



La protección radiológica en el medio sanitario / CSN



Referencia: SDB-04.05
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-39878-2012

Impreso en papel reciclado



ÍNDICE

Las radiaciones ionizantes	7
Introducción: El átomo	7
Radiactividad y radiación	8
Un poco de historia	10
Radiación natural	10
Radiación artificial	12
Detección y medida de la radiación	14
Magnitudes y unidades utilizadas para su medida ¿Qué es la dosis? ¿Qué es un sievert?	14
Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes	17
Radiodiagnóstico	17
Radiografía convencional	19
Mamografía	19
Radiología dental	20
Escáner-TC	21
Fluoroscopia	22
Radiología Intervencionista	22
Medicina Nuclear	23
Medicina Nuclear Diagnóstica	23
Medicina Nuclear Terapéutica. Terapia metabólica	28
Medicina Nuclear Terapéutica: Terapia molecular y teragnosis	29
Medicina Nuclear en otras áreas: Ganglio centinela	30
Radioterapia	30
Radioterapia externa o Teleterapia	31
Braquiterapia	37
Laboratorios de análisis e investigación	38
Riesgos de la radiación	39
Introducción	39
Riesgos radiológicos asociados a la práctica médica	39

Efectos biológicos	41
El sistema de protección radiológica	43
Objetivos de la protección radiológica	43
Definición del sistema de protección radiológica	43
Principios básicos de Protección Radiológica y límites de dosis	45
Situaciones especiales: mujeres embarazadas o en periodo de lactancia	46
Organismos internacionales relacionados con la protección radiológica	47
Aplicación del sistema de protección radiológica	50
Trabajadores y trabajadoras con exposición a radiaciones	50
Miembros del público	53
Pacientes	54
Supervisión de la aplicación del sistema	56
Control de las autoridades	58
Medidas de protección radiológica	59
Radiodiagnóstico	59
Radioterapia	60
Medicina nuclear y laboratorios de análisis clínico o investigación	62
Producción y gestión de residuos radiactivos	64
El residuo radiactivo	64
Gestión de los residuos radiactivos	64
Procedimientos de evacuación y acondicionamiento	65
Funciones y responsabilidades	67
Protección radiológica del trabajador expuesto y del público	67
Protección radiológica del paciente	69
Referencias	71
Glosario	72
Principales disposiciones legales	80

Las radiaciones ionizantes

Introducción: El átomo

Nuestro cuerpo y toda la materia que nos rodea está formada por átomos. Un átomo de cualquier elemento de la tabla periódica está compuesto por un núcleo, formado por protones y neutrones, alrededor del cual se encuentran distribuidos los electrones, en el mismo número que los protones cuando el átomo está en estado neutro.

Cada elemento químico concreto se caracteriza por tener un número determinado de protones en el núcleo, pero pueden existir variantes, con el mismo número de protones pero distinto número de neutrones. Estas variantes de un mismo elemento se llaman isótopos.

Por ejemplo, el hidrógeno (con un protón y ningún neutrón en el núcleo), el llamado deuterio (un protón y un neutrón) y el denominado tritio (un protón y dos neutrones), todos ellos con un electrón en su capa externa en estado neutro, son los tres, isótopos del mismo elemento, representados en la figura 1.

Así, para emplear una nomenclatura precisa que identifique el isótopo concreto al que nos referimos, se escribe el nombre o símbolo del elemento químico seguido del número de protones y de neutrones de su núcleo: hidrógeno-1, hidrógeno-2, hidrógeno-3 en el caso anterior, litio-7, etc.

Los átomos se combinan formando moléculas. Pueden estar formadas por átomos del mismo elemento, como la molécula de oxígeno, formada por dos átomos y representada por O_2 , o la de ozono, formada por tres átomos, O_3 . O bien por átomos de distinto elemento, como la molécula de agua, H_2O , formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno.

Las formas y propiedades con que se combinan los átomos en moléculas son las mismas para los isótopos de un mismo átomo, porque no dependen del distinto número de neutrones que eventualmente puedan tener en el núcleo, sino del número de electrones y su configuración en la capa externa del átomo, número que viene determinado por el de protones si el átomo está en estado neutro.



Figura 1. Átomos de hidrógeno (un protón y un electrón), deuterio (un protón y un neutrón en el núcleo) y tritio (un protón y dos neutrones en el núcleo).

Consecuencia de lo anterior, formando la molécula de agua encontramos con mayor frecuencia hidrógeno-1, pero también podemos encontrar deuterio o tritio sin que su apariencia o propiedades a nuestra vista cambien.

Radiactividad y radiación

Los núcleos de ciertos átomos son inestables y se transforman en otros núcleos más estables. Estas transformaciones (llamadas también 'desintegraciones') se caracterizan por la emisión de partículas o energía. Este fenómeno se conoce con el nombre de radiactividad, descubierta por Becquerel en 1886.

