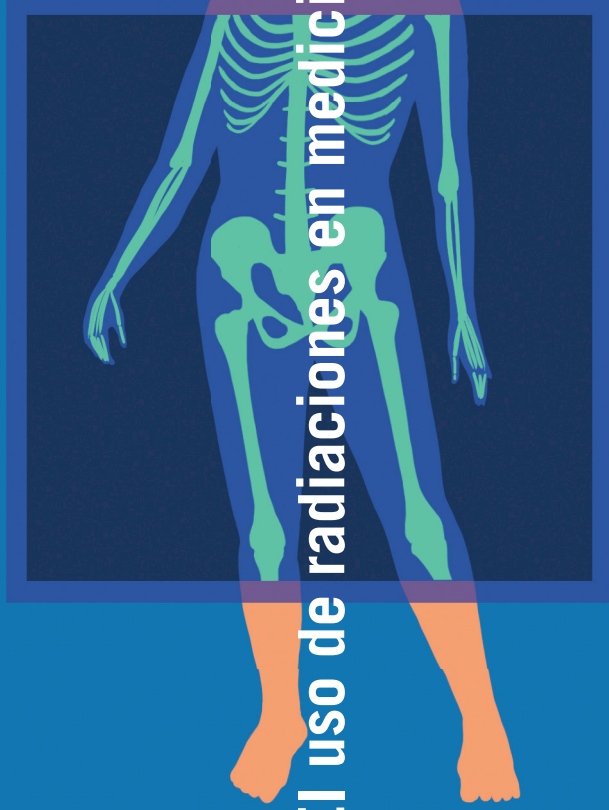


El uso de radiaciones en medicina / CSN





Referencia: SDB-04.10

© CSN, Consejo de Seguridad Nuclear, 2013

Edita y distribuye:

Consejo de Seguridad Nuclear

Pedro Justo Dorado Dellmans, 11

28040 Madrid. España

Tel.: 91 346 01 00

Fax: 91 346 05 88

<http://www.csn.es>

E-mail: comunicaciones@csn.es

Coordinación: Divulga S.L.

Textos: Elena Zafra

Diseño y dibujos: Raquel Ramírez

Impreso por:

Depósito Legal: M-23768-2013



Impreso en papel reciclado



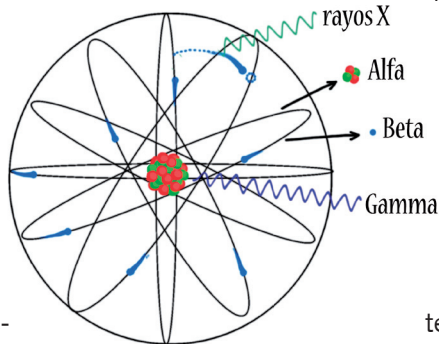
Introducción: radiaciones para curar	5
Breve historia del uso médico de las radiaciones ionizantes	6
Usos de las radiaciones ionizantes en medicina	8
Diagnóstico	8
Terapia	18
Otros usos	25
El Consejo de Seguridad Nuclear	27

Introducción: radiaciones para curar

Vivimos rodeados por radiaciones. Allá donde estemos convivimos con ellas, es decir, con la emisión, propagación y transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o de partículas.

Podemos encontrar su rastro midiendo el fondo de microondas del universo –la última reminiscencia del Big Bang– o en cualquier rincón de la Tierra, procedente del espacio exterior o de la composición de las rocas, por lo que su intensidad y característica varían según las coordenadas de cada lugar.

Una parte de estas radiaciones que nos rodean procede de los isótopos inestables de algunos elementos que encontramos en la naturaleza –como el polonio, el radio o el uranio–, que presentan una propiedad llamada radiactividad. Debido a esta falta de estabilidad, los isótopos radiactivos se desintegran espontáneamente mediante cambios en su núcleo y emiten parte de su energía en forma de partículas o de radiación electromagnética.



Estos elementos existen en el entorno natural, en nuestro propio cuerpo y en todo el universo desde sus orígenes.

Además de la radiación natural, los seres humanos hemos sido capaces de generar radiaciones de forma artificial, provocando reacciones nucleares o acelerando partículas. Su adecuada utilización permite diagnosticar y tratar enfermedades, obtener energía, esterilizar materiales o conservar mejor los alimentos, entre otras aplicaciones. Un ejemplo común es el uso de los rayos X para explorar el interior del cuerpo mediante radiografías y tomografías computarizadas. Tanto la radiación natural como la artificial puede ser de diferentes tipos: alfa, beta, gamma, rayos X y radiación neutrónica. Cada una de ellas puede presentarse con diferente energía y poder de penetración en la materia. Estas radiaciones tienen capacidad de ionizar de forma directa o indirecta el medio, es decir, “arrancar” electrones de los átomos de los cuerpos con los que impactan.

Las radiaciones llevan millones de años modelando el mundo que conocemos a todas las escalas. Desde estas páginas queremos mostrar cómo el control de los átomos inestables, la aceleración de partículas y los efectos que producen en la materia encierran un gran potencial que el ser humano ha sabido aprovechar desde hace más de un siglo para curar, investigar y mejorar sus posibilidades de supervivencia.

Breve historia del uso médico de las radiaciones ionizantes

En 1895 el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen descubrió la primera radiación ionizante de la que se tiene noticia: los rayos X. Según sus observaciones, esta radiación produce la ionización del aire, se propaga en línea recta y no se desvía al atravesar campos eléctricos o magnéticos. En 1901, Roentgen recibió el premio Nobel de Física, pero siempre se le recordará por ser el autor de la primera radiografía de la historia –que mostraba los huesos de la mano izquierda de su esposa Berta- y evidenciar el gran poder de penetración de los rayos X.

Un año después, el francés Henry Becquerel, que compartiría el Nobel de Física con Pierre y Marie Curie en 1903, descubrió la radiactividad natural al estudiar la fosforescencia de las sales de uranio y demostró que cualquier sal de uranio emite radiaciones muy penetrantes que provocan la ionización de los gases.

Apenas un año más tarde, Foveau de Courmelles creó la palabra “radioterapia” y en 1898 Georg Perthes empezó a utilizar las radiaciones en el tratamiento de tumores malignos, al tiempo que el uso de las radiografías se generalizaba e incluso el ejército británico en Sudán utilizaba ya un equipo de rayos X para atender a sus soldados heridos. Paralelamente Marie Curie, que había empezado a desarrollar sus investigaciones sobre los compuestos de torio y uranio

en 1897, descubría junto a su marido el polonio y más tarde, el radio, una sustancia noventa veces más radiactiva que el uranio, que tendría importantes aplicaciones en medicina.

Sin embargo, no todo fueron avances esperanzadores. En 1903 Von Friebe publicó varios casos que relacionaban esterilidad y cáncer con exposición a los rayos X: eran los primeros indicios de los efectos perjudiciales que pueden tener estas radiaciones en el organismo. Tendría que pasar más de medio siglo para que, tras numerosos estudios, Alice Stewart y otros autores comprobaran que existe también una relación entre la leucemia y la irradiación con rayos X.

En 1904, al tiempo que se verificaba el poder de las emisiones del radio para destruir



células enfermas, el matrimonio Curie rechazó patentar el proceso de obtención de este elemento con vistas a que su uso pudiera generalizarse más fácilmente. De hecho, lejos de exigir el beneficio económico que les hubiera reportado, Marie Curie fundó el Instituto del Radio en París, del que fue nombrada directora, organizó los servicios radiológicos del ejército francés durante la Primera Guerra Mundial e invirtió la dotación del Premio Nobel en adquirir ambulancias con rayos X e instalaciones de radiodiagnóstico para varios hospitales.

