

El uso de radiaciones en medicina / CSN





Referencia: SDB-04.10
Actualización 2025

© Consejo de Seguridad Nuclear, 2025

Edita y distribuye:
Servicio de Publicaciones
Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
tel.: 91 346 01 00
www.csn.es

Diseño de colección: Juan Vidaurre
Maquetación: Ángel Merlo

Depósito Legal: M- 23768-2013

Impreso en papel reciclado



ÍNDICE

Introducción	7
Breve historia del uso médico de las radiaciones ionizantes	12
Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes	16
Radiodiagnóstico	16
Radiografía convencional	18
Mamografía	19
Radiología dental	20
Escáner-TC	21
Fluoroscopia	22
Radiología intervencionista	22
Medicina Nuclear	24
Medicina Nuclear Diagnóstica	24
Medicina Nuclear Terapéutica: Terapia metabólica	29
Medicina Nuclear Terapéutica: Terapia molecular y teragnosis	30
Medicina nuclear en otras áreas: Ganglio centinela	31
Radioterapia	32
Radioterapia externa o Teleterapia	33
Braquiterapia	41
Seguridad en el uso médico de las radiaciones ionizantes	44
Especialistas en radiofísica hospitalaria	44
Servicios y Unidades Técnicas de Protección Radiológica	44
El Consejo de Seguridad Nuclear	45
Ministerio y Consejerías de Sanidad	45
Organismos internacionales relacionados con la protección radiológica	46

Introducción

El fenómeno de las radiaciones puede comprenderse mejor si recordamos qué somos y de qué estamos compuestos. Nuestro cuerpo y todo lo que nos rodea está compuesto por átomos, que a su vez están formados por partículas subatómicas, protones y neutrones, en su núcleo y electrones en la corteza o zona externa (figura 1). La mayoría de estos átomos se encuentran en un estado de **estabilidad**, por lo que permanecen así indefinidamente.

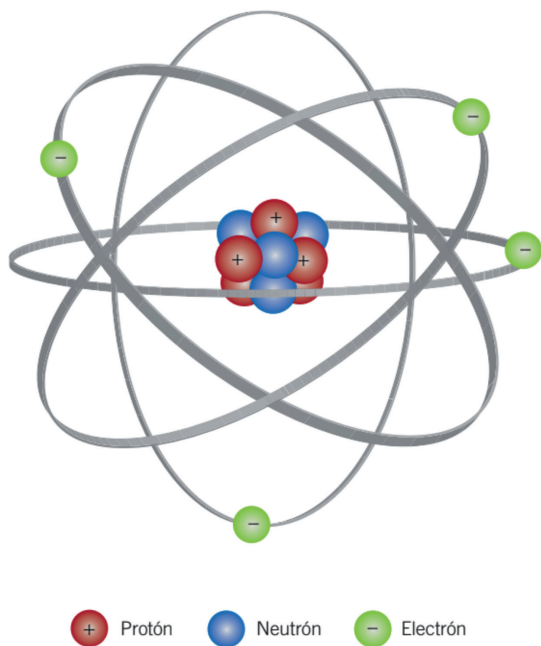


Figura 1. Representación esquemática de la estructura de un átomo.

¿Qué es la radiación? La radiación es energía que se transporta en forma de ondas y partículas, y está en todas partes. La humanidad está inmersa en campos de radiación que se originaron al principio de los tiempos en el Big Bang y aun a día de hoy siguen presentes. Esta radiación a nuestro alrededor proviene tanto del espacio exterior, denominada radiación cósmica, como de la radiación presente en la Tierra (figura 2). La radiación que tenemos en nuestro propio planeta puede ser debida tanto a los elementos existentes en ella -radiación de origen natural- como a la generada por los seres humanos, de origen artificial. Por lo tanto, dependiendo de nuestro entorno y de las actividades que realicemos, nos exponemos a más o menos cantidad de radiación.

Además, dentro de las radiaciones, conviene distinguir dos grandes tipos: **las ionizantes y las no ionizantes**. Esta serie divulgativa de documentos del Consejo de Seguridad Nuclear busca informar acerca de las radiaciones correspondientes al primer grupo, las ionizantes.

En ellas, se transporta una energía lo suficientemente grande como para, al interactuar con el medio, arrancar electrones a su paso, dejando estos átomos ionizados (figura 3). Esto puede cambiar la forma en que los átomos se combinan en las moléculas donde se integran, dando lugar, si se trata de un ser vivo, a cambios que pueden tener repercusión en su salud.

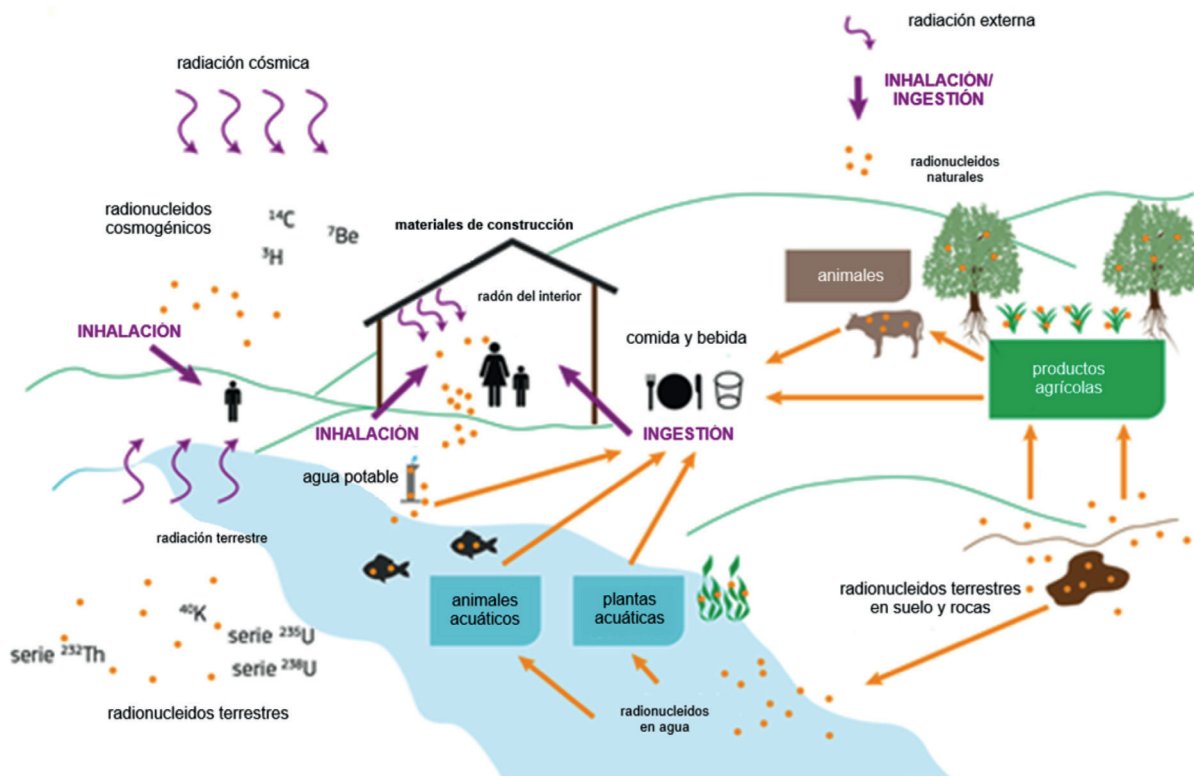


Figura 2. Principales fuentes de irradiación de origen natural [1], [2].

Ciertos elementos, dependiendo del número de protones y neutrones que contengan en su núcleo atómico, se comportan de manera inestable, esto es, espontáneamente sufren transformaciones de estos componentes del núcleo, llamadas desintegraciones, emitiendo energía y pudiendo quedar convertidos tras ello en otro elemento distinto del original. Este a su vez podría ser también inestable, hasta que al final de

una cadena de transformaciones se llega a un elemento que permanece estable.

Este fenómeno se conoce como **radiactividad** y puede ser de origen natural. Algunos de estos elementos inestables existen en la tierra desde su origen y aún continúan desintegrándose. Esta velocidad de transformación puede ser muy rápida o muy lenta y demorarse miles de años hasta

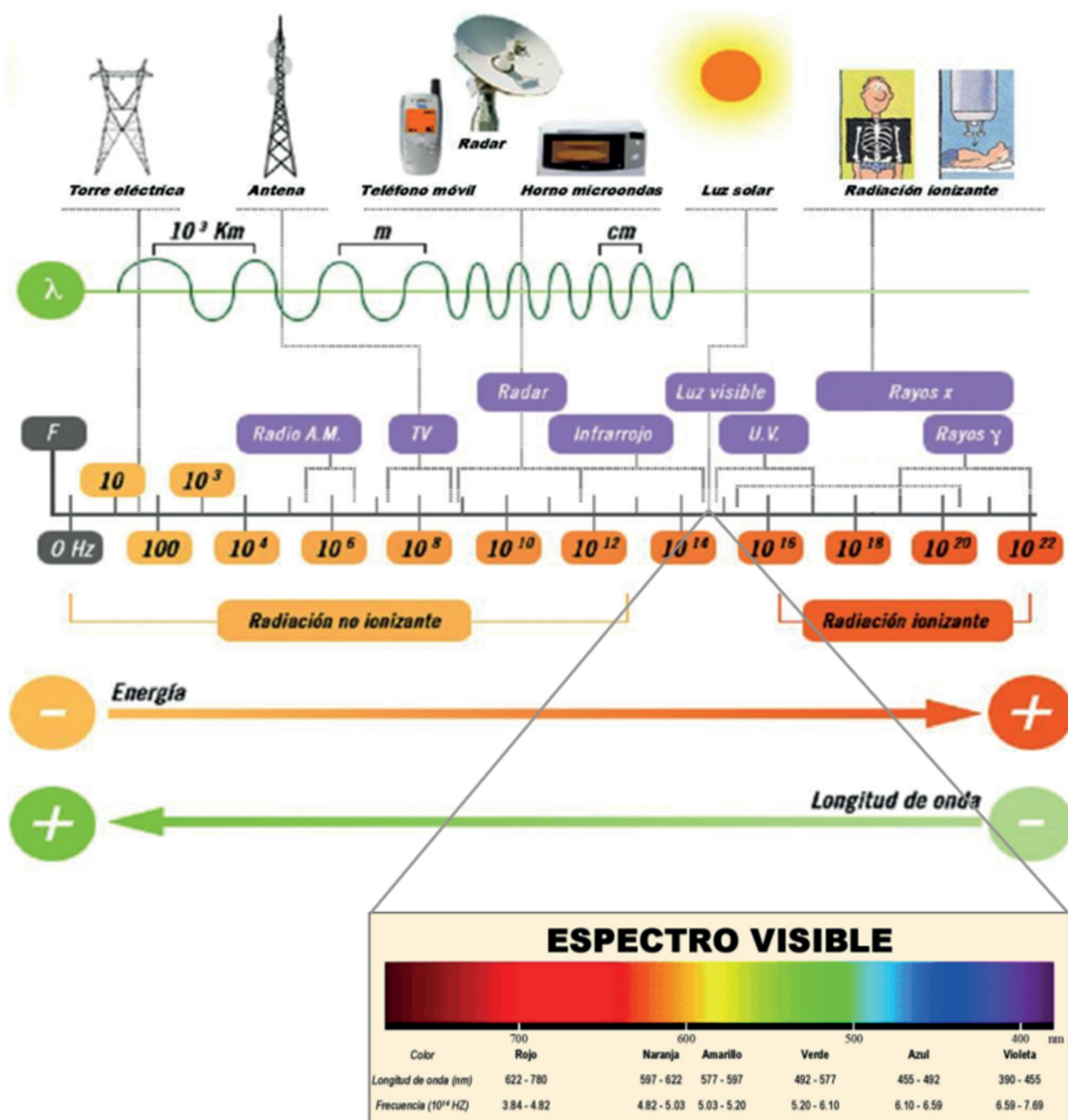


Figura 3. Espectro de radiaciones electromagnéticas, en el que se muestran ordenadas según su energía (o longitud de onda, o frecuencia), con la división ionizantes–no ionizantes [3].

que un porcentaje significativo de los átomos inicialmente presentes se hayan transformado. Otros elementos pueden ser fabricados artificialmente por el ser humano con la tecnología actual, y a partir de ese momento comportarse de ese modo inestable igualmente.