Esas emisiones, representadas en la figura 2, –también denominadas radiaciones– pueden ser principalmente de tres tipos: partículas alfa –constituidas por dos neutrones y dos protones–, partículas beta –electrones, con carga negativa o sus antipartículas con carga positiva llamadas positrones, que se crean en el núcleo de los átomos mediante determinados procesos–, y finalmente la radiación gamma, constituida por fotones, es decir, radiación electromagnética similar en esencia a los rayos X y a la luz. En ocasiones también se presenta la emisión de neutrones. Una cierta cantidad de material inestable radiactivo como el descrito queda caracterizado por dos magnitudes: la actividad y el periodo de semidesintegración.

La **actividad radiactiva** es una magnitud que expresa la velocidad de desintegración de una can-

tidad determinada de sustancia radiactiva. Corresponde al número de desintegraciones que sufre por unidad de tiempo, en un momento determinado, la muestra radiactiva considerada. Su unidad es el becquerelio (Bq) en honor del físico francés Becquerel. Un becquerelio es la desintegración de un átomo por segundo. Esta unidad es muy pequeña, utilizándose habitualmente múltiplos de ella: el kilobecquerel (kBq, mil becquerels) o el megabecquerel (MBq, un millón de becquerels).

El **periodo de semidesintegración** es el tiempo necesario para que la mitad de los átomos radiactivos inicialmente presentes en una muestra se desintegren.

En el contexto de la protección radiológica tendremos en cuenta igualmente los rayos X, que son también radiaciones ionizantes constituidas

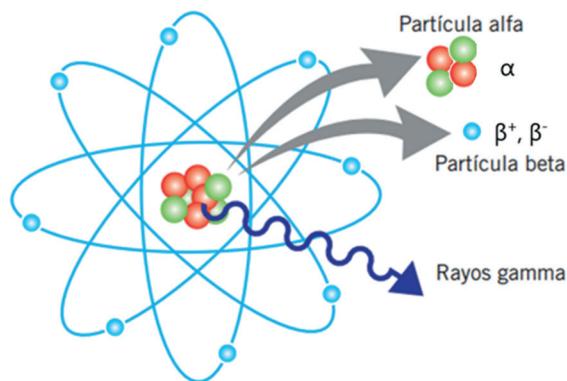


Figura 2. Representación esquemática de las emisiones que tienen lugar a causa de las transformaciones o desintegraciones radiactivas ocurridas en los núcleos de átomos inestables.

por ondas electromagnéticas, pero en esta ocasión su origen son fenómenos que se producen a nivel atómico y no del núcleo.

Los rayos X se generan al frenarse los electrones en la materia: como partículas cargadas que son, emiten radiación al perder velocidad o al sufrir cambios de trayectoria que suponen aceleraciones en distintas direcciones. A esos fotones de rayos X 'de frenado' se pueden añadir los rayos X característicos producidos en las desexcitaciones de electrones de unos niveles energéticos a otros inferiores.

Estas desintegraciones se pueden observar en elementos que se presentan en la naturaleza, en cuyo caso hablamos de radiactividad natural, o en elementos que se producen por el ser humano y hablamos de radiactividad artificial. Se denomina radionucleido a un isótopo radiactivo de un elemento que posee isótopos estables y radiactivos (como ejemplo el cesio-137).

Tal y como se observa en la figura 3, atendiendo a la penetración en la materia, las partículas alfa (formadas por dos neutrones más dos protones) penetran muy poco en la materia, por ello no presentan riesgo cuando actúan desde el exterior del organismo humano, pero sí en caso de su incorporación al mismo, ya que tienen un gran poder de ionización en una distancia muy corta.

Las partículas beta formadas por electrones (β^- , por tener carga negativa) o positrones (β^+ , por tener carga positiva). Son mucho más ligeras que las alfa y por tanto tienen un mayor poder de penetración.

Dentro de la radiación de naturaleza electromagnética tenemos la radiación gamma γ (de origen nuclear), y los rayos X (de origen atómico), ambas con un importante poder de penetración que depende de su energía.

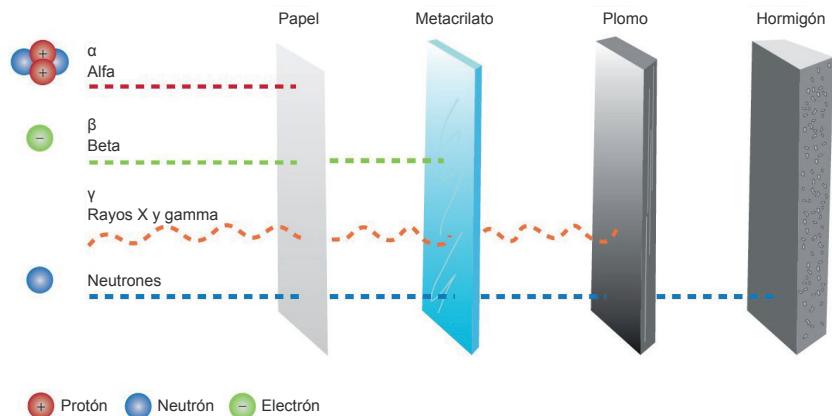


Figura 3. Capacidad de penetración en diversos materiales de diferentes tipos de radiación.