Entre 1920 y 1939 se produjeron importantes avances técnicos en el uso de la radiación ionizante para el tratamiento de tumores, y se



incrementó la eficacia del proceso de radioterapia, de forma que los tejidos sanos circundantes se veían cada vez menos afectados. En 1934, Irene Curie, hija de Pierre y Marie, descubrió la radiactividad artificial junto a su esposo y colaborador Frédéric Joliot. Ambos consiguieron crear un radioisótopo que no existía en la naturaleza y recibieron el Premio Nobel de Química, un año después, por sus trabajos en la síntesis de nuevos elementos radiactivos.

La nueva revolución en el radiodiagnóstico llegó en 1972 con la puesta en marcha de la tomografía axial computarizada, una tecnología de exploración que utiliza rayos X para producir imágenes detalladas de cortes axiales del cuerpo. El físico norteamericano Allan M. Cormack y el ingeniero electrónico inglés Godfrey Newbold Hounsfield obtuvieron por su desarrollo el Premio Nobel de Medicina en 1979.

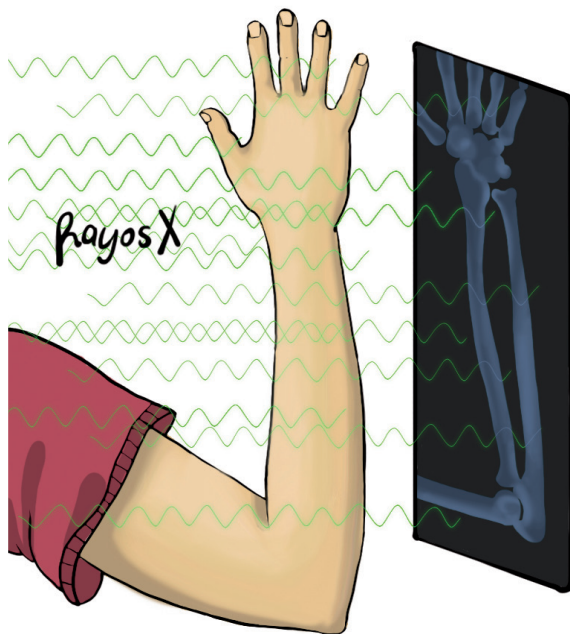
Durante las tres décadas siguientes se han sucedido destacados avances en el empleo tanto de elementos radiactivos como de equipos generadores de radiación ionizante en terapia y diagnóstico. Estos procedimientos han abierto un amplio campo de posibilidades de aplicación de las radiaciones ionizantes en el ámbito sanitario que, encauzado mediante el conocimiento profundo de las leyes físico-químicas y limitado por las pautas que garantizan la seguridad radiológica de pacientes, médicos y miembros de la población en general, se han convertido en grandes aliados de nuestra salud.

Usos de las radiaciones ionizantes en medicina

Diagnóstico

Las radiaciones ionizantes se utilizan a diario para realizar una gran variedad de estudios diagnósticos. Tanto la medicina nuclear (gammagrafía, tomografía por emisión de positrones) como el radiodiagnóstico (radiografías y TC) emplean las radiaciones ionizantes.

Sin embargo, estas dos áreas del diagnóstico presentan una diferencia esencial. Mientras que la medicina nuclear se puede servir de la



Radiografía.

radioquímica atómica para detectar y medir la función intracelular y generar imágenes metabólicas, el radiodiagnóstico comprende las técnicas de imagen cuya información, basada en el registro del contraste de densidades, es fundamentalmente morfológica y anatómica.

Explorar con rayos X: el radiodiagnóstico

Se denomina radiodiagnóstico al conjunto de procedimientos de exploración y visualización de las estructuras anatómicas del interior del cuerpo mediante la utilización de rayos X, radiaciones ionizantes producidas de forma artificial aplicando una diferencia de potencial determinada en un tubo de vacío. Cuanto mayor es la tensión, que puede variar desde 25 kV para una mamografía hasta un máximo de 200 kV, mayor es su penetración.

• Radiografía

Las radiografías se obtienen mediante la interposición de un cuerpo entre la fuente de radiación de rayos X -que es capaz de atravesar los tejidos blandos pero no los más densos- y el receptor, que en las radiografías convencionales es una placa fotográfica. Así, las partes más densas, como los huesos, aparecen registradas como más claras dentro de una escala de grises, mientras las partes más blandas, como por ejemplo un pulmón, dejan pasar más radiación y aparecen como más oscuras al revelar la placa.

Existen varios tipos de exámenes radiológicos convencionales: la radiografía de tórax, abdomen, columna, la mamografía y las exploraciones dentales. En la actualidad, cada español se hace de media algo más de una radiografía al año, lo que las convierte en la principal fuente de radiación artificial que reciben los habitantes de nuestro país. No obstante, una radiografía de tórax -considerada la medida de referencia- supone someterse a una irradiación de tan solo 0,02 mSv, muy lejos de las dosis que podrían resultar preocupantes.

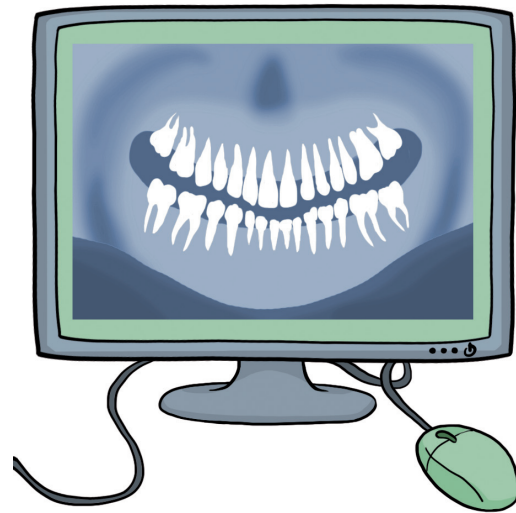
• Radiología digital

La aplicación de la informática al diagnóstico médico ha permitido mejorar la obtención, el almacenamiento y el tratamiento de la imagen, dando lugar al nacimiento de la radiología digital. El tratamiento digital de las imágenes médicas se utiliza en técnicas como la tomografía computarizada (TC) y la angiografía digital, y desde hace unos treinta años se aplica en la radiología convencional (radiografías computarizadas) y en las exploraciones dentales.

Una de las ventajas de la imagen digital es que permite ajustes posteriores según las necesidades del médico. Es decir, si una radiografía ha salido muy clara se puede conseguir una mayor intensidad de grises, o si ha salido muy oscura, se puede atenuar dicha intensidad. También permite a los profesionales seleccionar determinadas áreas de la imagen para estudiarlas con detalle o de-

limitar previamente la zona de interés mediante la administración de contrastes para resaltar en la imagen radiográfica las estructuras anatómicas que se pretenden estudiar. Otra posibilidad consiste en administrar al paciente sustancias para eliminar de la imagen radiográfica estructuras que dificultan el diagnóstico. Esta última aplicación se denomina “sustracción digital”.

En la actualidad, el desarrollo de la informática permite además la transmisión de las imágenes digitales a distancia, la posibilidad de archivarlas y compartirlas mediante sistemas PAC (del inglés Picture Archiving and Communication Systems) y la creación de entornos donde las imágenes médicas se encuentran integradas con el resto de información clínica de los pacientes.



- Tomografía computarizada

La llamada tomografía computarizada (TC), basada también en la aplicación de los rayos X, fue la pionera de las técnicas digitales que llegaron al campo de la radiología a principios de los años setenta, y hoy en día sigue siendo una técnica muy común. En lugar de obtener una imagen como la radiografía convencional, la tomografía computarizada obtiene varias de ellas al hacer rotar el tubo de rayos X alrededor del paciente, lo que mediante el tratamiento informático posterior permite obtener imágenes de cortes transversales del cuerpo humano.

Posteriormente, mediante nuevos tratamientos por ordenador, es posible obtener una reconstrucción en tres dimensiones de la estructura en estudio.