Al analizar el tipo de emisiones que se pueden producir en la desintegración de un átomo, se observan diferentes tipos de radiación ionizante, entre ellas (figura 4):

- Si se produce una emisión de partículas formadas por dos protones y dos neutrones, lo que constituye un núcleo de otro elemento llamado helio, hablamos de radiación **alfa**. Este tipo de partículas presenta elevada masa y carga por lo que su poder de ionización será elevado y a cambio, su alcance y penetración serán cortos.

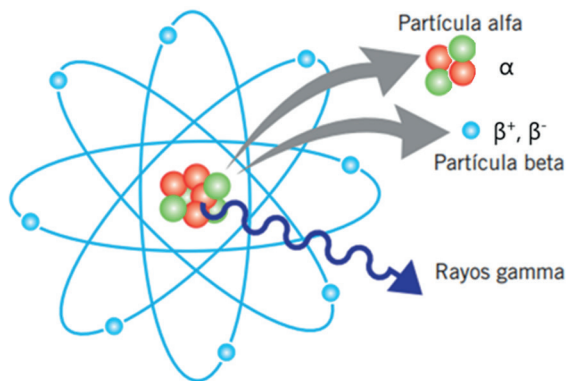


Figura 4. Representación esquemática de distintos tipos de desintegración radiactiva.

- Si la emisión que se produce es de electrones, o positrones si se trata de su antipartícula, la radiación emitida se denomina **beta**. Estas partículas tienen menor masa y carga que las anteriores, por lo que comparadas con la radiación alfa se reducirá su poder de ionización, pero aumentarán su alcance y penetración en la materia.
- Cuando se trate de emisión de energía propagándose en forma de onda electromagnética, esta será la radiación **gamma**, la cual también puede considerarse como la propagación de partículas sin masa en reposo ni carga, llamadas fotones. Su poder de ionización será menor que las anteriores pero su alcance y poder de penetración serán muy superiores. Dentro de este tipo de radiación se encuentran también los rayos X, con propiedades idénticas a la radiación gamma (figura 5).
- También pueden producirse en las desintegraciones emisión de neutrones, partículas sin carga, pero con una masa similar a la de los protones.

Precisamente, estas características de ionización, alcance y penetración son las que permiten dar diferentes usos en múltiples campos de aplicación a las radiaciones ionizantes.

En particular, las radiaciones ionizantes se emplean en medicina como consecuencia de dos de sus propiedades principales:

- En **diagnóstico**, por su capacidad de penetración a través de los tejidos, atenuándose o depositándose diferencialmente en los mismos en función de su densidad. Permite la formación de imágenes, la aportación de información del interior del cuerpo y del funcionamiento de órganos y sistemas.
- En **terapia**, por la posibilidad de depositar gran cantidad de energía en zonas elegidas del cuerpo para conseguir un efecto terapéutico sobre ellas.

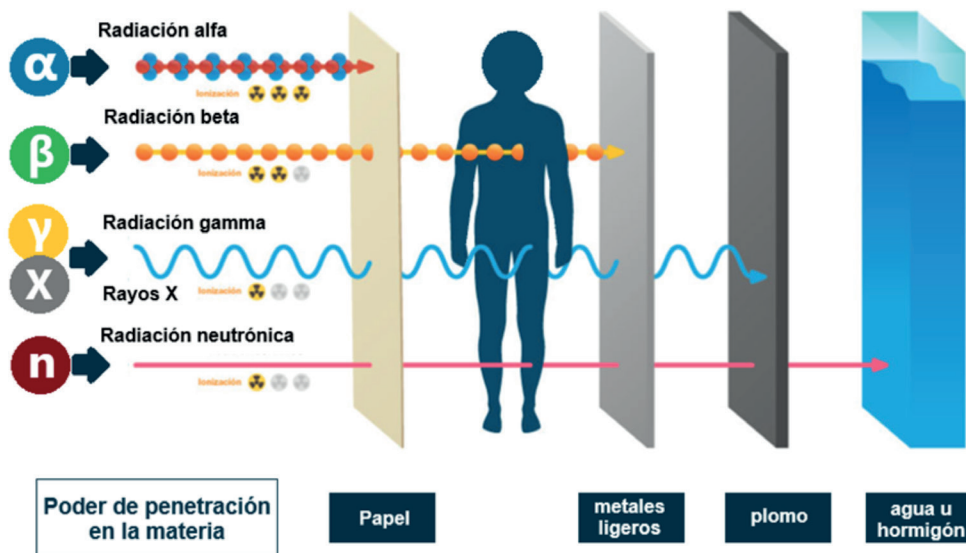


Figura 5. Ilustración de la capacidad de penetración típica de los distintos tipos de radiación en materiales típicos.

Breve historia del uso médico de las radiaciones ionizantes

En 1895, el físico alemán **Wilhelm Conrad Roentgen** descubrió el primer tipo de 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 (figura 6).



Figura 6. Primera radiografía, realizada en 1895.

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

Sin embargo, no todo fueron avances esperanzadores. En 1903, **Von Friebe** publicó varios casos que relacionaban la esterilidad y el cáncer con la 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.

En 1938, **Roberts y Evans** consiguieron estudiar la fisiología tiroidea haciendo uso de iodo radiactivo, y **Hamilton y Soley** establecieron curvas de captación de iodo-131 en tiroides, dando inicio al diagnóstico y tratamiento con radiaciones ionizantes en medicina nuclear. Aunque no fue hasta inicios de la década de los años 50 cuando

la medicina nuclear inició su desarrollo como especialidad, una vez que en 1946 se puso en marcha el primer reactor nuclear productor de radionucleidos, y que en 1951 **Red y Libby** desarrollaron el primer gammágrafo con el que se realizaron las primeras gammagrafías utilizando oro radiactivo.

Un momento clave en medicina nuclear fue la introducción del tecnecio-99m como radionucleido trazador para el diagnóstico en 1962 y el inicio del uso de generadores de este a partir de molibdeno-99 en 1968. En la actualidad, la gran mayoría de diagnósticos en esta especialidad se llevan a cabo utilizando este elemento radiactivo.

El hito tecnológico trascendental para la adquisición de imágenes de medicina nuclear, también en la década de los años 60, fue la puesta en marcha de la gammacámara planar (**gammacámara Anger**) conformada por un cristal detector y tubos fotomultiplicadores, más la electrónica asociada, en la que siguen basados los sistemas de imagen SPECT (tomografía de emisión de fótón único) actuales.

La nueva revolución en el radiodiagnóstico llegó en 1972, con la puesta en marcha de la **tomografía axial computarizada**, también conocida como TC, 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.

En la segunda mitad de los 80, se introdujeron las gammacámaras tomográficas SPECT que permiten la reconstrucción de imágenes en dos y tres dimensiones en medicina nuclear, con aplicaciones diagnósticas en neurología, cardiología y otras especialidades. Y ya en los 90 se comenzaron a utilizar los equipos PET (tomografía por emisión de positrones), en los que el radionucleido emite positrones, y que permiten toda una nueva gama de estudios a nivel metabólico y molecular que han supuesto una gran revolución en el ámbito diagnóstico.

A partir del 2000, los equipos híbridos SPECT-TC y PET-TC fueron un último paso en la línea de mejora continuada en el diagnóstico en medicina nuclear. En ellos, los estudios funcionales propios de estos equipos se pudieron complementar con el componente morfológico que aporta el TC.

En radioterapia, el desarrollo de los aceleradores lineales de electrones, el primero de los cuales se instaló en 1953, y su generalización entre los años 70 y 90, sustituyendo paulatinamente los antiguos equipos de cobaltoterapia, ha marcado un significativo hito tecnológico y de precisión en los tratamientos.

En las décadas recientes se están sucediendo rápidos avances en el empleo tanto de nuevos elementos radiactivos como de equipos generadores de radiación ionizante, tanto en terapia como en diagnóstico. Estos procedimientos han abierto un amplio campo de posibilidades de aplicación de las radiaciones ionizantes en

el ámbito sanitario que, encauzados adecuadamente gracias al conocimiento profundo de las leyes físico-químicas y limitados por las pautas que garantizan la seguridad radiológica de pacientes, profesionales y miembros de la población en general, se han convertido en grandes aliados de nuestra salud.

De la misma manera que en las aplicaciones médicas de la radiación, se puede trazar una historia de la **protección radiológica**, tan pronto como en 1896 se emiten (C. Fuchs) las primeras guías y recomendaciones para prevenir los efectos nocivos de los rayos X, que incluían reducir el tiempo y la distancia con respecto a los tubos generadores. En 1907 se presentan los primeros dispositivos fotográficos para determinar si las personas que los portan se han expuesto a radiaciones ionizantes. En 1913, la sociedad Röntgen German publicó unas primeras recomendaciones sobre blindaje y medidas de alejamiento para prevención de los riesgos.

Uno de los hitos principales fue en 1928 con la fundación de un organismo mundial independiente, la **Comisión Internacional de Protección Radiológica** (ICRP), cuyo fin es emitir recomendaciones sobre todos los aspectos relacionados con la protección frente a las radiaciones. Más adelante se convirtió en la base para construir una normativa y reglamentación por parte de organizaciones internacionales (como la **Organización Internacional de la Energía Atómica**, IAEA, creada en 1957 para promover usos pacíficos) y de autoridades regionales y nacionales. Tras la Segunda Guerra Mundial se introduce un

concepto fundamental para la protección radiológica, el principio ALARA, que propugna mantener las dosis tan bajas como sea razonablemente posible.

El resultado de toda esta evolución es que allá donde hoy día se produce una aplicación médica de las radiaciones ionizantes se cuenta con el asesoramiento de los expertos en protección radiológica. En España, la figura de los servicios o unidades técnicas de Protección Radiológica, en los que se integran especialistas en radiofísica hospitalaria, que reúnen las cualificaciones necesarias, el conocimiento práctico y una presencia cercana a estas aplicaciones, fortalecen la conexión de la instalación con el organismo regulador, garantizan la aplicación de las medidas de protección necesarias y un constante impulso de optimización de los procedimientos.

Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes se utilizan a diario en medicina, tanto en el diagnóstico como en el tratamiento de enfermedades. El **diagnóstico** se realiza a través de la obtención de imágenes estáticas o dinámicas de la anatomía humana o bien de información e imágenes funcionales del cuerpo. Tanto la medicina nuclear como el radiodiagnóstico utilizan las radiaciones ionizantes para ello.

Sin embargo, estas dos áreas del diagnóstico presentan una diferencia esencial. La medicina nuclear utiliza la distinta captación y distribución en órganos y tejidos de diversas sustancias, 'marcadas' con isótopos radiactivos, administradas al paciente, para generar imagen o información metabólica mediante la detección de la radiación que se emite desde el interior del cuerpo humano. El radiodiagnóstico, por otro lado, comprende las técnicas de imagen cuya información es fundamentalmente morfológica y anatómica, y se basa en el registro del contraste de densidades de los tejidos usando equipos emisores de rayos X. También en algunas intervenciones quirúrgicas y en otras técnicas no invasivas las imágenes de rayos X sirven de ayuda para realizar diferentes procedimientos médicos.

En **terapia**, las radiaciones se utilizan para el tratamiento de algunas enfermedades con el objetivo de curarlas completamente o paliar los efectos adversos que causan en el organismo (distinguiendo como campos fundamentales la radioterapia con generadores y fuentes

encapsuladas y la terapia con radioisótopos o fuentes abiertas).

Radiodiagnóstico

El **Radiodiagnóstico** o **Diagnóstico por Imagen** es la especialidad médica que tiene como fin el diagnóstico de las enfermedades, utilizando como soporte técnico fundamental las imágenes y datos funcionales obtenidos por medio de radiaciones ionizantes (rayos X) o no ionizantes (resonancia magnética) y otras fuentes de energía (ecografía).