Un poco de historia

A principios del año 1896, Henri Antoine Becquerel, premio Nobel de Física en 1903, descubrió que un compuesto de uranio, sustancia natural, emitía espontáneamente radiaciones ionizantes. Dos años más tarde, el matrimonio Pierre y Marie Curie, que compartieron el premio Nobel de Física con Becquerel, encontraron que otra sustancia llamada torio emitía el mismo tipo de radiación que el compuesto de uranio. Las investigaciones de estos dos científicos condujeron al descubrimiento de un nuevo elemento llamado radio que tuvo importantes aplicaciones en el campo de la medicina. Las emisiones producidas por estos y otros elementos naturales, llamados radionucleidos, constituyen lo que se conoce como radiactividad natural. Su existencia data del origen de la tierra. Desde que nacemos hasta que morimos vivimos inmersos en un medio, en el cual convivimos con un determinado nivel de radiación. Los causantes de esta radiación natural son los radionucleidos naturales y la radiación cósmica. El ser humano, en las últimas décadas, ha sido capaz de generar nuevos radionucleidos, y a la radiación que emiten se la conoce con el nombre de radiación artificial. Las radiaciones ionizantes se utilizan, entre otros muchos campos, en la investigación, la industria y en el área sanitaria desde la triple vertiente diagnóstica, terapéutica e investigadora.

Radiación natural

Los seres vivos han estado siempre expuestos a fuentes naturales de radiaciones ionizantes. Una

característica distintiva de la radiación natural es que afecta a toda la población mundial con una intensidad relativamente constante a lo largo del tiempo, con variaciones geográficas.

Parte de la radiación de fondo presente en la superficie de la tierra procede del espacio y se conoce como radiación cósmica. La atmósfera, actuando como filtro natural, evita que la mayor parte de esta radiación alcance la superficie terrestre. La exposición a la radiación procedente del espacio es variable dependiendo de la altitud, siendo mínima a nivel del mar (ver ejemplos de valores en la figura 4). También varía, aunque

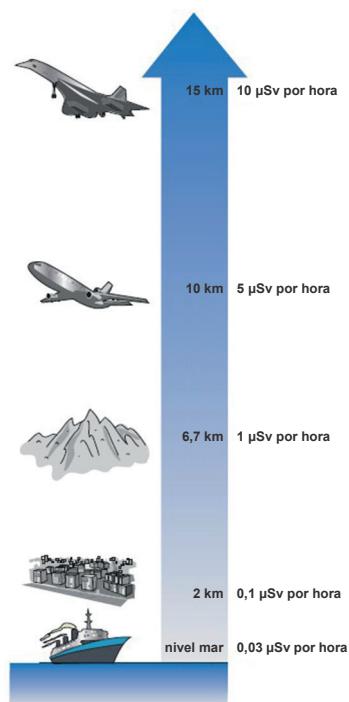


Figura 4. Valores típicos de la tasa de dosis que presenta la radiación cósmica a distintas altitudes.

en menor medida, en función de la latitud, siendo de menor intensidad en el ecuador que en los polos, debido a la acción del campo magnético terrestre. Además, hay que tener en cuenta que los rayos cósmicos al interactuar con la atmósfera, la biosfera y la litosfera generan radionucleidos denominados cosmogénicos, que también forman parte del fondo natural.

La radiación procedente del suelo es denominada radiación terrestre. Depende de la concentración de radionucleidos en la corteza terrestre y por lo tanto la exposición de las personas debida a esta radiación varía considerablemente dependiendo de la zona en la que habitan.

En la figura 5 se presentan ejemplos de distintos radionucleidos naturales.

Radionucleidos naturales	Periodo de semidesintegración
Cosmogénicos	
Hidrógeno-3	12,3 años
Berilio-7	53,2 días
Carbono-14	$5,7 \times 10^3$ años
Sodio-22	2,6 años
De la corteza terrestre	
Potasio-40	$1,3 \times 10^9$ años
Rubidio-87	$4,7 \times 10^{10}$ años
Serie uranio-235	$7,0 \times 10^{10}$ años
Serie uranio-238	$4,5 \times 10^{10}$ años
Serie torio-232	$1,4 \times 10^{10}$ años

Figura 5. Radionucleidos de procedencia cosmogénica y de la corteza terrestre.

Otras sustancias radiactivas naturales se encuentran presentes en el aire, los alimentos y el agua, y son incorporadas al interior del organismo con la dieta y la respiración, dando lugar a la conocida como exposición interna.