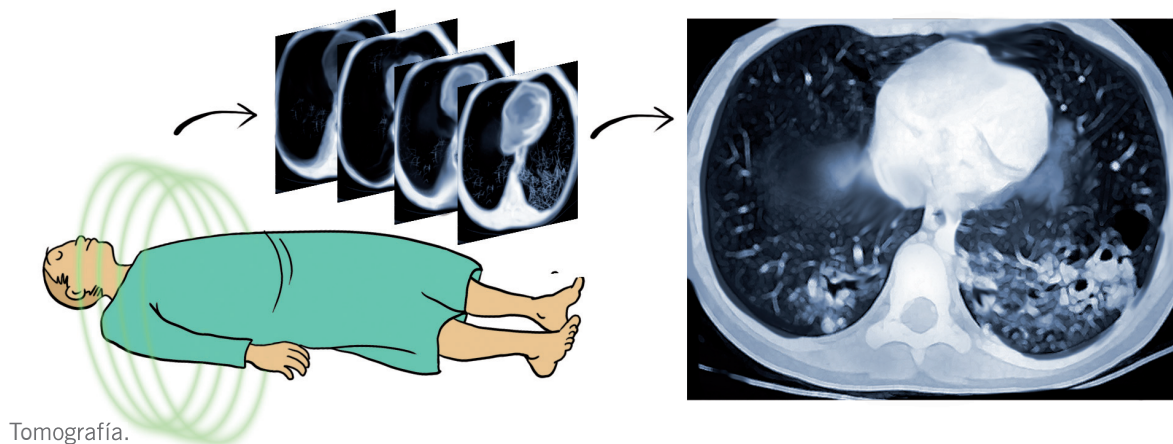
Pese a que supone una mayor recepción de radiación por parte del paciente, es a menudo

la exploración óptima para diagnosticar muchos problemas de tórax, abdomen y columna vertebral. Además, en muchos casos puede ser la técnica idónea para los traumatismos craneales y los accidentes cerebrovasculares.

- Fluoroscopia y radiografía computarizada

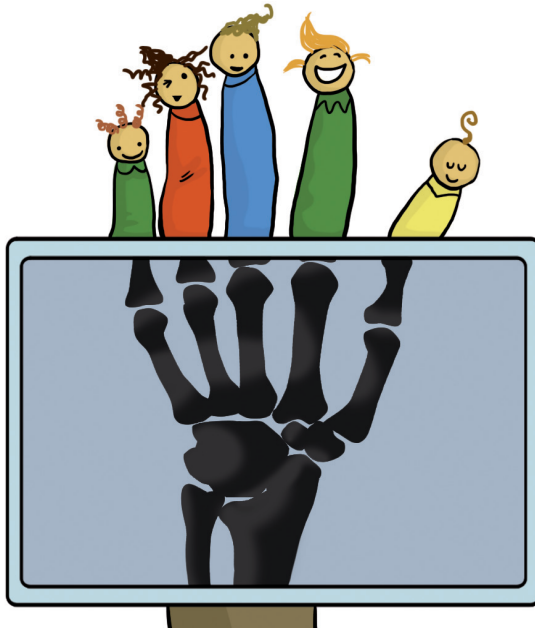
Un caso destacable lo constituye la fluoroscopia, o escopia, una variante de la radiografía en la que el receptor -en lugar de una placa fotográfica- es una pantalla fluorescente. El tratamiento posterior de esta información, mediante intensificadores de imagen, permite la visualización en un monitor de televisión.

Estos sistemas han demostrado una gran adaptabilidad para su aplicación en radiología digital y constituyen la base de la llamada radiografía computarizada (RC). En un primer momento, la imagen obtenida a partir del registro de la radiación que llega a la capa de fósforo fotoes-



timulable sigue siendo analógica, pero los equipos más modernos pueden convertirla en una radiografía digital gracias a que incorporan láseres infrarrojos -que realizan un barrido similar al de una cámara de televisión- un intensificador de imagen y un conversor analógico-digital. Esto permite obtener imágenes en tiempo real de las estructuras anatómicas internas de los pacientes, grabarlas y reproducirlas en un monitor.

La radiografía computarizada permite la digitalización de los sistemas convencionales sin necesidad de cambiar los equipos de rayos X, solo sustituyendo los chasis placa-pantalla por otros que incorporen en su lugar una lámina de



Radiografía con paneles planos.

fósforo fotoestimulable. Además, aunque es necesario instalar equipos lectores de RC, bastaría con disponer de algunos de ellos, ya que pueden dar servicio a la vez a varias salas de rayos X.

Esta técnica también presenta inconvenientes, como el hecho de que la emisión de radiación puede prolongarse durante cierto tiempo para tener la posibilidad de observar imágenes en movimiento. Sin embargo, se reduce mucho la repetición de exploraciones ya que es prácticamente imposible que la imagen salga sobreexpuesta o subexpuesta, lo que repercute en una posible disminución de la dosis que reciben los pacientes.

• Radiografía con paneles planos

A diferencia de las radiografías digitales, las imágenes radiológicas con paneles planos se obtienen directamente a partir de la interacción de los rayos X con un detector de características avanzadas, es decir, se trata de un proceso digital desde el comienzo. No hace falta revelado, lectura láser ni ningún otro paso intermedio, sino que los resultados del impacto de los rayos X en el sustrato de transistores de película delgada que cubren el detector se convierten de forma inmediata en señales eléctricas que son captadas y procesadas.

Estos aparatos son capaces de producir imágenes de buena calidad, con grandes posibilidades de adaptación a las necesidades específicas de cada caso y con una resolución



de contraste muy superior a la de los sistemas convencionales. Además, su uso reduce la dosis de radiación recibida por los pacientes, gracias a la alta eficacia de sus detectores. Actualmente existen varias tecnologías disponibles en lo que se refiere a la estructura y propiedades del detector, entre las que destacan las basadas en detectores de selenio y de silicio.

Medicina nuclear

La medicina nuclear emplea isótopos radiactivos (radiofármacos) que se introducen en el cuerpo del paciente y cuya actividad puede seguirse desde el exterior para obtener imágenes diagnósticas. Estos isótopos se llaman también trazadores porque sirven para describir o dibujar la funcionalidad de un órgano o un tumor, además de su tamaño, forma y apariencia. Los trazadores (como, por ejemplo, el tecnecio-99m) se administran en dosis muy pequeñas, no tienen acción farmacoterapéutica y tienen escasos efectos secundarios. La vida media de estas fuentes radiactivas que se inyectan es además muy corta (no suele superar las seis horas), por lo que la irradiación a la que se somete al paciente puede ser menor que en una radiografía.

El funcionamiento de estos trazadores es sencillo: se administran generalmente por vía intravenosa y se acumulan en un tejido, órgano o sistema determinado. A continuación se sitúa al paciente ante una cámara capaz de detectar

la radiación gamma y se obtiene la imagen de la zona donde se ha fijado el trazador a partir de la detección de la radiación que este emite. El trazador termina su recorrido siendo excretado del cuerpo, generalmente a través de la orina. Aunque su empleo en el diagnóstico oncológico sea el más conocido, la medicina nuclear tiene un amplio abanico de aplicaciones a la hora de

identificar enfermedades neurológicas, pulmonares, ortopédicas, cardíacas y renales, entre otras muchas.

Como decíamos anteriormente, las imágenes obtenidas mediante este sistema no son solo morfológicas, como podría ser la resultante de una radiografía o una TC, sino también funcionales, es decir, permiten comprobar cómo funciona un órgano. Esta utilidad motiva que, en ocasiones, se utilicen ambas técnicas de forma complementaria para obtener un mejor diagnóstico, dando lugar a procedimientos que combinan radiodiagnóstico y medicina nuclear como la PET-TC o la SPECT-TC.