Las radiaciones ionizantes utilizadas en este ámbito de la medicina son rayos X, producidos de forma artificial aplicando una diferencia de potencial determinada en un tubo de vacío, dentro del cual un filamento incandescente emite electrones, que son acelerados y se hacen chocar con un material, generando los rayos X (figura 7.a). Cuanto mayor es la diferencia de potencial aplicada (puede variar desde 25 kV para una mamografía hasta un máximo de 150 kV), mayor es la energía de los rayos X y mayor es su penetración en la materia.

Las imágenes radiográficas se obtienen mediante la interposición de la parte del cuerpo que se va a visualizar, entre la fuente de radiación de rayos X -que atraviesa selectivamente los tejidos dependiendo de su densidad- y un sistema de detección de radiación que actualmente

suele ser un detector digital, si bien antiguamente eran películas radiográficas o fósforos fotoestimulables que necesitaban un procesamiento de revelado o lectura posterior (figura 7.b). La diferente atenuación que sufren los rayos X por las distintas densidades del cuerpo humano hace que se registre una imagen en la que las partes más densas, como los huesos, aparezcan más claras dentro de una escala de grises, mientras las partes menos densas, como por ejemplo un pulmón, dejan pasar más radiación y aparecen más oscuras.

A la fecha de publicación de este documento, se realizan en torno a 50 millones de pruebas de imagen al año en España para detectar o realizar seguimiento a muchas patologías, lo que las convierte en la principal fuente de radiación artificial que recibe la población [4].

La cantidad de radiación que se recibe como paciente por una única prueba de radiodiagnóstico oscila entre unas centésimas de los valores de la radiación natural acumulada en un año (en una prueba convencional) y unas tres veces esos valores anuales (en una prueba de TC). Por tanto, aunque una prueba aislada no suele suponer un incremento preocupante del riesgo de producción de efectos debidos a la radiación, deben ser evitadas todas las pruebas que no estén justificadas por el beneficio neto que aporten considerado este riesgo, ya que la proliferación de estudios diagnósticos con radiaciones sí puede tener un impacto significativo en la incidencia de efectos, considerando toda la población en su conjunto.

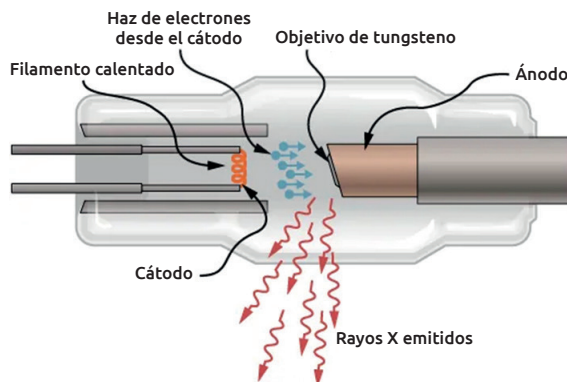


Figura 7.a. Esquema básico del funcionamiento de un tubo de rayos X.



Figura 7.b. Registro de la imagen producida por la atenuación diferencial de los rayos X al atravesar el cuerpo.

Los nuevos avances tecnológicos, incluyendo no solo detectores cada vez más eficientes y el control automático de la exposición, sino también los modernos algoritmos de reconstrucción de imágenes, permiten obtenerlas cada vez con menores dosis de radiación, sin pérdida de calidad diagnóstica.

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**. Este tratamiento digital de las imágenes médicas se utiliza actualmente en casi todas las técnicas.

Una de las ventajas de la imagen digital es que permite procesados o ajustes posteriores según las necesidades clínicas. Es decir, si se obtiene una imagen demasiado clara o demasiado ennegrecida por subexposición o sobreexposición respectivamente, se puede conseguir una mejora de la calidad o apariencia de la imagen con el adecuado tratamiento digital. Además, existen multitud de herramientas informáticas que permiten delimitar y medir distancias, áreas o volúmenes en las imágenes radiológicas e incluso reconstruir imágenes en tres dimensiones o utilizar inteligencia artificial que ayuda al diagnóstico de enfermedades (identificando patrones y anomalías que podrían escapar a la detección humana).

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 informáticos llamados PACS (del inglés *Picture Archiving and Communication Systems*) así como su integración con el resto de información clínica de los pacientes.

Existen diferentes equipos de rayos X, que empleando el mismo funcionamiento básico, mediante diseños adaptados, permiten obtener distintas imágenes del cuerpo humano en función del tipo de examen radiológico necesario: radiografía simple o convencional, mamografía, exploraciones dentales, tomografía...

Radiografía convencional

Son las pruebas más sencillas de diagnóstico obtenidas en equipos convencionales formados por un tubo enfrentado a un detector plano, situado bien en una mesa para proyecciones de los pacientes tumbados, o bien en un dispositivo de pared para proyecciones con el paciente en pie. En ambas situaciones se obtienen imágenes proyectadas de las estructuras anatómicas superpuestas del interior del cuerpo.

Los equipos modernos disponen de sistemas de control automático de la exposición para asegurar que se emite la cantidad de radiación necesaria para obtener una adecuada calidad de imagen. Esto va a depender no solo de las estructuras que se quieran visualizar, sino de las características del individuo. Un ejemplo de ellas son las imágenes de tórax que suelen usarse para descartar neumonías entre otras

enfermedades o imágenes traumatológicas para visualizar fracturas de los huesos (figuras 8.a y 8.b).



Figura 8.a. Ajuste previo a la realización de una radiografía de tórax en un equipo especialmente dedicado.

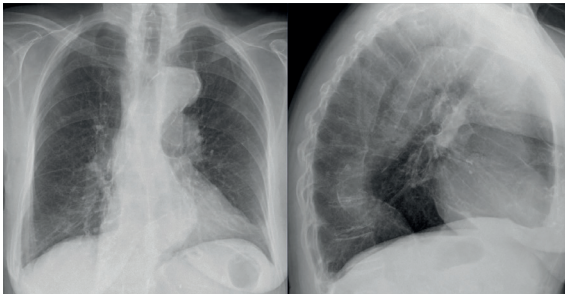


Figura 8.b. Imágenes de proyecciones postero-anterior y lateral de tórax.

Otro ejemplo de estas aplicaciones convencionales de la radiología son los equipos de rayos X portátiles o rodantes.

Mamografía

La mamografía es una imagen de la mama obtenida con rayos X de energías adecuadas para poder distinguir los diferentes tejidos mamarios (figuras 9.a y 9.b). Los médicos usan las mamografías para buscar indicios de cáncer de mama en sus etapas iniciales, diagnosticar otras patologías o ayudar a la toma de muestras para biopsias. Basándose en estas imágenes, en el Sistema Nacional de Salud se ofertan programas de cribado poblacional de cáncer de mama para mujeres sanas mayores de 50 años con una prueba bienal, que han demostrado su efectividad en cuanto a la disminución de mortalidad en las mujeres a las que se destina [5].

Actualmente, los modernos equipos de mamografía incluyen técnicas de tomosíntesis en las que, realizando unas pocas proyecciones, es posible obtener imágenes reconstruidas en diferentes planos con objeto de evitar superposición de estructuras en la imagen y conseguir una mejor localización de las patologías.



Figura 9.a. Equipo dedicado a mamografía y posicionamiento de la paciente.

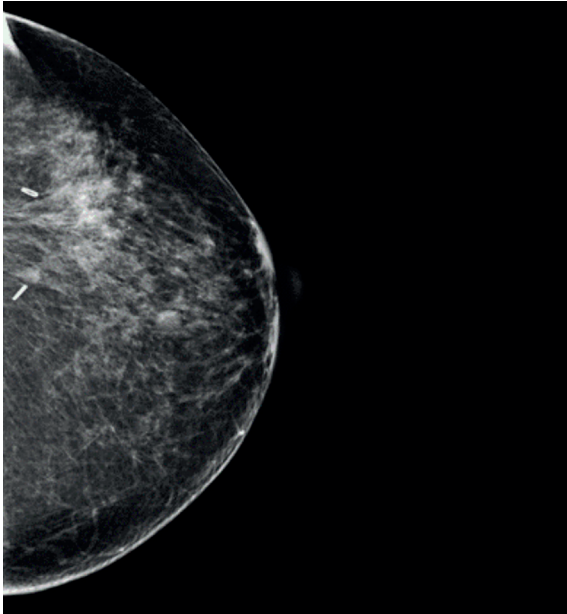


Figura 9.b. Mamografía de proyección lateral.

Radiología dental

Las radiografías dentales son un tipo de imagen de los dientes y las estructuras de nuestra boca que se obtienen a través del uso de rayos X y que pueden ser de dos clases: intraorales y extraorales.

Las radiografías intraorales se utilizan, en la mayoría de los casos, para detectar casos de caries interproximales o problemas en las raíces de los dientes. Se realizan normalmente en piezas dentales individuales, introduciendo un pequeño detector en el interior de la boca.

Sin embargo, en las radiografías dentales extraorales se puede mostrar la totalidad de la estructura facial y mandibular, para lo que son necesarios equipos más complejos que realizan proyecciones bien planas o envolventes. En función de esto, tendremos diferentes tipos de imagen: cefalometría o telerradiografía, que permite conocer el estado de los huesos del cráneo y el desarrollo intermaxilar; ortopantomografía o radiografía dental panorámica, que es la más común y útil para planificar, por ejemplo, una ortodoncia (figura 10.a y 10.b); y el TC dental (o *cone beam* dental), en la que con un haz ancho se toman numerosas proyecciones desde diferentes ángulos con las que se puede reconstruir una imagen en tres dimensiones de la cavidad oral muy detallada.

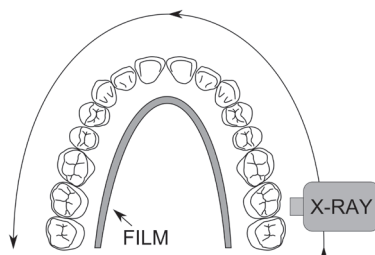


Figura 10.a. Disposición para obtener imágenes panorámicas.

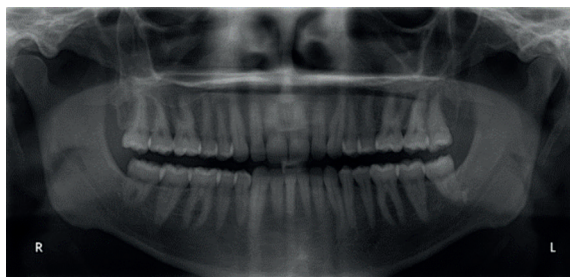


Figura 10.b. Ejemplo de radiografía dental panorámica.

Escáner-TC

La llamada **tomografía computarizada** (TC o escáner-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 es un procedimiento muy común.

En lugar de obtener una imagen de proyección como la radiografía convencional, la tomografía computarizada obtiene las imágenes al hacer rotar el tubo de rayos X alrededor del paciente

mientras emite un haz en forma de abanico, al tiempo que se mueve la mesa sobre la que se coloca el paciente. Un conjunto de detectores enfrentados al tubo de rayos X que se mueven solidarios con él, recogen la señal de rayos X atenuada. Mediante el tratamiento informático inmediatamente posterior de estas señales, se obtienen imágenes de cortes transversales del cuerpo humano, o en cualquier otra orientación, e incluso reconstrucciones en tres dimensiones de las estructuras anatómicas en estudio (figura 11).