En la tabla de dosis medias mundiales (ver figura 6) se aprecia el rango de variación de la dosis efectiva anual (magnitud que se definirá con precisión en un siguiente apartado de este documento) causada por las diversas fuentes de radiación natural. La dosis efectiva debida al fondo de radiación natural para un individuo medio hipotético está estimada en 2,42 mSv por año, pero el rango de variación oscila entre 1 y 10 mSv por año según las distintas zonas de la tierra.

Dosis medias mundiales		
Fuente	Dosis efectiva (mSv por año)	Rango típico (mSv por año)
Exposición externa		
Radiación cósmica	0,39	0,3 - 1,0
Radiación terrestre (Th-232, U-238, U-235, Ra-226)	0,48	0,3 - 0,6
Exposición interna		
Inhalación: U, Th, Rn, Tn	1,26	0,2 - 10
Ingestión: U, Th, Rn, Tn	0,29	0,2 - 0,8
TOTAL	2,42	1 - 10

Fuente: UNSCEAR 2000.

Figura 6. Fondo de radiación natural: Promedio mundial y rango encontrado.

Radiación artificial

El comportamiento de los radionucleidos artificiales, las leyes por las que se rigen y el tipo de emisiones, son las mismas que para la radiactividad natural.

El período de semidesintegración de estos radionucleidos artificiales es, en general, inferior al de los radionucleidos naturales. De hecho, algunos de estos radionucleidos artificiales tienen períodos de semidesintegración de horas e incluso, excepcionalmente, de minutos.

Los radionucleidos artificiales, en el mundo sanitario se utilizan para el diagnóstico en los servicios de Medicina Nuclear, para investigación en el campo de la Inmunología, la Hematología, la Biología Molecular, etc., y en terapia en los servicios de Medicina Nuclear y Oncología Radioterápica. Se presentan ejemplos de ellos en la tabla de la figura 7.

Se utilizan también generadores de radiaciones ionizantes (rayos X y electrones), aplicados tanto en diagnóstico como en terapia.

Cuando se comparan las dosis individuales medias en la población mundial debidas a todas las fuentes, naturales y artificiales (ver figura 8) se puede observar que la contribución de mayor entidad corresponde al fondo natural y dentro de este un poco más de la mitad es debida al radón, gas noble procedente de la desintegración del radio (radio-226) y este a su vez del uranio (uranio-238) que forman parte de la composi-

ción natural de los suelos y aguas terrestres. El radón, debido a su naturaleza gaseosa, emana del suelo y de los materiales de construcción pudiendo acumularse en el interior de edificios y cuevas, dando lugar a exposiciones internas por inhalación que pueden ser importantes, cuando los terrenos sobre los que se asientan los edificios exhalan concentraciones elevadas de estos dos radionucleidos y las condiciones de ventilación son insuficientes.

Características y aplicación de algunos radionucleidos y radioelementos artificiales

Radionucleidos	Tipo de emisión	Periodo	Aplicación
Fosforo-32	β	14,3 días	Investigación
Yodo-131	β , γ	8 días	Diagnóstico, terapia
Iridio-192	β -	73,8 días	Terapia
Tecnecio-99m	γ	6 horas	Diagnóstico
Carbono-11	β^*	20,4 min	Diagnóstico

Figura 7. Radionucleidos de origen artificial empleados en medicina.

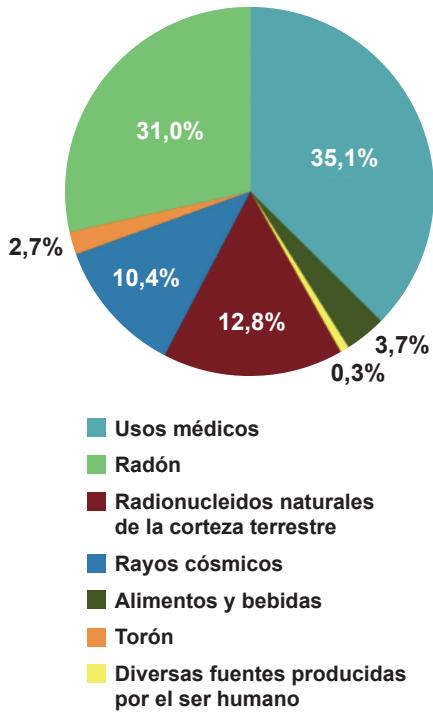


Figura 8. Contribución de las fuentes naturales y artificiales al promedio de radiación.

Detección y medida de la radiación

Algunas manifestaciones de energía como el calor y determinados sonidos pueden ser claramente identificadas por nuestros sentidos, sin embargo, los humanos no somos capaces de ver o sentir la radiación ionizante.