• PET

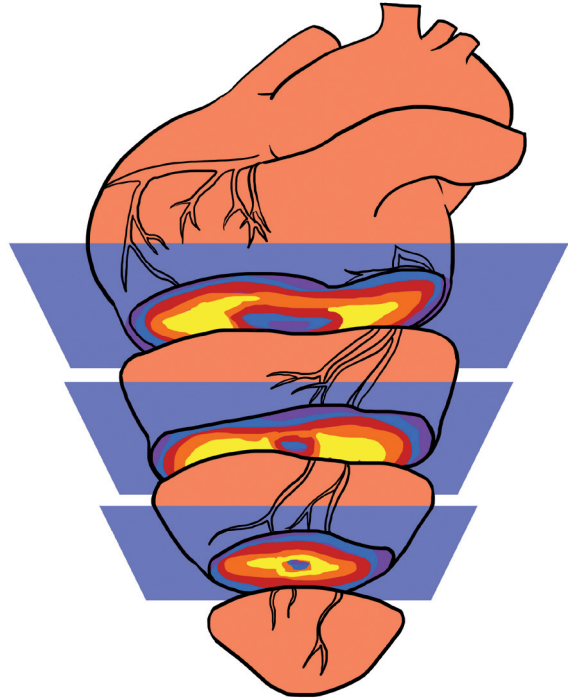
La Tomografía por Emisión de Positrones (PET, por sus siglas en inglés) es una técnica no invasiva que permite visualizar y cuantificar diferentes procesos bioquímicos y fisiológicos como el metabolismo energético, la multiplicación de las células, la tasa de consumo de oxígeno o la expresión génica, entre otros. Además, en relación a cualquiera de los procesos anteriores y mediante la PET, es posible analizar la afinidad de un compuesto por un receptor determinado o prever el efecto que provocará la administración de un medicamento. Para ello, se usan fármacos con emisores de positrones que se administran por vía intravenosa, se distribuyen por la sangre y son absorbidos en los órganos o tejidos de interés.



Los positrones se forman durante la desintegración radiactiva de un isótopo inestable. Tras chocar varias veces, el positrón pierde su energía y se combina con un electrón, convirtiéndose la masa de ambas partículas en energía. Así, se generan dos fotones que serán emitidos a la vez y en sentidos opuestos, y que pueden salir del organismo y ser detectados en el exterior por el tomógrafo PET.

Uno de los ejemplos más conocidos de aplicación de la PET es el que permite obtener imágenes del cerebro y de otros órganos en plena actividad y en 3D. Los pacientes reciben cierta cantidad de glucosa marcada con un emisor de positrones, normalmente con una vida media de apenas unos minutos, que es absorbida por el cerebro en función de las necesidades de cada zona. Como los tejidos tumorales consumen más glucosa, se pueden identificar lesiones, observar el estado en el que se encuentra el tumor en un solo estudio o localizar recurrencias.

Para obtener la imagen diagnóstica se necesitan tres instalaciones: un ciclotrón, donde se crean los emisores de positrones; un laboratorio radioquímico, en el que sintetizan los radiofármacos, es decir, donde se asocia el emisor de positrones al “vehículo molecular” que lo llevará al tejido donde va a actuar; y un tomógrafo PET, un sistema que detecta al mismo tiempo los dos fotones producidos al chocar el positrón y el electrón. La señal eléctrica de los detec-



tores se amplía y se digitaliza y el ordenador reconstruye las imágenes tomográficas finales.

• SPECT

Otra técnica de diagnóstico que proporciona información funcional y metabólica es la Tomografía Computarizada por Emisión de Fotón Único (SPECT, por sus siglas en inglés), que permite la obtención de imágenes médicas tras administrar al paciente un isótopo radiactivo, normalmente por vía intravenosa o inhalatoria.

Estos radiofármacos se difunden por el organismo y son captados de forma selectiva por diferentes órganos y tejidos. En lugar de servir-se de rayos X como las radiografías, el isótopo inyectado emite rayos gamma que se detectan mediante una gamma-cámara que va girando alrededor del paciente y permite una reconstrucción tridimensional.

La SPECT cerebral es de gran utilidad en el diagnóstico de enfermedades como el alzhéimer, otras demencias y epilepsia. Mediante esta técnica se detectan las zonas del cerebro alteradas a través de la observación del flujo sanguíneo en las distintas áreas de este órgano.

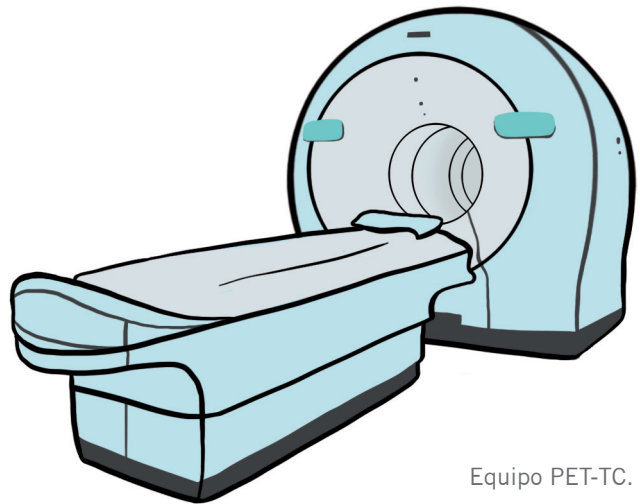
Siguiendo el mismo principio, la SPECT cardiaca ofrece información del flujo sanguíneo del miocardio y de su funcionamiento. De acuerdo a las alteraciones observadas, como por ejemplo zonas musculares muertas (a causa de un infarto de miocardio) o que reciben poca sangre (isquemia coronaria), se utiliza para determinar, por ejemplo, si un paciente debe someterse a un cateterismo.

• Combinación PET-TC

Mediante la PET se obtienen imágenes de gran calidad de la distribución corporal del radiotrazador en el cuerpo del paciente, pero existe a menudo dificultad en la interpretación de estos estudios debido a la mala definición de las estructuras anatómicas, que no

se captan correctamente. En cambio, si complementamos los datos obtenidos con los de una TC podremos superar esa dificultad que puede traducirse en que, por ejemplo, sea imposible precisar la localización anatómica exacta de focos tumorales en el cerebro.

La suma de los datos de la TC y la PET resulta complicada porque muchas veces se comparan cortes de diferente grosor, las exploraciones se realizan en diferentes momentos y posiciones o no hay concordancia entre los órganos y los movimientos del paciente. Para registrar de forma precisa los datos anatómicos y metabólicos, obtenidos respectivamente mediante la TC y la PET, es necesario fundir las imágenes mediante técnicas de software, o bien puede optarse por captarlas a través de un nuevo hardware.



Equipo PET-TC.

La primera alternativa resulta efectiva para órganos relativamente fijos (como el cerebro), mientras que para otros como el hígado, el corazón o el colon, la segunda opción suele ser la mejor y ha dado lugar al diseño de aparatos basados en la combinación de una TC y una PET situados generalmente uno a continuación del otro. Estos equipos PET-TC obtienen imágenes funcionales y anatómicas con un hardware único sin mover al paciente de su posición.



Imagen captada por la SPECT-TC mostrando inflamación de una articulación.

• Combinación SPECT-TC

La SPECT-TC es otro instrumento “híbrido” utilizado para la adquisición de imágenes médicas que permitan un diagnóstico más preciso.

Este sistema, cuyo primer equipo comercial se puso en funcionamiento en 1999, combina la gamma-cámara de la SPECT que ofrece información funcional y metabólica con las imágenes anatómicas de la TC para detectar zonas donde la absorción anormal de un radiotrazador indique que la función de los órganos puede estar alterada.

La principal diferencia respecto a la SPECT es que ofrece una información más precisa de estructuras anatómicas más complejas o donde es más difícil conseguir un diagnóstico.