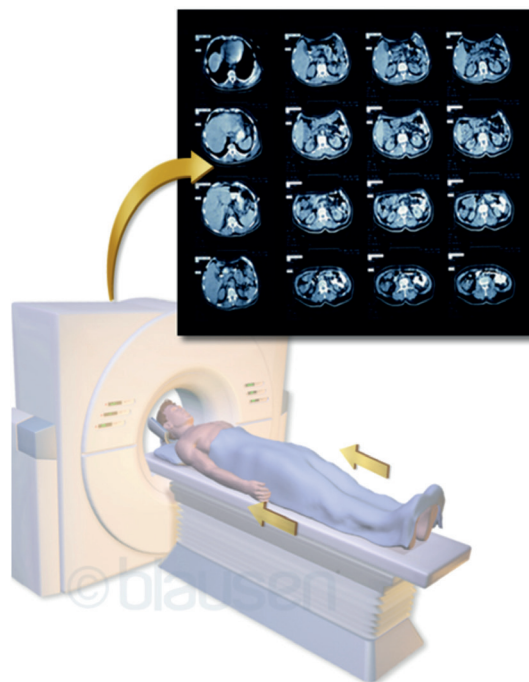


Figura 11. Disposición del paciente en el TC con el desplazamiento de la mesa hacia el interior del anillo donde se sitúan el tubo de rayos X y los detectores. Imágenes axiales obtenidas.

Pese a que supone una mayor absorción de radiación por parte del paciente que un estudio de radiología simple, es a menudo la exploración óptima para diagnosticar muchos problemas de salud, dado que evita la superposición de estructuras anatómicas en la imagen de cara a un diagnóstico más preciso.

Fluoroscopia

La fluoroscopia o escopia es una variante de la radiografía en la que se emite la radiación de menor intensidad de manera continua o pulsada, y la señal captada por los detectores se transforma en una imagen dinámica mostrada en tiempo real en un monitor.

Estos sistemas han demostrado una gran adaptabilidad para su aplicación en procedimientos guiados por la imagen, intervenciones quirúrgicas o visualización de estructuras como las vasculares mediante la administración de contrastes.

De esta forma, ayudan con las imágenes en intervenciones para reducir fracturas, colocar prótesis y sondas, guiar inyecciones para el tratamiento del dolor, eliminar cálculos renales o biliares mediante la aplicación de ondas de choque, entre otras.

Radiología intervencionista

Es una subespecialidad de la radiología que facilita la realización de procedimientos mínimamente

invasivos para diagnóstico o tratamiento de diversas patologías (principalmente en radiología vascular o hemodinámica). Se realiza en salas hospitalarias dotadas de sistemas complejos con alta potencia para obtener imágenes de fluoroscopia o series de radiografías en modo cine. Asimismo, estos especialistas disponen de sistemas de imágenes específicos con monitores para visualizar las imágenes captadas, TC u otros datos clínicos relevantes durante la intervención (figuras 12.a y 12.b).

Los expertos intervencionistas se basan en la imagen médica para diagnosticar a los pacientes y si es el caso, también aplican procedimientos terapéuticos sobre los 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 (figura 13).

La radiología intervencionista la practican diversos especialistas médicos (además de los propios radiólogos) expertos en estas técnicas (cardiólogos, urólogos, cirujanos vasculares) y en ella 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 se requiere anestesia general e implica una convalecencia menor en comparación con la cirugía tradicional.



Figura 12.a. Aspecto de una sala dedicada a intervencionismo, donde se aprecia el arco en forma de C que agrupa enfrentados tubo y detector de rayos X.



Figura 12.b. Detalle de sala para intervencionismo con los monitores de visualización.



Figura 13. Imagen durante un procedimiento intervencionista.

Medicina Nuclear

Medicina Nuclear Diagnóstica

En medicina nuclear diagnóstica se emplean radionucleidos que se administran al paciente y cuya emisión radiactiva puede ser detectada desde el exterior para obtener imágenes diagnósticas.

Estos radionucleidos se denominan también **trazadores o radiotrazadores** porque sirven para describir la funcionalidad de un órgano o un tumor, además de su tamaño, forma y apariencia. Los trazadores (el más habitual es el tecnecio-99m) se administran en cantidades que se miden mediante la magnitud llamada actividad, generalmente muy pequeñas, de manera que no tienen acción farmacoterapéutica y tienen escasos efectos secundarios, pues su fin es obtener la información diagnóstica. La vida media de estos radionucleidos es además muy corta (de varias horas, por ejemplo, el periodo de semidesintegración es de unas seis horas en el caso del tecnecio-99m), por lo que la irradiación a la que se somete al paciente es del mismo orden de magnitud a la que recibiría con una exploración radiográfica.

El proceso es simple:

1. Se administra el radiotrazador al paciente, habitualmente por vía intravenosa o inhalatoria, de forma que durante un corto periodo establecido que sigue a continuación (entre minutos y varias horas) se acumule en un tejido, órgano o sistema determinado.

2. A continuación, mediante un equipo (gammacámara, SPECT, PET) se detecta la señal que produce la radiación gamma y se convierte en imagen de la zona donde se ha fijado el trazador.

3. El trazador termina su recorrido siendo excretado del cuerpo del paciente, 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, traumatológicas, cardíacas y renales, entre otras muchas.

La gran aportación diagnóstica de la medicina nuclear es que, sus estudios, a diferencia de los obtenidos en radiodiagnóstico que son básicamente de tipo morfológico, contienen datos funcionales. Esto es, nos informan del funcionamiento de órganos y sistemas, gracias a la captación diferencial de los radiotrazadores.

Por ello, como veremos en apartados posteriores, ambas tecnologías, radiología y medicina nuclear, se combinarán para obtener un diagnóstico más completo, en los diseños de equipos híbridos como los PET-CT y SPECT-CT.

En lo que respecta a los aspectos materiales y estructurales, los radionucleidos se producen en reactores nucleares o ciclotrones, desde donde son enviados a las instalaciones de medicina nuclear. En ellas se dispone de varias

dependencias para llevar a cabo el procedimiento diagnóstico:

- Radiofarmacia: Laboratorio en el que se preparan las actividades de radiofármacos, conteniendo el trazador correspondiente, destinadas a cada paciente, comúnmente llamadas dosis o monodosis.
- Salas de inyección/administración.
- Salas de espera de pacientes inyectados, en las que el paciente espera el tiempo necesario entre administración y adquisición de imagen.
- Salas diagnósticas, en las que están ubicados los equipos de adquisición de imagen (gammacámaras, SPECT, SPECT-CT, PET, PET-CT), con las correspondientes áreas de control.
- Almacén de residuos radiactivos, para el almacenamiento y gestión de los materiales residuales con contenido radiactivo.

Equipos y aplicaciones

• Gammacámaras planares / SPECT

El desarrollo de la medicina nuclear diagnóstica a lo largo de prácticamente todo el siglo XX ha estado marcado por el uso de las gammacámaras planares (gammacámara Anger) como equipo diagnóstico y radionucleidos emisores gamma de baja energía (de forma primordial tecnecio-99m). Este tipo de gammacámara consta de un cristal detector y tubos fotomultiplicadores, junto a la electrónica asociada para formar la imagen a partir de la señal detectada en cada posición. A ellos se añade un colimador

para garantizar que la imagen proyectada es reflejo fiel de la distribución del trazador en los tejidos del paciente. Permite obtener imágenes en dos dimensiones (figura 14).

En esta misma tecnología se siguen basando los sistemas de **imagen SPECT** (Tomografía Computarizada por Emisión de Fotón Único) actuales, introducidos a partir de los años 80.

La diferencia respecto a la gammacámara planar es que en SPECT, el sistema de detector y colimador (en la actualidad es habitual que estén dotados de dos detectores), va girando alrededor del paciente, obteniendo sucesivas imágenes planares para finalmente permitir la obtención de una reconstrucción tridimensional (figura 15).

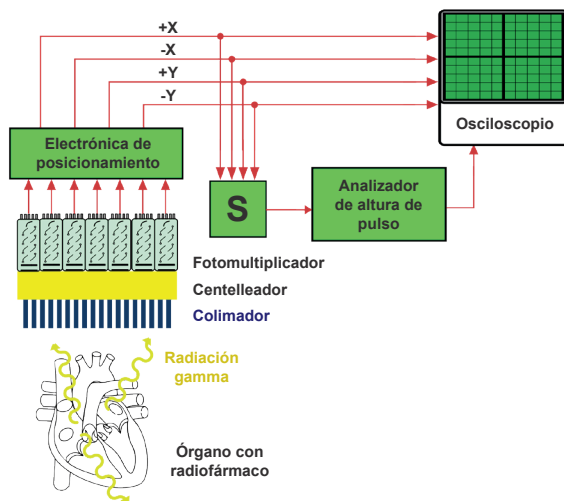


Figura 14. Componentes fundamentales de una gammacámara.



Figura 15. SPECT-CT.

La **SPECT cerebral** es de gran utilidad en el diagnóstico de enfermedades como el alzhéimer, otras demencias y la 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 (figura 16).

Siguiendo el mismo principio, la SPECT cardíaca ofrece información del flujo sanguíneo del miocardio y de su funcionamiento. En función de las alteraciones observadas, como por ejemplo zonas musculares muertas (infarto de miocardio) o que reciben poca sangre (isquemia coronaria), se puede decidir por ejemplo, si un paciente debe someterse a un cateterismo.

Otras exploraciones muy habituales en SPECT son de tipo óseo, pulmonares (de ventilación o perfusión), renales, etc.

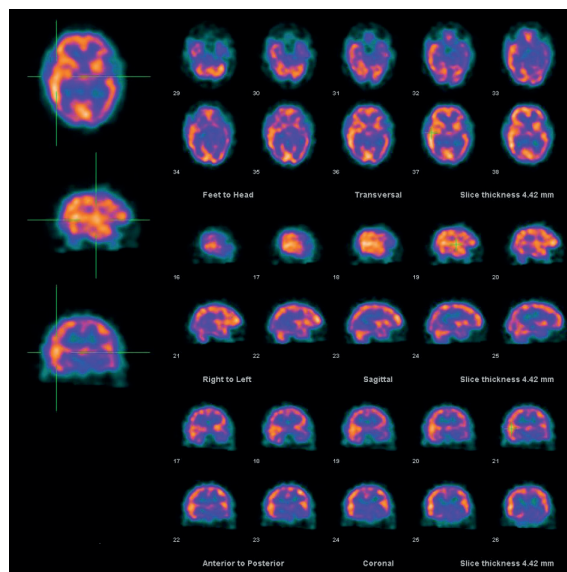


Figura 16. SPECT cerebral mostrando imágenes reconstruidas en cortes transversales, sagitales y coronales.

- PET

La **Tomografía por Emisión de Positrones** (PET, por sus siglas en inglés) es una técnica no invasiva que comenzó a utilizarse en los años 90 y 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 con 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 el diagnóstico con PET se administran radiofármacos marcados con isótopos emisores de positrones por vía intravenosa en lugar de emisores gamma, siendo el radionucleido más habitual el **flúor-18** combinado en forma de fluorodesoxiglucosa (FDG).

El flúor-18, producido en ciclotrones, presenta una vida muy corta (aproximadamente 110 minutos) y el radiofármaco concreto se recibe en la instalación de medicina nuclear, en cuya radiofarmacia se fraccionan las actividades específicas que se administrarán a cada paciente.

Tras la administración, el paciente permanece en sala de reposo durante un intervalo de tiempo de unos cuantos minutos (en función de la exploración), antes de su paso por la sala diagnóstica. Durante este tiempo, el trazador se distribuirá por la sangre y se acumulará en los órganos y tejidos de interés.

Finalmente, el paciente pasará a la sala diagnóstica donde se adquirirá la imagen mediante el PET. Cada positrón emitido por flúor-18 en el interior del paciente al interactuar mediante la reacción de aniquilación con un electrón del cuerpo, da lugar a la emisión de dos fotones de igual energía, emitidos al mismo tiempo, en igual dirección y sentido opuesto que, al salir del organismo, podrán ser detectados por el PET.

Con esta finalidad, el PET está constituido por una gran cantidad de pequeños detectores de estado sólido ubicados en forma de anillo en torno a la camilla sobre la que reposa el paciente, dotado de una electrónica de alta precisión de forma que solo considerará como evento cuantificable (emisión de positrón) aquel para el que reciba señal en detectores opuestos en tiempos iguales (sincronización). De esta forma, en PET no será preciso el uso de colimadores (figuras 17 y 18).

La señal eléctrica de los detectores se amplifica y se digitaliza y el ordenador reconstruye las imágenes en cortes tomográficos en diferentes orientaciones, y eventualmente imágenes tridimensionales.