A través de los efectos que la radiación produce en la materia, como por ejemplo la ionización que produce en un gas, dando lugar a cargas eléctricas libres que pueden ser medidas en forma de corriente eléctrica, somos capaces de detectar su presencia y cuantificarla (se muestra la imagen de un detector en la figura 9), con las magnitudes y unidades que veremos a continuación.



Figura 9. Detector de radiación.

Magnitudes y unidades utilizadas para su medida ¿Qué es la dosis? ¿Qué es un sievert?

De igual forma que para determinar la cantidad de materia que poseen los cuerpos, se utiliza una magnitud llamada masa, cuya unidad es el kilogramo con sus múltiplos y submúltiplos, la cantidad de radiación debe ser cuantificada con magnitudes y unidades concretas. Puesto que la radiación es energía, la magnitud que la medirá es la energía que “contiene”: por ejemplo, la energía que cede o es absorbida por una cantidad de materia determinada. Este cociente, entre energía por unidad de masa, es la dosis absorbida (D) y se mide en una unidad llamada *gray* ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ Julio} / \text{kg}$). (Figura 10)

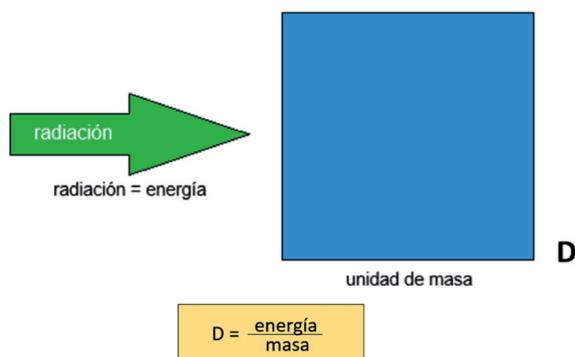


Figura 10. Representación de la dosis absorbida.

Cuando la radiación incide en un organismo vivo, debe tenerse en cuenta que el daño biológico depende del tipo de radiación de que se trate (alfa, beta, gamma, rayos X o neutrones) y que la misma cantidad de radiación o misma dosis absorbida, pero de distinto tipo de radiación, produce distinto daño.

Para tener en cuenta esta circunstancia, cuando consideramos el daño biológico empleamos una nueva magnitud llamada dosis equivalente (H), (figura 11) que introduce un factor (w_R) multiplicativo sobre la dosis absorbida, dependiendo del tipo de radiación. Una vez introducido este factor (cuyo valor concreto aparece especificado en las figuras 12.a para varios tipos de radiación y 12.b para neutrones en concreto) la unidad en la que se mide esta nueva dosis equivalente se llama *sievert*.

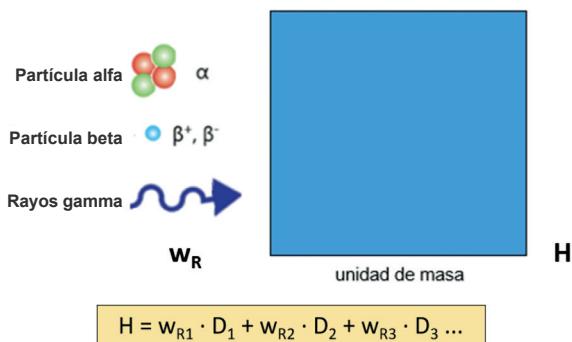


Figura 11. Representación de la dosis equivalente en el caso de incidencia simultánea de distintos tipos de radiación.

En protección radiológica es más frecuente hablar de submúltiplos de esta unidad, por ejemplo su milésima parte, el milisievert (1 mSv = 0,001 Sv) y su millonésima parte, el microsievert (1 μ Sv = 0,000.001 Sv).

Tipo y rango de energía	w_R
Fotones	1
Electrones y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa, fragmentos de fisión e iones pesados	20
Neutrones	Ver explicación

Figura 12.a. Factores de ponderación de la radiación, w_R .

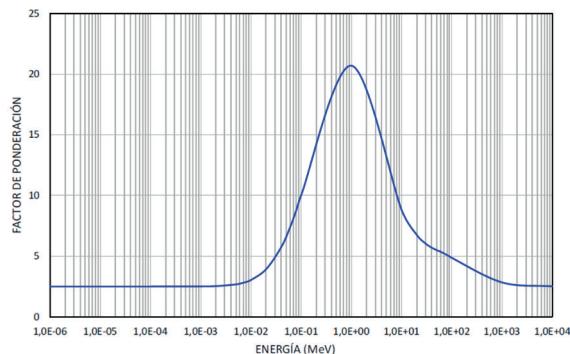
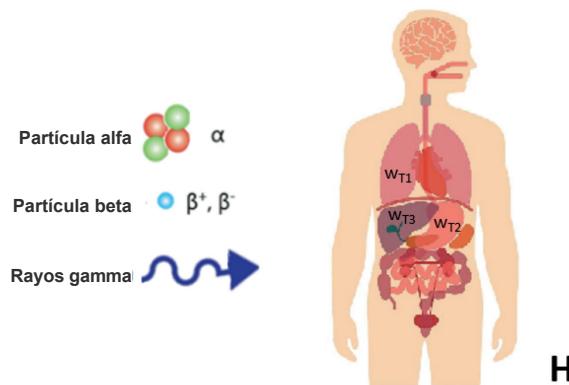


Figura 12..b. Valor que adquiere el factor de ponderación de la radiación según la energía de los neutrones.