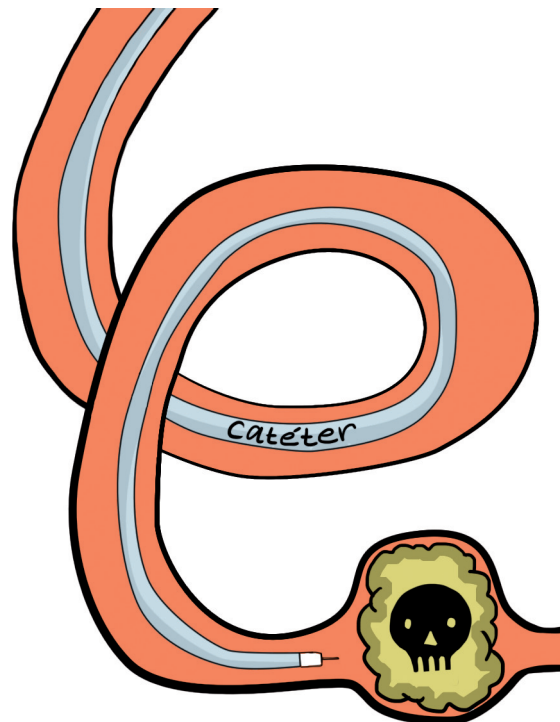
Por otro lado, la resolución espacial que ofrece la Tomografía por Emisión de Positrones es superior a la de la SPECT, y los equipos comerciales SPECT-TC de primera generación están equipados con tomógrafos TC de baja resolución. No obstante, en los últimos años está creciendo el interés por desarrollar equipos que incorporen a este sistema TC estándar de alta definición que permitan mejorar la calidad de imagen y reducir el tiempo de adquisición de las mismas, siguiendo la estela de las PET-TC comerciales que utilizan tomógrafos TC multicapa.

Radiología intervencionista

Es una subespecialidad de la radiología que facilita la realización de procedimientos mínimamente invasivos para diagnóstico o tratamiento de diversas patologías. Se realiza en salas hospitalarias dotadas de un sistema de imagen radiográfico y monitores para visualizar las imágenes captadas generalmente por TC, o en otras ocasiones, a través de resonancia magnética o ecografía.

Los especialistas intervencionistas se basan en la imagen médica para diagnosticar a los pacientes pero no solo estudian imágenes sino que también solucionan problemas clínicos. Con la ayuda de una guía con un diámetro de entre 1 y 2 milímetros introducen catéteres en los vasos sanguíneos u otras vías para guiarlos hasta la localización de la enfermedad y así poder tratarla. De esta forma arreglan fracturas, colocan prótesis y sondas, eliminan cólicos hepáticos y cálculos renales mediante la aplicación de ondas de radio, o hacen cateterismos, entre otras intervenciones.

La radiología intervencionista la practican diversos especialistas médicos expertos en estas técnicas en la que convergen procedimientos diagnósticos y actuaciones terapéuticas que reducen la necesidad de prácticas quirúrgicas, el riesgo, el dolor y el tiempo de hospitalización. De hecho, en la mayoría de los casos no requiere anestesia general e implica una convalecencia menor en comparación con la cirugía tradicional.



Radiología intervencionista.

Terapia

Además de utilizar las radiaciones para diagnosticar enfermedades y observar su evolución, podemos aplicarlas al tratamiento de algunas dolencias con el objetivo de curarlas completamente o de paliar los efectos adversos que causan en el organismo. A continuación vamos a destacar algunas de las técnicas más utilizadas.

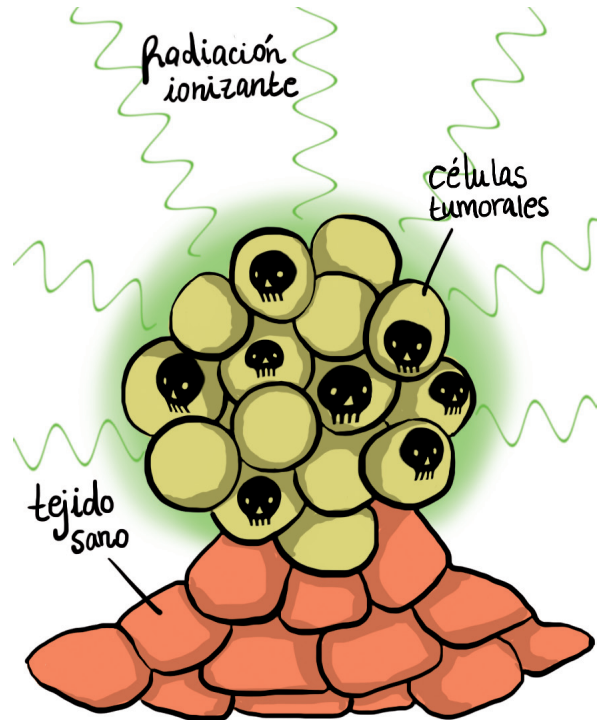
Radioterapia

La radioterapia, que se emplea principalmente en el tratamiento del cáncer (radioterapia oncológica), utiliza la radiación ionizante para destruir e impedir que se reproduzcan las células cancerígenas. Es un tratamiento local o loco-regional (cuando se incluyen los ganglios cercanos al tumor) y abarca varias técnicas que implican exposición externa o interna a fuentes radiactivas.

Las células que forman un tumor se dividen rápidamente y son muy sensibles a la radiación ionizante, que las destruye con más facilidad que a las células normales. Es muy importante aplicar al tumor la dosis correcta e irradiar lo menos posible los tejidos sanos de alrededor.

Existen distintos tipos de radioterapia dependiendo del momento en que esta se administre y su objetivo. El médico especialista decidirá en cada caso cuál puede ser más efectiva, y de acuerdo a ello puede aconsejar una radioterapia

radical (administrada como único tratamiento), neoadyuvante (orientada a reducir el tamaño del tumor y facilitar la cirugía posterior), adyuvante (destinada a destruir células malignas residuales que puedan existir aún tras la cirugía o la quimioterapia para consolidar así el tratamiento), concomitante (simultánea a otra terapia para potenciar los resultados de ambas) o intraoperatoria (administrada durante la cirugía). Las radiaciones que se utilizan en radioterapia son generadas habitualmente por tubos de rayos X (que trabajan con radiación de hasta



Radioterapia.

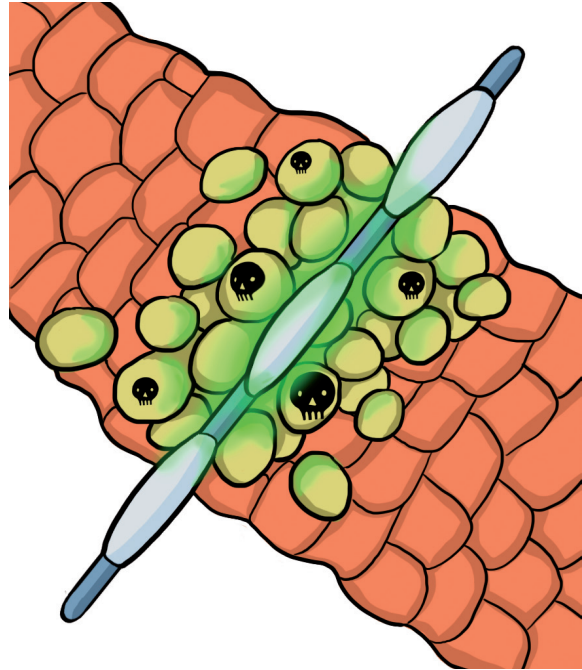
250 kV) y aceleradores lineales de electrones (que pueden alcanzar hasta 20.000 kV) dependiendo de la profundidad del tumor y de la penetración que se quiera conseguir.

Aunque actualmente su uso se ha reducido mucho, otra fuente empleada en terapia es el cobalto 60, que emite rayos gamma de alta energía en las llamadas “unidades de cobaltoterapia”. Este isótopo radiactivo inserto en una cápsula de aproximadamente un centímetro de anchura es capaz de proporcionar altas dosis de radiación al tumor. Estos aparatos han sido reemplazados por los aceleradores lineales de electrones, que producen radiaciones al acelerarse en su interior una corriente de electrones mediante microondas.