En los últimos años ha crecido de forma exponencial el uso del PET. Uno de los ejemplos más conocidos de su aplicación es el que permite obtener imágenes del cerebro y de otros órganos en plena actividad y en tres dimensiones. Los pacientes reciben cierta cantidad de glucosa marcada con un emisor de positrones, que es absorbida por el cerebro en función de la actividad metabólica y las necesidades de cada zona.

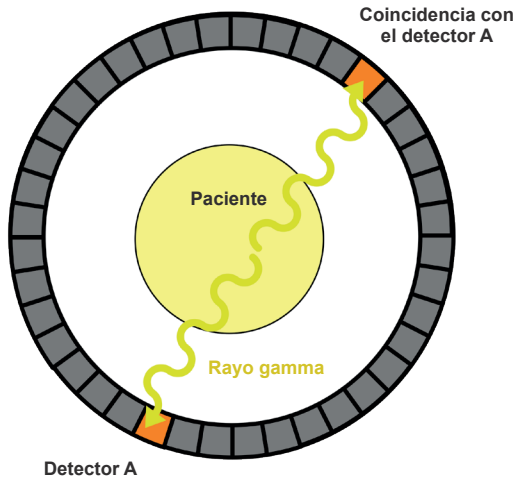


Figura 17. Registro en detectores opuestos y en coincidencia de los dos fotones de aniquilación.

En la actualidad, la PET en oncología se ha convertido en una técnica diagnóstica prácticamente insustituible. 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. Y todo ello incluso en estadios en los que aún no se dispone de capacidad para observar morfológicamente el tumor, considerando que estamos ante un procedimiento diagnóstico no invasivo.

- Equipos híbridos (SPECT-CT, PET-CT)

Ni la emisión gamma detectada en SPECT, ni la emisión de los fotones de aniquilación recibida en PET tiene en cuenta que los fotones se

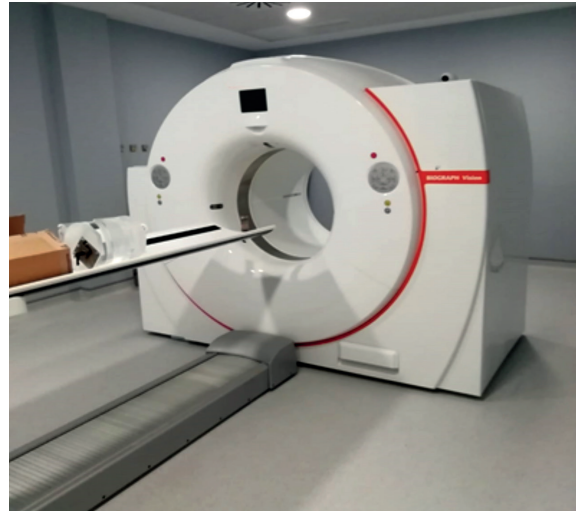


Figura 18. Equipo PET-CT.

producen en el interior del organismo del paciente. Son atenuados por los diferentes tejidos y densidades del mismo que se encuentran en su camino, antes de salir al exterior.

Es necesaria la corrección de atenuación para mejorar la calidad de imagen, con objeto de que la reconstrucción tridimensional obtenida sea reflejo más fiel de la distribución real del trazador dentro del organismo.

Este objetivo se ha conseguido con el desarrollo de los equipos híbridos implementados a partir de finales de los años 90, en los que se instalan solidariamente SPECT y CT, o PET y CT, y donde se utilizan los datos de atenuación obtenidos del registro del TC para realizar la corrección,

además de obtener imágenes funcionales y anatómicas fusionadas sin mover al paciente de su posición, salvo el desplazamiento longitudinal de la camilla (figura 19).

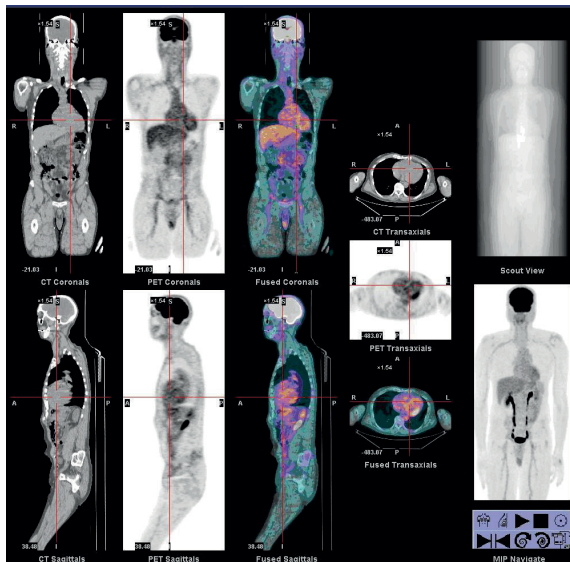


Figura 19. Imágenes de CT y PET de cuerpo entero, reconstruidas en cortes sagitales, e imágenes PET-CT fusionadas.

Medicina Nuclear Terapéutica: Terapia metabólica

Se conocen como terapia metabólica aquellos tratamientos que emplean **radionucleidos** en forma no encapsulada (abierta) y en los que se aprovecha la afinidad o captación selectiva del radionucleido por algún órgano o tejido, para

conseguir que este sea irradiado al nivel de dosis deseado, con una irradiación mucho menor en el resto de tejidos. Son administrados al paciente habitualmente mediante ingestión o inyección, o colocados de forma selectiva en los órganos o tejidos a tratar.

Históricamente, el caso más representativo ha sido el radionucleido yodo-131 utilizado para los tratamientos de cáncer de tiroides e hipertiroidismo, administrado por vía oral usualmente, del que se ha aprovechado su afinidad por la glándula tiroides. Una vez administrado, el yodo-131 se acumula de forma mayoritaria en la glándula, depositando de forma intensa la radiación en la misma y destruyendo el tejido tumoral (o reduciendo la actividad hormonal en el caso del hipertiroidismo).

Dadas las elevadas actividades de radionucleidos utilizadas en los tratamientos, y en función del tipo de emisión y material radiactivo, en ocasiones es preciso mantener ingresado al paciente durante algún tiempo tras la administración del radionucleido, en dependencias especialmente diseñadas (blindadas) y recoger y retener hasta cierto nivel de desintegración radiactiva sus excretas antes de ser vertidas a la red de alcantarillado.

Otros radionucleidos que se están utilizando en la actualidad con fines terapéuticos son:

- Radio-223 para el tratamiento de metástasis óseas tras cáncer de próstata.
- Ytrio-90 para el tratamiento de algunos cánceres como linfoma no *Hodgkin*.

Un caso especial son los tratamientos de tumores hepáticos no operables **mediante microesferas de ytrio-90**. Se trata de la administración directa al tumor de esferas de tamaño microscópico que contienen el isótopo radiactivo, que aportan elevadas dosis al tumor y una dosis muy pequeña a su entorno (dado que el ytrio-90 es un emisor beta puro, no emite radiación gamma). De esta forma se consigue eliminar el tumor respetando al máximo el tejido sano (hígado). En la administración participan de forma directa especialistas en radiología que realizan procedimientos intervencionistas, que son los encargados de la colocación de los catéteres (haciendo uso de un equipo de radiodiagnóstico) a través de los cuales se harán llegar las microesferas hasta el hígado.

Tras la administración de las microesferas, una exploración PET-CT (pues tiene una pequeña emisión de positrones que lo permite) servirá para comprobar la adecuada distribución de las mismas de acuerdo con la planificación prevista y para que el especialista en Radiofísica Hospitalaria pueda realizar los cálculos dosimétricos preceptivos del tratamiento.

Medicina Nuclear Terapéutica: Terapia molecular y teragnosis

En los últimos años se han desarrollado procedimientos terapéuticos de aplicación en oncología, por ejemplo, en tumores como los neuroendocrinos, en los que se aprovecha la afinidad de determinadas moléculas, llamadas radioligandos, para unirse selectivamente a ciertas moléculas

diana que están presentes específicamente en las células tumorales en mayor medida que en el resto de las células. La molécula diana es en este ejemplo una proteína de membrana.

De esta manera, preparando un radiofármaco en el que se une a esta molécula ligando un isótopo, que por sus propiedades se elige como el más adecuado para el tratamiento (generalmente emisores beta, en el caso de los tumores neuroendocrinos citados como ejemplo es el lutecio-177), al administrarlo al paciente se consigue que finalmente el isótopo deposite la radiación de forma muy selectiva en las moléculas diana del tumor, es decir, se alcanza un tratamiento muy dirigido, de manera que se evitan daños por efectos secundarios al reducir la irradiación de los tejidos sanos circundantes (figura 20).

Esta capacidad para irradiar tan específicamente aquellos tejidos tumorales donde está presente la molécula diana, preservando mejor el tejido sano, hace que estas técnicas se conozcan por el nombre de terapia molecular. El objetivo actual es encontrar moléculas diana en otros tipos de cáncer, el más próximo de los cuales puede ser el de próstata, para ampliar la aplicabilidad de estas técnicas.

De la misma manera, puede aprovecharse la misma molécula radioligando, pero unida en este caso a un isótopo cuyas propiedades lo hagan más adecuado para el diagnóstico (por ejemplo el galio-68), de forma que mediante una examen de PET obtengamos una imagen de captación, que pronostica de manera muy precisa cómo se comportará esa misma molécula ligando cuando

se administre unida al isótopo elegido para la terapia. Una vez administrado el radiofármaco para terapia es nuevamente posible obtener una imagen de captación a partir de él.

Esta correlación tan específica que se puede obtener entre el diagnóstico (que además identifica de forma mucho más precisa las zonas afectadas por el tumor) y la terapia, a través de una misma molécula, hace que conozcamos estos procedimientos con la palabra '**teragnosis**' que combina ambos conceptos de terapia y diagnóstico.

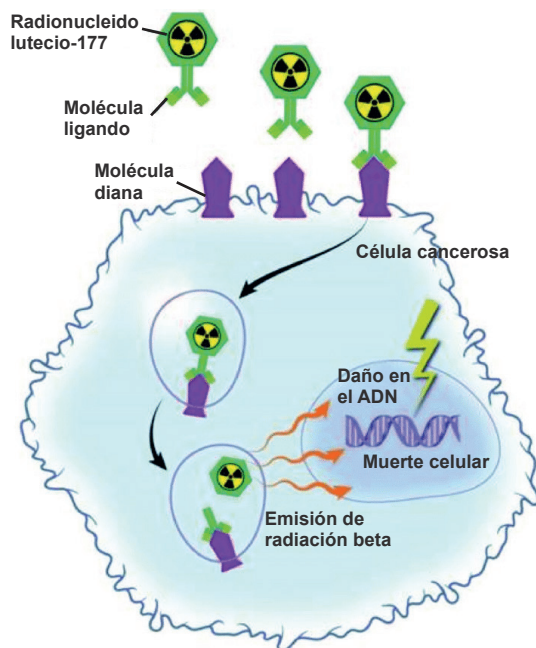


Figura 20. Esquema del fundamento de la terapia molecular en medicina nuclear.

El tratamiento se reparte habitualmente en varias sesiones y no exige generalmente muchas horas de ingreso hospitalario, aunque sí son precisas medidas de protección radiológica específicas, como la recogida y retención durante cierto tiempo de las excretas, en las cuales se elimina parte del radioisótopo.

Medicina nuclear en otras áreas: Ganglio centinela

El ganglio centinela es el primer ganglio que encuentran las células tumorales al diseminarse a través del sistema linfático del paciente. Si se puede extirpar y examinar en laboratorio, su afectación indicaría posible extensión de la enfermedad al resto del organismo y permitiría decidir el tratamiento más adecuado.

En el procedimiento de diagnóstico y estadiaje de cáncer de mama, vulva, cérvix y melanoma se ha estandarizado la utilización de la técnica de ganglio centinela consistente en la administración local de una pequeña cantidad de material radiactivo (tecnecio-99m) en el servicio de medicina nuclear y posterior uso de una sonda quirúrgica (figura 21) en el quirófano para localizar el ganglio centinela y facilitar su extirpación.