Finalmente, para tener en cuenta el tipo de tejido biológico u órganos afectados, que tienen diferente sensibilidad y son dañados de forma distinta, utilizamos otra magnitud, la dosis efectiva (E), (figura 13) que también se mide en sieverts y sus submúltiplos. La dosis efectiva se calcula como la suma de las dosis equivalentes recibidas por cada órgano multiplicadas cada una de ellas por un factor que tiene en cuenta la radiosensibilidad del órgano o tejido (w_T), listados en la figura 14.

Como veremos, los límites de dosis se establecen sobre estas dos magnitudes, dosis equivalente y dosis efectiva, pero no es factible su medida física en exposición a campos de radiación externa. Por ello, para verificar el cumplimiento de los límites se hace uso de las llamadas magnitudes operacionales (como el equivalente de dosis personal y equivalente de dosis ambiental), determinadas a partir de magnitudes físicas directamente medibles y factores de conversión bien establecidos por organismos internacionales.

Estas magnitudes operacionales proporcionan una buena estimación (y en todo caso conservadora) de las magnitudes dosimétricas para las que se definen los límites.



$$E = w_{T1} \cdot H_1 + w_{T2} \cdot H_2 + w_{T3} \cdot H_3 \dots$$

Figura 13. Representación de la dosis efectiva.

Figura 14. Factores de ponderación de tejido, w_T .

Órgano o tejido	w_T	$\sum w_T^{(1)}$
Médula ósea, colon, pulmón, estómago, mama.	0,12	0,60
Gónadas.	0,08	0,08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides.	0,04	0,16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivares, piel.	0,01	0,04
Resto de tejidos ⁽²⁾ .	0,12	0,12

(1) Los factores w_T representan la contribución relativa de cada órgano o tejido al detrimento de la salud resultante de una exposición total del organismo, y por ello, dichos factores de ponderación deben sumar la unidad.

(2) Se incluyen los siguientes tejidos (14 en total): glándulas suprarrenales, región extra-torácica, vesícula biliar, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo y útero.

Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes

Se exponen a continuación, agrupadas en las tres principales especialidades que abarcan, las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en medicina, tanto en el diagnóstico como en el tratamiento de enfermedades. Adicionalmente, se utilizan pequeñas actividades de fuentes no encapsuladas en laboratorios de investigación, o en servicios clínicos que realizan determinaciones *in vitro* a partir de muestras extraídas de pacientes (que por tanto no conllevan su exposición a radiación).

Radiodiagnóstico

El radiodiagnóstico comprende las técnicas de obtención de imágenes, estáticas o dinámicas, cuya información es fundamentalmente morfológica y anatómica, y se basa en el registro del contraste de las densidades correspondientes a los tejidos cuando son atravesados por haces 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.

Los rayos X son 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 15).

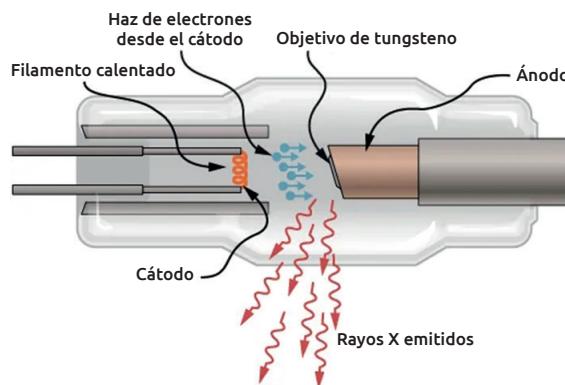


Figura 15. Esquema de producción de rayos X.

Cuanto mayor es la diferencia de potencial aplicada (puede variar desde 25 kV para una mamografía hasta unos 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 a visualizar, entre la salida del tubo de rayos X 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 proceso de revelado o lectura posterior.

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, aparecen como más claras dentro de una escala de grises, mientras las partes menos densas, como por ejemplo un pulmón, dejan pasar más radiación y aparecen como más oscuras.

El radiodiagnóstico es una práctica muy extendida para detectar y hacer seguimiento a muchas patologías, por lo que se convierte en la principal fuente de radiación artificial que recibe la población.

La cantidad de radiación que se recibe como paciente por una única prueba de radiodiagnóstico es muy variable, oscilando entre unas centésimas de mSv en una prueba convencional y unos mSv en una prueba de TC. 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 su beneficio neto considerando este riesgo. La proliferación de exposiciones a radiación innecesarias sí tiene un impacto significativo en la incidencia de efectos considerando un número grande de exposiciones e individuos expuestos.