Tipos de radioterapia

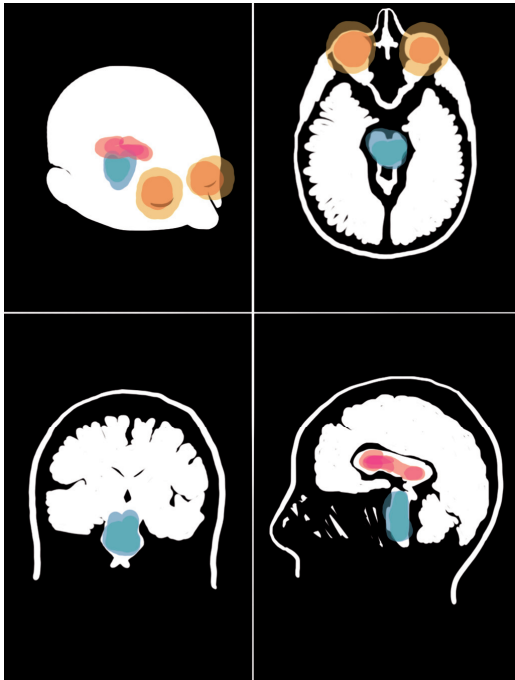
- **Braquiterapia**

Esta técnica consiste en tratar al paciente a muy corta distancia, incluso colocando fuentes radiactivas como el cesio 137, el iridio 192 o el yodo 125 dentro de su cuerpo, para destruir las células cancerosas. La braquiterapia se utiliza, por ejemplo, para tratar el cáncer de cuello de útero, de endometrio y de vagina, y en el caso de cáncer de mama se emplea para reducir el tamaño del tumor cuando la invasión es muy grande e inoperable. Mediante unas agujas que guían la intervención, se introducen en la mama unos alambres de iridio 192 que emiten radiación gamma.



Implantación de fuentes radiactivas. Braquiterapia.

Según la forma de administración, la braquiterapia se clasifica en intracavitaria, cuando se aprovecha un hueco anatómico existente (por ejemplo, el útero o la vagina); intersticial, cuando se coloca directamente en el interior del tejido tumoral; y superficial, cuando los radioisótopos se colocan en el exterior del cuerpo sobre el tumor, por ejemplo, en el cáncer de piel.



Localización del tumor o malformación en las tres dimensiones.

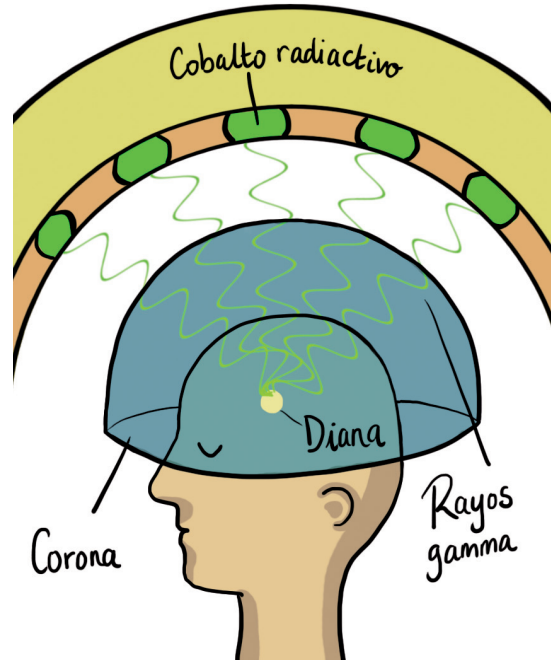
El tiempo que se mantienen las fuentes radiactivas en contacto con el cuerpo varía entre algunos minutos y varios días, y a veces se realizan implantes permanentes –que reducen la permanencia hospitalaria exigida por otros tipos de tratamiento con irradiación– en los que se colocan al paciente pequeñas pastillas radiactivas de paladio 103 o yodo 125 (semillas).

• Teleterapia

Es la forma más común de aplicación de la radioterapia en el tratamiento del cáncer. Se usa para tratar en profundidad todo tipo de tumores sólidos mediante la aplicación de las radiaciones desde el exterior del cuerpo, manteniendo una separación amplia entre la fuente emisora de radiación (fuente radiactiva o equipo generador) y la zona a tratar.

• Radiocirugía

La radiocirugía –también conocida como radioterapia estereotáxica– es un procedimiento que permite el tratamiento no invasivo de distintos tipos de tumores en espacios donde la cirugía convencional podría provocar daños importantes, como en zonas profundas del cerebro. Es una técnica muy eficaz y especialmente indicada para quienes no pueden someterse a una operación, como ancianos o personas muy enfermas.



Radiocirugía.

En radiocirugía se utilizan diferentes equipos, entre los que destaca el bisturí gamma y los aceleradores de fotones y protones.

El bisturí gamma fue desarrollado por Lars Leksell en 1968 y se emplea generalmente para tumores de tamaño pequeño que tienen un crecimiento bien delimitado. En estas zonas se aplica un conjunto de rayos gamma emitidos desde diferentes ángulos que se concentran en el punto deseado. Allí, la suma de la energía de los diferentes haces produce la destrucción del tejido, afectando mínimamente a las células sanas de alrededor.

La radiación se puede emitir desde puntos muy finos, en cuyo caso se emplean hasta dos

centenares de haces, o mediante cuatro o cinco arcos que radian en forma de planos. Para la determinación exacta de su confluencia los médicos colocan sobre el cráneo del paciente una guía estereotáxica –una 'corona' metálica graduada que se sujeta al hueso y a la mesa de terapia o a una plataforma en el suelo– y se ayudan de imágenes de la zona obtenidas mediante resonancia magnética nuclear, TC o angiografía, que el sistema informático que controla los haces tiene en cuenta a la hora de delimitar las coordenadas de la operación.

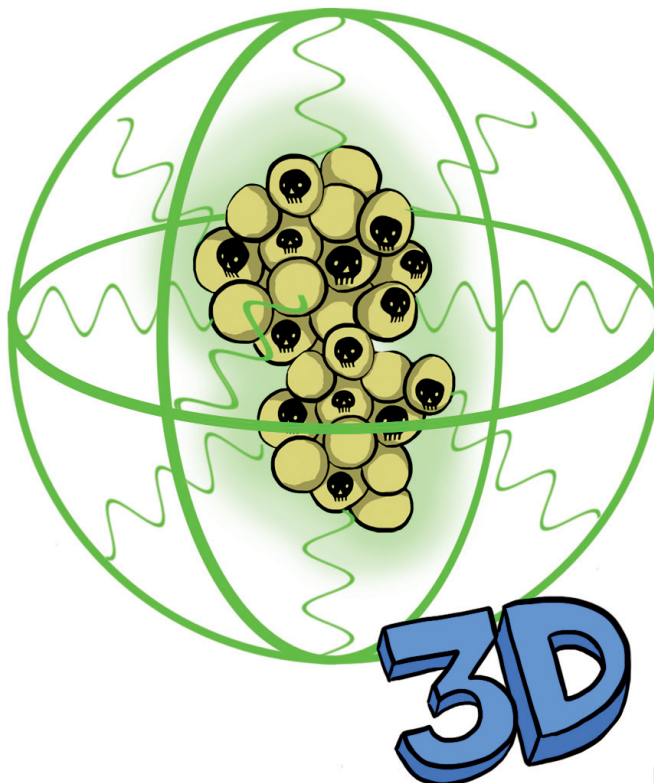
Por su parte, los aceleradores lineales aportan a las partículas subatómicas cargadas pequeños incrementos de energía mediante microondas

En ciertas técnicas de radioterapia se utilizan directamente esos electrones, mientras que en otras se los hace colisionar para producir fotones (haces de rayos X de alta energía). El acelerador lineal puede llevar a cabo la radiocirugía en tumores más grandes que el bisturí gamma, en una sola sesión o en varias (estereotáxica fraccionada).