Figura 21. Sonda para la localización del ganglio centinela.

Radioterapia

La radioterapia consiste en la aplicación de altas dosis de radiación ionizante con el objeto de depositar, de manera generalmente localizada, la energía necesaria en un tejido bien para detener la progresión de las células tumorales (en el contexto de los tratamientos oncológicos, que son la mayoría, ya sea con intención curativa o

paliativa), bien para producir alguna acción terapéutica en malformaciones arteriovenosas o algunas patologías benignas.

Este objetivo terapéutico implica que el paciente reciba una dosis que es decenas de miles de veces mayor que las dosis típicas de un procedimiento diagnóstico, ya sea en el ámbito del radiodiagnóstico o la medicina nuclear.

Se inicia tras la decisión de incluir la radioterapia como parte del plan de tratamiento (pues puede estar combinada con otras opciones terapéuticas como cirugía, quimioterapia, inmunoterapia, etc.), con la adquisición de datos anatómicos del paciente por medio de un TC y eventualmente además un PET o resonancia magnética.

Estos datos anatómicos posteriormente se introducirán en el llamado planificador, un ordenador que cuenta con un *software* especializado y verificado, con el cual el especialista en radiofísica hospitalaria diseña y optimiza el tratamiento más adecuado, con la prescripción y aprobación final del especialista en oncología radioterápica, que habrá delimitado antes de manera precisa los volúmenes que deben ser irradiados y los órganos de riesgo a preservar y habrá definido la dosis y el fraccionamiento con que debe administrarse.

Finalmente, previamente a la aplicación de la primera sesión de tratamiento, se realizan comprobaciones exhaustivas del plan previamente diseñado y un cuidadoso procedimiento para asegurar que se llevará a cabo sobre el paciente

el esquema de irradiación tal como ha sido definido. Según sea la forma de impartir esta radiación se puede distinguir entre **radioterapia externa** (o teleterapia) y **braquiterapia**.

Cualquiera de estas dos modalidades de tratamiento, debido a las altas dosis de radiación que se manejan, deben llevarse a cabo en el interior de recintos con requerimientos de blindajes estructurales muy superiores a los de radiodiagnóstico y medicina nuclear, para poder reducir las dosis en las zonas colindantes del exterior a esa sala a unos niveles seguros para trabajadores y público. Además, los equipos y las instalaciones están dotados de numerosas medidas de seguridad para evitar irradiaciones no deseadas o accidentales.

Radioterapia externa o Teleterapia

La radioterapia externa es la aplicación de haces de radiación de alta energía, generados por un dispositivo externo al paciente, y focalizados desde distintos ángulos sobre la zona de interés o volumen blanco.

Dentro de este apartado se enunciarán distintas técnicas de tratamiento, determinadas por el tipo de equipo que genera y emite la radiación hacia el paciente; y posteriormente, se describirán tecnologías que se están implementando actualmente para profundizar en la optimización de los tratamientos, de algún modo transversales a varias de las técnicas y equipos antes descritas.

Técnicas y equipos de tratamiento:

- Radioterapia externa conformada con haces de fotones y electrones

Es, con diferencia, la técnica más empleada entre las que se citarán. Hace uso de un acelerador lineal de electrones que genera haces de fotones o electrones suficientemente uniformes y extensos dirigidos hacia el paciente. La estructura por donde emerge la radiación, llamada brazo, acaba en un cabezal donde se configura la forma del campo de radiación y puede girar alrededor del paciente, que permanece tumbado en una mesa de tratamiento. En algunos equipos esta mesa también puede rotar, de manera que se puede elegir adecuadamente la zona de incidencia de la radiación (figuras 22.a y 22.b).



Figura 22.a. Equipo de teleterapia externa.



Figura 22.b. Equipo de teleterapia externa.

La conformación precisa de los campos se consigue generalmente mediante un colimador de múltiples láminas de pequeño tamaño, colocadas interceptando el haz de radiación a la salida del cabezal (figura 23).

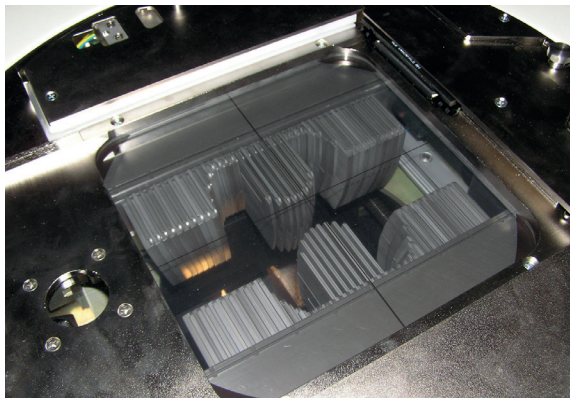


Figura 23. Colimador multiláminas a la salida del cabezal, para definir con precisión la forma del campo de radiación necesario.

Hoy en día todos los tratamientos de radioterapia externa se analizan y aplican sobre la base de un conocimiento tridimensional, tanto de la anatomía del paciente mediante imágenes adecuadas, como de las distribuciones de dosis que se pueden superponer a ella.

• Tomoterapia

Es una forma especial de impartir la radiación sobre el paciente, en la que el cabezal del acelerador, dotado de un colimador de múltiples láminas con posiciones binarias (abierta-cerrada), emite un haz de radiación con la conformación deseada (figura 24). Este haz gira alrededor del paciente describiendo una hélice a medida que se hace avanzar la mesa (a semejanza del proceso de obtención de un CT diagnóstico) de manera que se distribuye la radiación a la entrada del paciente desde muchas direcciones a la vez y se concentra en el lugar de interés.



Figura 24. Unidad de tratamiento de tomoterapia.

- Radioterapia intraoperatoria

La radioterapia intraoperatoria, generalmente abreviada por sus siglas como RIO, consiste en la administración de una dosis alta de radiación mediante haces de electrones (figura 25) o haces de rayos X (estos últimos menos energéticos y penetrantes que en la teleterapia convencional), en una sesión única, en una zona anatómica delimitada y preparada durante un procedimiento quirúrgico.

Esta técnica consigue superar algunas limitaciones, por ejemplo, para administrar dosis altas en ciertas regiones como la pelvis, por la presencia de órganos y tejidos de tolerancia limitada. La RIO utiliza aplicadores especialmente indicados en contacto con la zona anatómica que irradiar

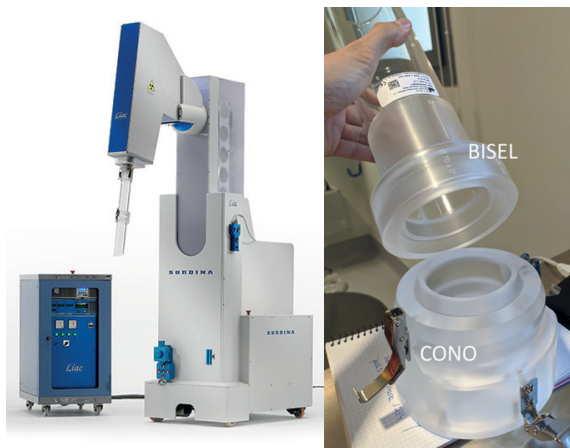


Figura 25. Acelerador lineal de electrones portátil, para realizar irradiaciones en el propio quirófano.

(figura 26), permitiendo separar o proteger estos órganos y tejidos. Las dosis en sesión única administradas con RIO tienen una equivalencia biológica superior a las mismas administradas con radioterapia externa y fraccionamiento convencional, y a veces se añaden como tratamiento de sobreimpresión a ellas.



Figura 26. Aplicador para tratamiento de radioterapia intraoperatoria con electrones.

- Radiocirugía: *gamma-knife* y *cyber-knife*



Figura 27. Colocación del marco estereotáxico en cráneo.



Figura 28. Cyber-knife.

Se emplea el nombre de radiocirugía para designar tratamientos, generalmente realizados en una única sesión, que emplean campos muy pequeños conformados por colimadores especiales, y con sistemas de posicionamiento que permiten situar de manera muy precisa los volúmenes que deben irradiarse, con respecto a estructuras anatómicas del paciente.

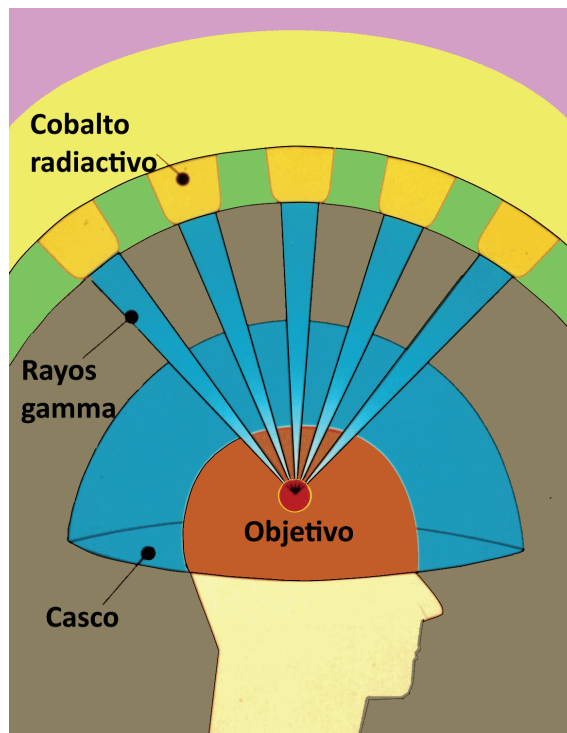


Figura 29.a. Fuentes radiactivas distribuidas con simetría semiesférica alrededor del cráneo.

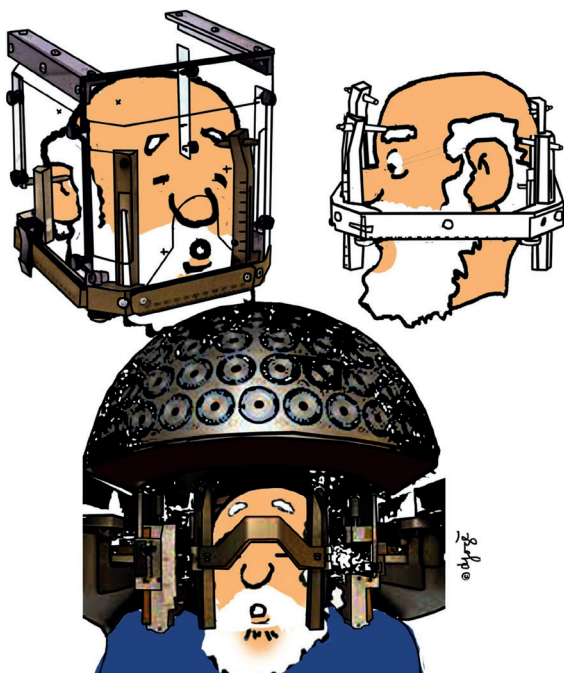


Figura 29.b. Marco estereotáxico unido al dispositivo de tratamiento gamma-knife.

La radiocirugía se desarrolló ampliamente sobre **localizaciones craneales**, donde se puede alcanzar una elevada precisión y reproducibilidad en el posicionamiento, mediante guías (conocidas también como marcos estereotáxicos, figura 27) que se fijan a la vez a los huesos del cráneo y a la unidad de tratamiento.

La unidad de tratamiento con la que se realiza la radiocirugía puede ser un acelerador lineal más o menos adaptado en su configuración,

en especial sus colimadores, un acelerador con un brazo robotizado (lo que se conoce como *cyber-knife*, figura 28) o incluso un conjunto de fuentes radiactivas distribuidas alrededor de un punto central sobre el que se hacen confluír sus haces colimados a un diámetro pequeño, y a las que puede quedar expuestas el tejido por irradiar el tiempo deseado, estando debidamente protegidas por un blindaje el resto del tiempo. Este último equipo se conoce con el término inglés *gamma-knife* (figuras 29.a y 29.b).