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 obtener estas 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 ayudan al diagnóstico, entre las cuales empiezan a aparecer las basadas en inteligencia artificial.

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.

Se hace un repaso a continuación de las principales tipologías de equipos de rayos X que, empleando el mismo funcionamiento básico, mediante diseños adaptados, permiten obtener distintas imágenes del cuerpo humano según convenga.

Radiografía convencional

Son las pruebas más sencillas de diagnóstico, obtenidas en equipos formados por un tubo enfrentado a un detector plano, situado bien en una mesa para proyecciones de los pacientes tumbados en la misma, 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 suelen disponer de sistemas de control automático de la exposición, para asegurar que se emite únicamente 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 traumatólogicas para visualizar fracturas de los huesos.

Mamografía

La mamografía es una imagen de la mama obtenida con rayos X de energías adecuadas producidas por un equipo específico (figura 16) para poder distinguir los diferentes tejidos mamarios (se muestra una imagen de una mamografía en la figura 17).

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 [1].

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 16. Equipo específicamente dedicado a realización de mamografías.

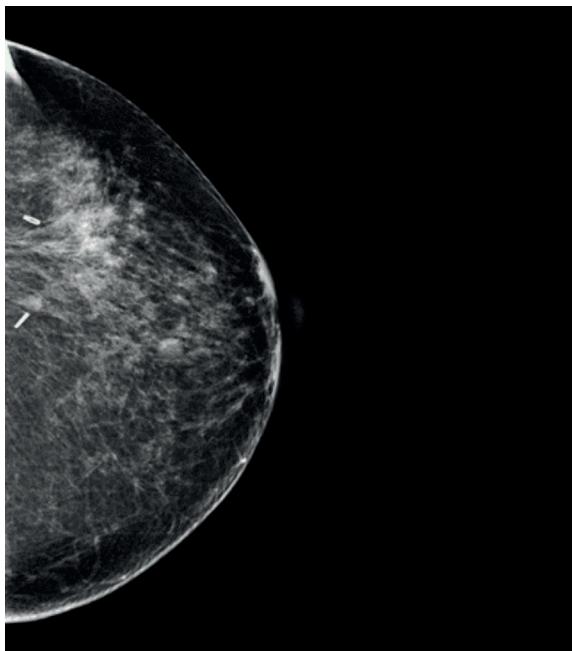


Figura 17. Ejemplo de una mamografía de proyección lateral.

Radiología dental

Las radiografías dentales son un tipo de imagen de los dientes y las estructuras de nuestra boca, 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 (las imágenes de las figuras 18 y 19 muestran respectivamente el tipo de equipo em-



Figura 18. Equipo para radiografía dental panorámica.

pleado y la imagen producida de una ortopantomografía); 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 19. Ejemplo de ortopantomografía o radiografía dental panorámica.

Escáner-TC

En la llamada tomografía computarizada (TC o escáner-TC), en lugar de obtener una imagen de proyección como en la radiografía convencional, se hace rotar el tubo de rayos X alrededor del paciente mientras emite un haz en forma de abanico, al tiempo que se hace avanzar la mesa sobre la que se coloca el paciente. Al tiempo, 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 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 20).

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.

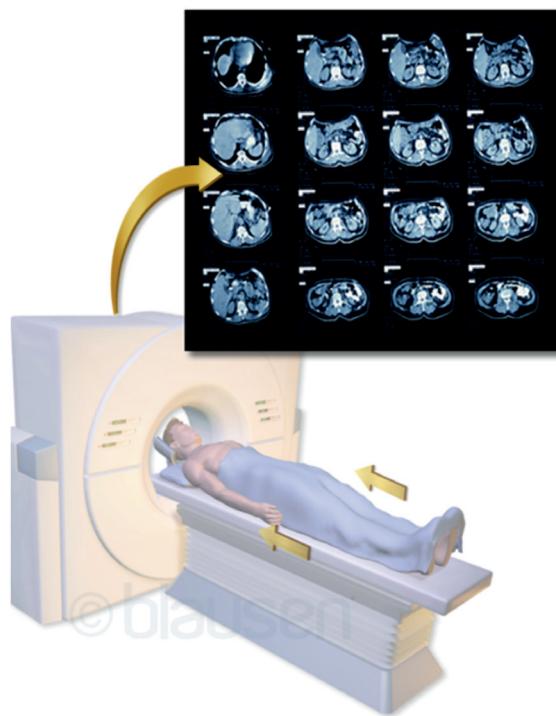


Figura 20. Disposición del paciente en el TC, con el desplazamiento de la mesa hacia el interior del anillo donde se sitúan el tubo de rayos X y los detectores. Imágenes axiales obtenidas.