Por último, los aceleradores de protones permiten tratar a pacientes con tumores situados cerca de órganos o estructuras muy sensibles, o a los niños, cuyo organismo debe recibir menos radiación. Los protones, acelerados en un ciclotrón mediante fuerzas electromagnéticas, depositan la mayoría de su carga al final de su recorrido, en un punto que se hace coincidir con la zona tumoral de manera que se focaliza el impacto y los tejidos colindantes se ven poco afectados.

- Radioterapia conformada en tres dimensiones

La llamada “radioterapia conformada en tres dimensiones” (RT3D) utiliza imágenes anatómicas tridimensionales –obtenidas con la ayuda de la TC– para proveer de datos, sobre los volúmenes a irradiar, a los sistemas informáticos de cálculo dosimétrico. Para concentrar lo más posible las dosis en el tumor, la



RT3D.

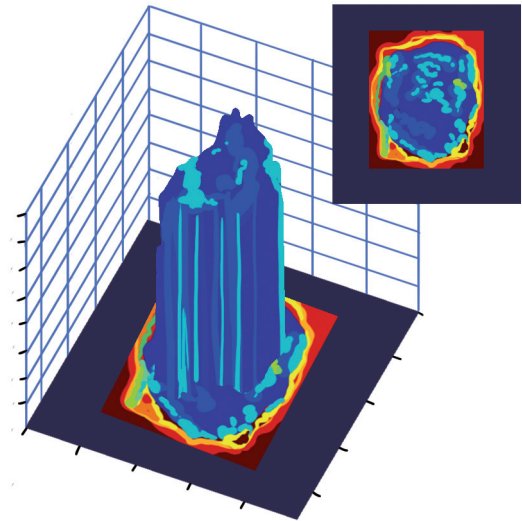
máquina gira alrededor del cuerpo, las radiaciones entran por distintos sitios y confluyen en la zona delimitada de manera que cada uno de los haces se adapta a la forma del tumor.

• Radioterapia de intensidad modulada

Con los tratamientos RT3D en muchas ocasiones el grado de adaptación de la dosis al volumen tumoral y la capacidad de excluir los órganos de riesgo no es óptima. Para superar estas limitaciones surge un nuevo tipo de planificación terapéutica denominado radioterapia de intensidad modulada (IMRT, por sus siglas en inglés) en el que el grado de precisión y las dosis de radiación son dirigidas de forma más homogénea dentro del tumor –gracias a la modulación de las mismas– y tienen una incidencia mínima fuera de él. La clave para ello es conseguir que la intensidad de la radiación sea diferente según zonas definidas previamente. Para esto hace falta que el acelerador lineal (que cuenta con un colimador multiláminas, un dispositivo que consta de dos filas de placas delgadas de aleación de tungsteno) sea guiado por un sistema informático que calcula la dosis y modula la intensidad del haz de radiación.

• Radioterapia guiada por imagen

La exactitud de diseño de volumen que se consigue con la IMRT es muy elevada pero es necesario eliminar del tratamiento las imprecisiones producidas por los movimientos y cambios de volumen de los órganos internos del paciente que se producen, por ejemplo, cuando los pulmones se mueven al respirar y mueven al mismo tiempo el tumor de la zona donde estaba previsto que impactase el haz de radiación.



Evaluación gamma de un campo de IMRT clínico.

Años atrás, este problema obligaba a los médicos a tratar un área más grande del cuerpo cerca del tumor para compensar su movimiento y garantizar que fuese alcanzado, ya que de lo contrario el tratamiento podría perder eficacia. Sin embargo, esto suponía exponer una parte del tejido sano a la radiación.

Ahora, gracias a la radioterapia guiada por imagen (IGRT, por sus siglas en inglés) que puede realizarse con sistemas de tomoterapia helicoidal, los médicos captan imágenes de características iguales a la TC justo en el momento en el que el paciente está siendo irradiado. De esta forma, mientras la camilla se mueve, los técnicos

pueden ajustar la posición con el paciente obteniendo imágenes en cada momento y comparándolas con una TC de planificación. En este equipo, el acelerador lineal gira también 360 grados alrededor del paciente, lo que permite tratar regiones más extensas de forma continua o varios tumores de dimensiones irregulares a la vez.

- Radiocirugía estereotáxica extracraneal

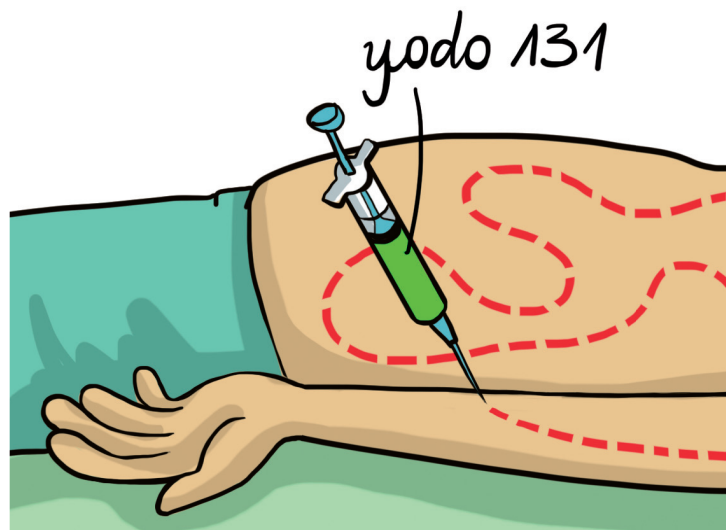
Hoy en día la radiocirugía se utiliza también para tratar otras partes del organismo además de algunas zonas del cerebro, y como prueba de ello encontramos la radioterapia estereotáxica corporal (SBRT, por sus siglas inglesas) que se utiliza también para tratar tumores en vértebras y tumores de tamaño accesible en pulmón, hígado o próstata realizando tratamientos hipofraccionados, en los que se aplica una mayor dosis por sesión en menos sesiones de tratamiento.

En la SBRT se utiliza un avanzado software informático 4D para anticipar los movimientos normales de los órganos internos, como el corazón y los pulmones, que pueden provocar desplazamientos de tumores situados cerca de ellos. De esta forma, a pesar de estas oscilaciones involuntarias, la administración de la radiación es precisa y es posible aplicar externamente altas dosis a un volumen tumoral previamente seleccionado de una forma segura y eficaz, sin dañar los órganos o tejidos de alrededor, con una o pocas fracciones de tratamiento.

La SBRT aporta grandes ventajas en el control tumoral y la comodidad de los pacientes, y puede sustituir a cirugías arriesgadas y con graves efectos secundarios. Pese a ello, su gran complejidad y sus estrictos controles de calidad requieren un aumento de recursos técnicos y humanos en los centros médicos donde se practica.

Terapia metabólica

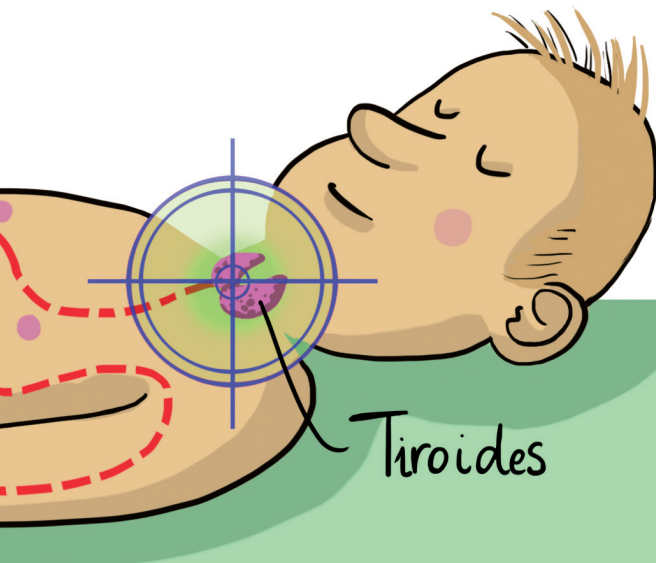
Otra forma de actuar sobre las células tumorales es mediante una “radioterapia interna”. La terapia metabólica utiliza radioisótopos en forma de fuente no encapsulada (abierta) que se inyectan o se beben, o bien se colocan de forma selectiva en los órganos y tejidos a tratar, para irradiar de forma específica y localizada las zonas afectadas.