- Radioterapia estereotáctica corporal

En esta modalidad, basada también en el cumplimiento de una alta precisión en el posicionamiento del paciente con respecto a los campos de radiación previstos y la estabilidad de esta posición a lo largo de la irradiación, se persigue elevar las dosis administradas en cada sesión reduciendo su número total frente a los tratamientos más convencionales, lo que se conoce como **tratamientos hipofraccionados**.

La exigencia que marca el requerimiento anterior tiene que ser satisfecha especialmente por los movimientos del cabezal de la unidad de tratamiento y también de la mesa. Ello se debe a que frecuentemente los haces de radiación que inciden sobre el volumen irradiado son no coplares (es decir, no están contenidos en el mismo plano, [figura 30]), y esto se consigue añadiendo los adecuados giros de la mesa de tratamiento alrededor de un eje que pasa por el isocentro del acelerador.

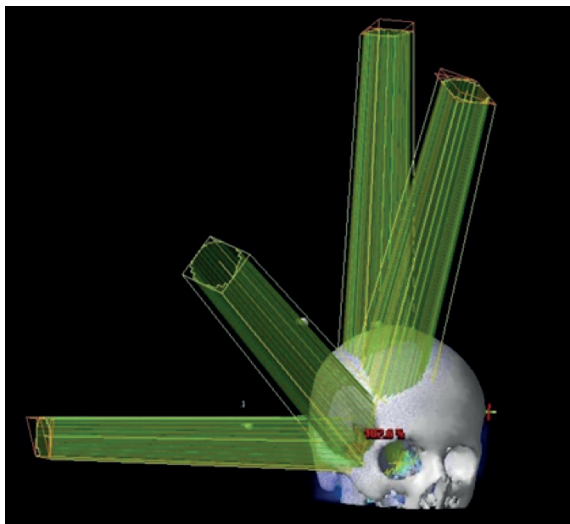


Figura 30. Ejemplo de campos no coplares, en este caso en una localización craneal.

Con frecuencia engloban localizaciones extra-craneales y le dan a este tipo de tratamientos el nombre completo de **radioterapia estereotáctica corporal**, (SBRT, por sus siglas en inglés).

- Radioterapia externa con haces de protones

La posibilidad de realizar tratamientos de radioterapia con haces de protones es un anhelo derivado de su especial característica de depositar la energía de manera muy localizada en los tejidos. Por ser partículas cargadas con una masa significativa, depositan gran parte de su energía en el llamado 'pico Bragg' a una determinada profundidad de tejido, solo una pequeña parte

de energía en el recorrido antes de llegar a este punto, y apenas nada más allá de él, concentrando así la dosis en el lugar deseado, e irradiando menos el tejido circundante (figura 31).

Esto es de especial interés en caso de tumores situados cerca de órganos o estructuras muy sensibles. Igualmente posibilita alcanzar dosis más altas y mejor control tumoral, y reducir posibles efectos adversos como el riesgo de desarrollar segundos tumores, lo cual es de especial importancia en **pacientes pediátricos**.

Las energías a las cuales se aceleran los protones generan reacciones nucleares y activación de núcleos atómicos, produciendo protones secundarios, otros iones y neutrones. Estos últimos son los que en última instancia demandarán un mayor

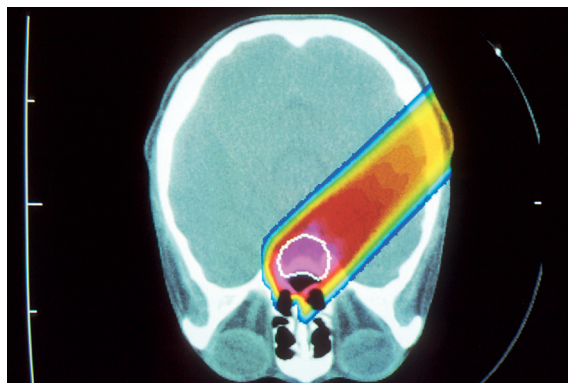


Figura 31. Protonterapia. Las isodosis, que representan en colores los distintos niveles de radiación que alcanza cada zona, demuestran que puede conseguirse gran adaptabilidad a geometrías complejas.

cuidado a efectos de protección radiológica, tanto a la hora de exigir blindajes y construcciones de mayores dimensiones e importancia como a la hora de establecer procedimientos adecuados de trabajo, de medir y controlar las dosis recibidas por los profesionales de la instalación.

Optimización en radioterapia externa:

La correcta aplicación de un tratamiento de radioterapia, y por tanto su éxito, descansa no solo en las características adecuadas de la unidad desde la que se produce la radiación (ya sea un acelerador o un proyector de fuentes radiactivas) y su caracterización precisa con los procedimientos dosimétricos y geométricos que aplica el especialista en radiofísica, sino en toda una cadena de procedimientos y desarrollos adicionales.

Una parte de estos desarrollos se centran por ejemplo en obtener del acelerador una conformación de la radiación más adaptada a las formas geométricas específicas del volumen tumoral que se pretende irradiar, frecuentemente muy irregulares. Además se trata de reducir lo más posible la dosis impartida al resto de órganos y tejidos circundantes, para preservarlos mejor y disminuir la toxicidad del tratamiento.

- Radioterapia con modulación de intensidad y arcoterapia

La radioterapia de intensidad modulada (IMRT por sus siglas en inglés) es un tipo de radioterapia

tridimensional conformada, en la que se emplean un número grande de campos de radiación, a su vez compuestos de muchos segmentos o campos más pequeños superpuestos, en cada uno de los cuales se varía significativamente la intensidad de la radiación, para alcanzar una distribución con gradientes o variaciones de la dosis de radiación depositada muy abruptos. Permite conformar las regiones de alta dosis a geometrías irregulares y definidas específicamente para evitar ciertas zonas.

La radiación que se va depositando en cada uno de estos segmentos elementales lo puede hacer de una manera más o menos **secuencial** (interrumpiendo la irradiación, cambiando la configuración de las láminas del colimador que define la forma del campo y volviendo a irradiar otro segmento, etc.) o de modo más **dinámico**, moviendo las láminas del colimador que conforman el campo a la vez que se sigue emitiendo la radiación.

En ocasiones incluso se produce un movimiento de giro alrededor de su eje del brazo del acelerador, describiendo un arco, junto al movimiento de las láminas que conforman el campo y simultáneamente a la emisión de radiación, lo que se conoce como arcoterapia volumétrica (VMAT por sus siglas en inglés).

Se emplean gran cantidad de equipos auxiliares, centrados en obtener imágenes e información anatómica para controlar permanentemente dicho posicionamiento del paciente. En estos procedimientos intervienen múltiples profesionales y son controlados y registrados cuidadosamente.

- Radioterapia guiada por la imagen

Una preocupación de cualquier tratamiento de radioterapia es conseguir un posicionamiento correcto del paciente que reproduzca el esquema de irradiación previsto, además de mantenerlo estable y reproducible dentro de cada sesión y a lo largo de todas las que componen el tratamiento. El posicionamiento inicial se ayuda de sistemas de inmovilización y dispositivos de alineamiento, como láseres. Estos sistemas (como el mostrado en la figura 32) han sido habituales durante mucho tiempo.

Alcanzar este objetivo de una radioterapia de precisión, en la que las incertidumbres estén reducidas al mínimo y se pueda asegurar que la dosis prescrita que se administra a un determinado volumen, así como las dosis recibidas en los órganos y tejidos alrededor son, tras el tratamiento, las que estaban previamente programadas.

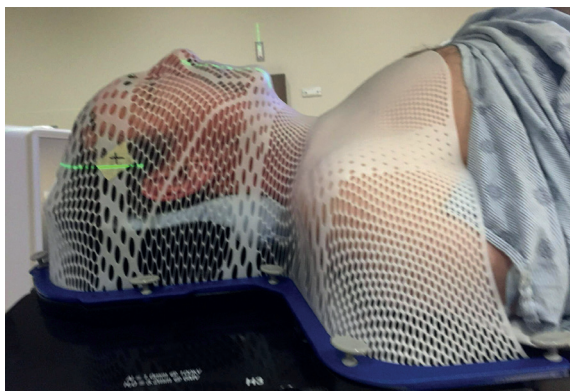


Figura 32. Sistema de inmovilización convencional.

Ello es posible ya con las técnicas de guiado por la imagen.

La importancia de este control continuo del posicionamiento se extiende incluso a nivel de los órganos internos, en los cuales los movimientos y cambios son en ciertos casos inevitables, como por ejemplo los debidos a la respiración.

Este control de la posición de las estructuras anatómicas de interés, monitorizándolas de forma dinámica y en tiempo real, puede incluso sincronizarse con el acelerador, de manera que la radiación se emite solo durante aquellos momentos en que se garantiza la correcta incidencia de los haces de radiación sobre las estructuras elegidas.

Ello se consigue utilizando diferentes sistemas de control mediante imágenes generadas con la radiación del propio acelerador, o con equipos de rayos X adicionales, con sistemas de guiado que detectan la superficie del paciente proyectando hacia él (y detectando) luz estructurada o por termografía, haciendo intervenir también a veces dispositivos dosimétricos, sistemas de monitorización del ciclo respiratorio, etc.

- Radioterapia adaptativa

Uno de los últimos desarrollos en el camino de perfeccionar al máximo y hacer más efectivos los tratamientos, consiste en ir haciendo modificaciones en el curso del propio tratamiento, de forma que se vaya adaptando a los cambios o

variaciones que inevitablemente se producen en el transcurso del mismo (características y tamaño del tumor, peso del paciente, posición de los órganos y tejidos adyacentes...).

Implementar este avance exige múltiples mecanismos de control sobre el tratamiento, guiados por las imágenes y datos anatómicos que se van obteniendo en tiempo real durante el transcurso de las sesiones, de forma que se van haciendo replanificaciones del tratamiento según sean necesarias.

Braquiterapia

La braquiterapia consiste en la colocación de fuentes radiactivas en contacto o en el interior del propio paciente, ayudándose de guías, catéteres o aplicadores específicos. Estas fuentes radiactivas son encapsuladas, es decir, se mantienen dentro de una estructura física que las contiene, de manera que no se dispersan o metabolizan en el interior del paciente.

El patrón de emisión de radiación de una pequeña fuente radiactiva en sus cercanías cumple el objetivo fundamental, que es obtener un alto gradiente de dosis. Esta es muy alta en su cercanía y disminuye abruptamente con la distancia, evitando por tanto la irradiación excesiva de los tejidos y órganos sanos que están alejados del tumor (figura 33).

La braquiterapia se subdivide en dos modalidades fundamentales. En la primera, o de implantes

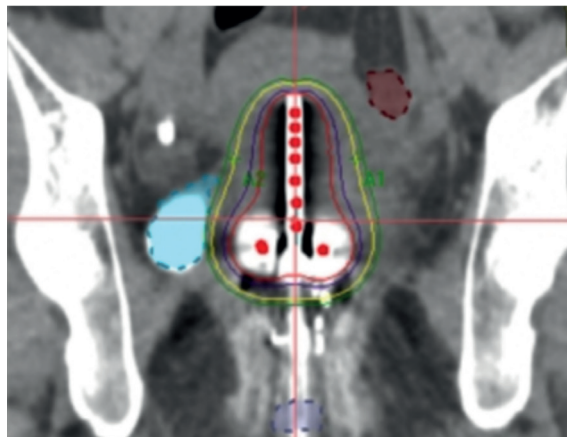


Figura 33. Curvas de isodosis alrededor de las posiciones de la fuente radiactiva, mostrando el alto gradiente de las mismas.

temporales, la fuente se sitúa por un tiempo determinado dentro del paciente, generalmente alojada en unas guías o aplicadores colocados previamente en él (figura 34). Transcurrido el tiempo previsto, en el que generalmente una única fuente se coloca en distintas posiciones durante determinados tiempos, previamente calculados para alcanzar la distribución de dosis deseada, la fuente se retira. Esto puede hacerse en una sola aplicación o repetirse en varias sesiones. Esta fuente habitualmente es de **iridio-192** o **cobalto-60**.

La fuente permanece alojada en un equipo o proyector de fuentes (figura 35), que la mantiene encerrada dentro de un blindaje, y solo se proyecta para alojarse durante el tiempo previamente determinado a través de unas guías o tubos de transferencia flexibles.

