos de riesgo, son un punto clave para una correcta dosimetría física, cálculo de dosis, que es en sí el tratamiento a administrar. La posible fusión de imágenes de distinta procedencia, TC, RN, PET-TC y diferentes herramientas de contorneo, aportan mayor precisión y rapidez.

La investigación física básica y constante ha permitido la elaboración de mejores *algoritmos de cálculo de dosis (Montecarlo, el más usado)* que permiten a los físicos especialistas, cuya misión es la planificación de los tratamientos radioterápicos, la protección radiológica del paciente y los profesionales, la dosimetría clínica y la calibración de las Unidades de Radioterapia, hacer cálculos mucho más precisos y exactos, aportando la seguridad necesaria para la administración de estos tratamientos.

La *personalización de los tratamientos*, con técnicas cuya finalidad será siempre obtener el objetivo ya descrito, máxima o total dosis al tumor y mínima o nula a los tejidos sanos. Los llamados *Cone Beam* para la realización de una TC previa a cada sesión de tratamiento, consiguiendo así una sesión diaria de radioterapia guiada por imagen. Multimicroláminas de 2 mm para la conformación ideal.

Tratamientos muy rápidos y precisos mediante técnicas como la radioterapia volumétrica en arco, VMAT, que permite tratar al paciente mientras el *Gantry*, cabezal del acelerador, va girando, a la vez que se van moviendo las multiláminas y conformando distintos haces de tratamiento sobre el objetivo. Errores, de existir, inferiores al milímetro. Tratamientos, por tanto, cada vez más precisos.

Radioterapia intraoperatória. Un aplicador del acelerador lineal, colocado sobre el lecho anatómico donde estaba el tumor una vez extirpado, administra una alta dosis única de radiación con la finalidad de destruir posibles restos microscópicos del mismo. Requiere mantener al paciente bajo anestesia y condiciones especiales de protección radiológica durante la irradiación si ésta se hace en el propio quirófano.

Las técnicas de radiocirugía y radioterapia estereotáxica, aportan altas dosis con máxima precisión, con giro de 360 grados, sobre puntos muy precisos. Equipos como *Cyberknife* o *Gammaknife* son de uso prácticamente exclusivo para estas técnicas.

Como consecuencia en lo práctico

El conjunto de avances técnicos descritos que suponen un reto permanente y de aportaciones continuas, por un lado y el mayor conocimiento la biología tumoral y de los tejidos humanos por otro, como respuesta a la radioterapia, han conseguido en la actualidad:

- Mayor precisión adaptada individualmente.
- Mejor calidad, menor toxicidad y posible combinación con terapias radiosensibilizántes.
- Mejores resultados. Mayor control local. Menor daño a tejidos sanos. Mejor supervivencia de pacientes oncológicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Técnicas de Imagen en Medicina Nuclear. Vallejo Carrascal. C. 2019. Edit. Síntesis.
[2]. Tratado de Medicina Nuclear en la Práctica Clínica. Soriano A., Martín-Comín A., García J. 2019.
[3]. Libro Blanco de Oncología Radioterápica. SEOR XXI
[4]. Manual Práctico de Oncología Radioterápica. Alburquerque Carbuccia H. M. Edit. Caracol. 2006
[5]. Oncología Radioterápica. Principios, métodos, gestión y práctica clínica. Calvo Manuel F. A. Edit. Aran. 2010.