Tratamiento del cáncer de tiroides con yodo 131.

En esta línea, el caso más representativo es el tratamiento del cáncer de tiroides, para el que se inyecta en el organismo un isótopo radiactivo (yodo 131) y se aprovecha su afinidad con la glándula tiroides. Cuando el elemento inyectado se acumula en ella se consigue focalizar allí una intensa radiación que va destruyendo el tumor.

En el caso de algunas metástasis que resultan muy dolorosas porque el tumor oprime algún nervio, la terapia metabólica puede utilizarse con fines paliativos, por ejemplo, empleando el estroncio 89 que se introduce en el cuerpo para reducir el tamaño del tumor y aliviar el dolor.



Otros usos

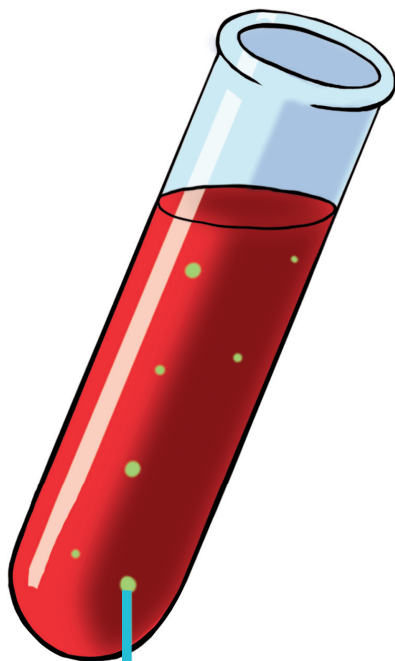
Radioinmunoanálisis (RIA)

La radiactividad puede aprovecharse también en los laboratorios de análisis para realizar lo que se conoce como “radioinmunoanálisis de muestras”. Para ello se emplean materiales radiactivos que identifican sustancias presentes en el organismo en cantidades muy pequeñas, como hormonas y medicamentos.

La técnica se basa en la asociación de un radioisótopo trazador (generalmente yodo-125 o hidrógeno-3) con un anticuerpo que será posteriormente inyectado en la muestra de sangre u orina del paciente. Una vez que se ha producido la reacción antígeno-anticuerpo, esta es detectada gracias a la radiación que emite el isótopo.

El análisis se realiza en un tubo de ensayo –el paciente no está en contacto con el material radiactivo y desaparecen los posibles riesgos asociados– y permite detectar de forma temprana muchos tipos de cáncer, realizar un seguimiento de los pacientes operados para alertar de la reaparición de un tumor maligno o diagnosticar infecciones.

Aunque se trata de una técnica mucho más sensible que otras existentes, y se utiliza tanto en diagnóstico clínico como en investigación biológica, en los últimos años



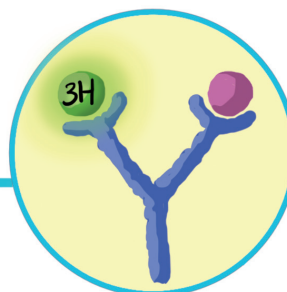
Radioinmunoanálisis.

su uso se ha reducido al aparecer alternativas no radiológicas más eficaces.

Análisis de muestras y esterilización

Las radiaciones pueden utilizarse también para el análisis instrumental mediante técnicas como la fluorescencia de rayos X, que permite conocer la composición elemental exacta de una sustancia. Esta técnica se caracteriza por su rapidez y porque permite analizar de forma cualitativa y cuantitativa varias clases de muestras sólidas y líquidas sin ocasionarles alteraciones o destruirlas. Otra técnica de análisis que emplea radiaciones es la difracción de rayos X, que se utiliza para conocer la estructura cristalina de las muestras.

Asimismo, la irradiación resulta útil para la esterilización de material quirúrgico: hilos de sutura, apósitos, vendas, catéteres o jeringas. En este caso se emplean rayos gamma o electrones.



El Consejo de Seguridad Nuclear

El Consejo de Seguridad Nuclear es un organismo independiente de la Administración General del Estado, que tiene como misión velar por la seguridad nuclear y la protección radiológica de las personas y del medio ambiente. Es un órgano colegiado, integrado por cinco miembros (presidente y cuatro consejeros) propuestos por el Gobierno y refrendados por el Congreso de los Diputados. En total, el CSN cuenta con una plantilla de más de 450 trabajadores, de los cuales aproximadamente la mitad es personal técnico de alta cualificación, especializados en seguridad nuclear y protección radiológica.

Al CSN le corresponde la vigilancia y el control del funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas del país. Se rige por un estatuto propio, pudiendo encomendar algunas de sus funciones a las comunidades autónomas. Debe informar anualmente al Congreso de los Diputados y al Senado y a los parlamentos de las comunidades autónomas, en cuyo territorio están ubicadas las instalaciones nucleares, sobre el desarrollo de sus actividades. Entre sus funciones, en relación con la protección radiológica, destacan las siguientes:

- Vigilar y controlar los niveles de radiación del medioambiente en el territorio nacional.
- Concede y renueva, mediante la realización de pruebas que el propio Consejo establezca, las licencias de operador y supervisor para instalaciones nucleares o radiactivas, los diplomas de

jefe de Servicio de Protección Radiológicas y las acreditaciones para dirigir u operar las instalaciones de rayos X para diagnóstico médico.

- Estudia e informa cada proyecto de instalación nuclear o radiactiva.
- Inspecciona y controla el funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas e impone la corrección de posibles deficiencias.
- Proporciona apoyo técnico en caso de emergencia nuclear o radiactiva y participa en la elaboración de los planes de emergencia exteriores de las instalaciones.
- Vigila y controla las dosis de radiación recibidas tanto los trabajadores expuestos como la población en general.
- Realiza y promueve planes de investigación.
- Propone al gobierno las reglamentaciones necesarias en materia de seguridad nuclear y protección radiológica.
- Informa a la opinión pública sobre materias de su competencia.

En el caso de la protección radiológica de los pacientes son las autoridades sanitarias, el Ministerio de Sanidad y las consejerías de Sanidad de las comunidades autónomas, las encargadas de establecer la reglamentación aplicable, de velar por la correcta aplicación de los principios de protección radiológica y de controlar la implantación de los programas de control de calidad en las instalaciones.

Además, el CSN colabora con las autoridades sanitarias en todo lo relacionado con la protección radiológica de los pacientes.

Otras Publicaciones

- 1. Emergencia en centrales nucleares**
CSN, 2009 (28 págs.)
- 2. Utilización de la energía nuclear para producir energía eléctrica**
CSN, 2005 (20 págs.)
- 3. El funcionamiento de las centrales nucleares**
CSN, 2002 (24 págs.)
- 4. Desmantelamiento y clausura de centrales nucleares**
CSN, 2008 (36 págs.)
- 5. El CSN vigila las radiaciones: 10 preguntas y respuestas sobre la radiactividad**
CSN, 2006 (20 págs.)
- 6. Protección Radiológica**
CSN, 2008 (16 págs.)
- 7. Dosis de radiación**
CSN, 2002 (12 págs.)
- 8. Las radiaciones en la vida diaria**
CSN, 2006 (20 págs.)
- 9. El transporte de los materiales radiactivos**
CSN, 2009 (28 págs.)



Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
tel: 91 346 01 00
fax: 91 346 05 88
www.csn.es