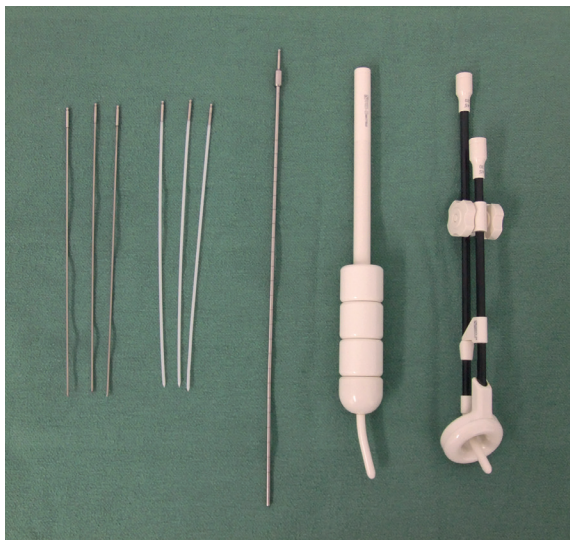


Figura 34. Distintos vectores y aplicadores para alojar la fuente dentro del paciente.



Figura 35. Proyector de fuentes radiactivas con un tubo de transferencia conectado.

En la segunda modalidad o de implantes permanentes, la fuente o fuentes se colocan en el paciente no siendo necesario retirarlas posteriormente. La permanencia de ellas en el interior del cuerpo no produce irradiación perjudicial para el paciente ni para las personas de su entorno. Un ejemplo son los tratamientos con pequeñas fuentes o semillas de iodo-125 (figura 36) para el tratamiento del cáncer de próstata.

En función del lugar en el que se aloja el implante de la fuente, se habla de **braquiterapia intracavitaria**, si la fuente se aloja en una cavidad del paciente, como es el caso de los tratamientos en tumores ginecológicos, o **braquiterapia intersticial**, si se inserta dentro del tejido del propio tumor.



Figura 36. Semillas para implantes de braquiterapia prostática.

Según la tasa de dosis que emite la fuente, se suele distinguir entre braquiterapia de baja tasa de dosis, cuando se mantiene la fuente en el paciente unas cuantas horas, o braquiterapia de alta tasa, cuando la fuente permanece en el paciente escasos minutos, generalmente distribuyendo este tiempo de permanencia en diferentes posiciones para conseguir una distribución de la dosis en la geometría adecuada. Esta última modalidad permite incluso tratamientos ambulatorios y es la más extendida en el presente.

Seguridad en el uso médico de las radiaciones ionizantes

Con el fin de conseguir un uso seguro de las radiaciones en el ámbito médico, la normativa exige cualificaciones específicas en protección radiológica a los profesionales que realizan, asesoran o son responsables de esas aplicaciones. De esta forma, se establece un sistema de formación, acreditaciones y licencias para los profesionales implicados en estos procedimientos.

Especialistas en radiofísica hospitalaria

Los profesionales encargados de apoyar y asesorar desde el punto de vista de la seguridad radiológica y optimización en los procedimientos con radiaciones en las aplicaciones médicas, deben poseer una formación sanitaria especializada en radiofísica hospitalaria.

Estos profesionales reúnen tanto las competencias de protección radiológica enfocada a los pacientes, como las relacionadas con la protección radiológica de trabajadores y público.

En relación con el primer aspecto, son los responsables de la caracterización de los haces de radiación, la planificación y la eficaz administración de los tratamientos, las dosis impartidas a los pacientes en pruebas diagnósticas y del control de la calidad de las imágenes obtenidas. Deben verificar y controlar el estado del equipamiento emisor y detector de radiaciones ionizantes como por ejemplo, equipos de rayos X, equipos de detección en medicina

nuclear y aceleradores o proyectores de fuentes radiactivas.

En cuanto al segundo aspecto, sus funciones se inscriben dentro de la participación del radiofísico en los servicios o unidades técnicas de Protección Radiológica que se describen a continuación.

Servicios y Unidades Técnicas de Protección Radiológica

En los centros o instituciones sanitarias debe estar disponible siempre el asesoramiento en protección radiológica, bien por un Servicio de Protección Radiológica (SPR), propio de la organización o una Unidad Técnica de Protección Radiológica (UTPR), entidad externa al centro sanitario, para vigilar el adecuado uso de las radiaciones ionizantes. En función del tipo de aplicaciones que se realizan en cada centro, así será la estructura con la que debe contar.

El SPR tiene delegada por el titular del centro la responsabilidad desde el punto de vista de la protección radiológica (del público y de los trabajadores expuestos) debido al uso de equipos emisores y fuentes de radiación. Entre otras misiones, se encargan de la **protección radiológica operacional**: clasificación y vigilancia dosimétrica de los trabajadores expuestos, vigilancia radiológica de los ambientes de trabajo, control de la posible contaminación radiactiva en los mismos, gestión adecuada de las fuentes y residuos

radiactivos y control de los efluentes, etc. Para ello trabaja en colaboración con un gran número de servicios clínicos del centro sanitario, en los que están presentes las instalaciones radiológicas y radiactivas.

Tanto los SPR como las UTPR están formados por, al menos, un especialista en radiofísica hospitalaria, en posesión de un diploma de jefe de Protección Radiológica otorgado por el CSN, y eventualmente otros especialistas en radiofísica. También pueden incluir otro perfil profesional acreditado, el de los técnicos expertos en protección radiológica.

El Consejo de Seguridad Nuclear



El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) es el único organismo competente en España en materia de seguridad nuclear y protección radiológica que tiene como misión proteger a los trabajadores, la población y el medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes.

Sus funciones están recogidas en la *Ley 15/1980, de 22 de abril, de Creación del Consejo de Seguridad Nuclear*. Entre otras, se trata de la evaluación y control de la seguridad de las instalaciones nucleares y radiactivas, en todas y cada una de las etapas de su vida (diseño, construcción, pruebas, operación, desmantelamiento y clausura) a través de las evaluaciones de proyectos y

modificaciones de los mismos y de las inspecciones periódicas y revisión de informes presentados. Está capacitado para suspender la construcción o el funcionamiento de las instalaciones por razones de seguridad. Además, vigila los niveles de radiación dentro y fuera de las instalaciones (en aire, agua, suelo, alimentos...) evaluando el impacto radiológico en las personas y el medio ambiente. Concede y renueva, mediante la realización de pruebas, las licencias de operador y supervisor para instalaciones nucleares o radiactivas, los diplomas de jefe de Servicio de Protección Radiológica y las acreditaciones para dirigir u operar las instalaciones de rayos X para diagnóstico médico. También debe proporcionar apoyo técnico en caso de emergencia nuclear o radiactiva y participar en la elaboración de los planes de emergencia exteriores de las instalaciones. Propone al gobierno las reglamentaciones necesarias en materia de seguridad nuclear y protección radiológica e informa a la opinión pública sobre materias de su competencia.

Se rige por un estatuto propio, pudiendo encomendar algunas de sus funciones a las comunidades autónomas. Además, debe informar anualmente al Congreso de los Diputados y al Senado de su actividad.

La Dirección General de Política Energética y Minas es la responsable de otorgar las autorizaciones de las instalaciones nucleares y radiactivas y de elaborar el Registro de Instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico.

Ministerio y Consejerías de Sanidad

Las autoridades sanitarias, el Ministerio de Sanidad y las correspondientes consejerías autonómicas son las encargadas de promulgar la reglamentación aplicable, de velar por la correcta aplicación de los principios de protección radiológica del paciente y de controlar la implantación de los programas de garantía de calidad en las instalaciones.

Organismos internacionales relacionados con la protección radiológica



El principal organismo internacional relacionado con la protección radiológica es la ICRP, dedicada a fomentar el progreso de la ciencia de la protección radiológica para beneficio público.

La ICRP es una asociación científica sin ánimo de lucro e independiente, cuyos miembros lo son, a título personal, por su excelencia científica en determinados campos de interés en radioprotección. Emite recomendaciones y presta asesoramiento sobre todos los aspectos relacionados con la protección contra las radiaciones ionizantes. Estas recomendaciones son la base para el establecimiento de reglamentación y normativa por parte de organizaciones internacionales y autoridades regionales y nacionales.



Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

La trascendencia práctica a nivel mundial de la relación entre las dosis de radiación y los efectos que producen fue percibida por la Asamblea General de las Naciones Unidas que decidió en 1955 crear el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR). España es miembro de pleno derecho de UNSCEAR desde comienzos de 2012.

Este comité considera la información científica disponible y apoyada en las conclusiones de revisiones y congresos de organismos y comités nacionales e internacionales relacionados. Confecciona y presenta a la asamblea general un análisis exhaustivo que contiene, entre otras cosas, las relaciones dosis-efecto que son la base de la limitación de dosis y riesgos. Estas evaluaciones de UNSCEAR contribuyen esencialmente al trabajo de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).



La Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) tiene como misión el desarrollo de normas y guías que, conteniendo esencialmente las recomendaciones de la ICRP, hayan alcanzado un consenso internacional. Este consenso no es solo entre países, sino también con otras organizaciones de Naciones Unidas, como la

Organización Mundial de la Salud o la Organización Internacional del Trabajo.



Euratom

La Unión Europea (UE), en el tratado EURATOM, establece la normativa sobre protección radiológica que es exigida a los Estados miembros de la UE, quienes posteriormente realizan la transposición de la misma a sus respectivas legislaciones.

Para ello toman como base las recomendaciones de los organismos anteriormente citados, en especial las normas básicas de seguridad promulgadas por la OIEA.

NOTAS:

[1] Se pueden encontrar datos correspondientes a España en: <https://www.csn.es/radiacion-gamma-ambiental>.

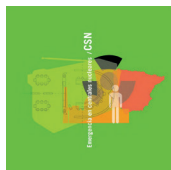
[2] Pueden consultarse datos en tiempo real de la tasa de dosis gamma ambiental monitorizada en unas 5000 estaciones ubicadas en toda Europa: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Rad-Data-Exchange>.

[3] Información con más detalle en: <https://www.csn.es/documents/10182/914801/FDE-01.03+-+Espectro+de+ondas+electromagn%C3%A9ticas+-+Folleto>

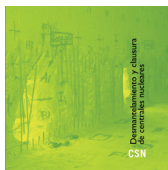
[4] Datos correspondientes a 2022: <https://seram.es/en-espana-se-realizan-mas-de-40-millones-de-pruebas-de-imagen-al-ano-segun-la-sociedad-espanola-de-radiologia-medica-seram/>

[5] Se encuentra información oficial sobre los programas de cribado mamográfico en: <https://www.sanidad.gob.es/areas/promocionPreven-cion/cribado/cribadoCancer/cancerMama/info-General.htm>

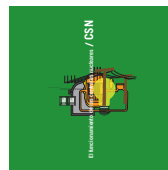
Otras publicaciones



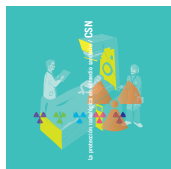
Emergencia
en centrales
nucleares



Desmantelamiento
y clausura
de centrales
nucleares



El funcionamiento
de las centrales
nucleares



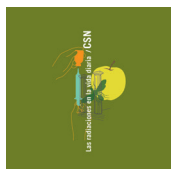
La protección
radiológica
en el medio
sanitario



Dosis de
radiación



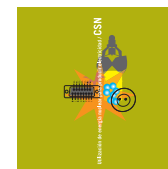
Protección
radiológica en
la industria,
agricultura,
docencia e
investigación



Las radiaciones
en la vida diaria



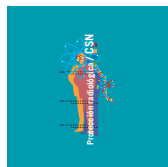
El transporte
de materiales
radiactivos



Utilización de
energía nuclear
para producir
electricidad



Red de Vigilancia
Radiológica
Ambiental
[REVIRA]



Protección
radiológica



Protección de
las trabajadoras
gestantes expuestas
a radiaciones
ionizantes en el
ámbito sanitario



Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
Tel.: 91 346 01 00
www.csn.es