Fluoroscopia

La fluoroscopia, o escopia, es una variante de la radiografía en la que se emite la radiación de menor intensidad, pero 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 cólicos hepáticos e incluso cálculos renales 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 que se pueden visualizar en modo cine.

Los expertos que practican estas técnicas intervencionistas (que además de los propios médicos especialistas en radiodiagnóstico pueden ser especialistas en cardiología, urología o cirugía vascular), se apoyan 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 (ejemplo del tipo de imágenes manejadas en la figura 21).

Por tanto, en ella convergen procedimientos diagnósticos y actuaciones terapéuticas que reducen la necesidad de prácticas quirúrgicas, el



Figura 21. Imagen durante un procedimiento intervencionista.

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.

Medicina Nuclear

Podemos distinguir dos tipos de práctica según la intención: el diagnóstico o la terapia de enfermedades.

Medicina Nuclear Diagnóstica

La medicina nuclear diagnóstica utiliza la distinta captación y distribución en órganos y tejidos de diversas sustancias, “marcadas” con isótopos radiactivos y administradas al paciente, para generar imagen o información metabólica mediante la detección de la radiación que se emite desde esas zonas de captación del interior del cuerpo.

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 por su actividad, generalmente muy pequeña, de manera que no tienen acción farmacoterapéutica y tienen escasos efectos secundarios. 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 que la que recibiría con una exploración radiográfica.

En el proceso, se administra el radiotrazador habitualmente por vía intravenosa o inhalatoria, y tras un periodo que oscila entre algunos minutos y varias horas, en el que se acumula en un tejido, órgano o sistema determinado, 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 (o en general una señal que da información acerca de esa zona u órgano).

El trazador acaba siendo excretado del cuerpo del paciente, generalmente a través de la orina.

Aunque su empleo es el diagnóstico oncológico, también se emplea para 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.

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, que es el laboratorio en el que se preparan las actividades de radiotrazadores destinadas a cada paciente, las salas de inyección/administración, salas de espera de pacientes inyectados, salas diagnósticas, en las que están ubicados los equipos de adquisición de imagen (gammacámaras, SPECT, PET, PET-CT, etc), con las correspondientes áreas de control y sala para el almacenamiento y gestión de los materiales residuales con contenido radiactivo.

Equipos y aplicaciones:

- Gammacámaras planares / SPECT

La gammacámara planar (gammacámara Anger) ha sido durante muchos años el equipo diagnóstico fundamental para la detección de radionucleidos emisores gamma de baja energía (de forma primordial tecnecio-99m). Consta de un cristal detector y tubos fotomultiplicadores, más la electrónica asociada para formar la imagen a

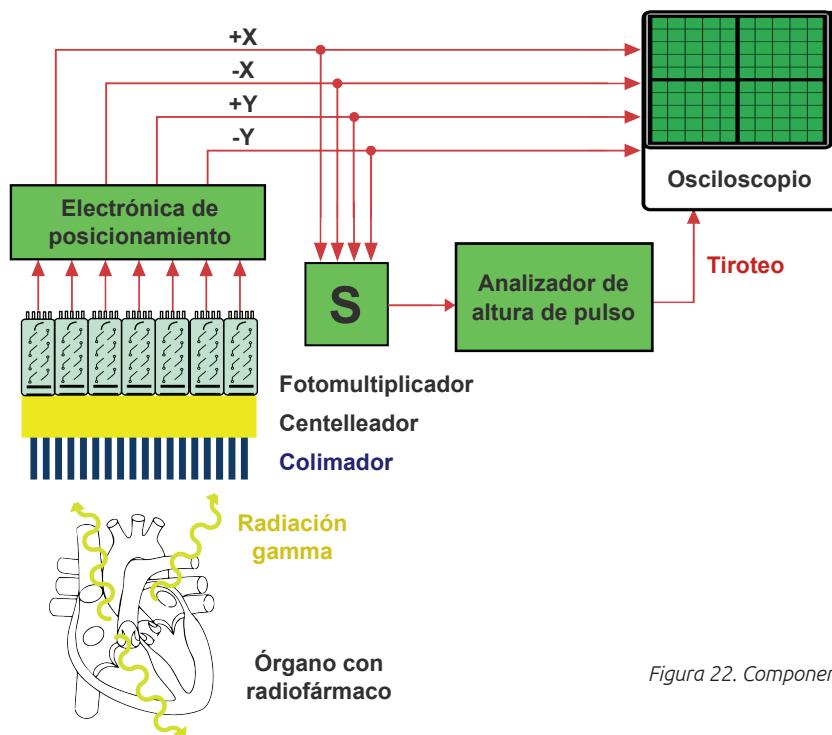


Figura 22. Componentes fundamentales de una gammacámara.

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 22).

El SPECT se diferencia respecto a la gammacámara planar en que 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.

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 (ver figura 23).

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.

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

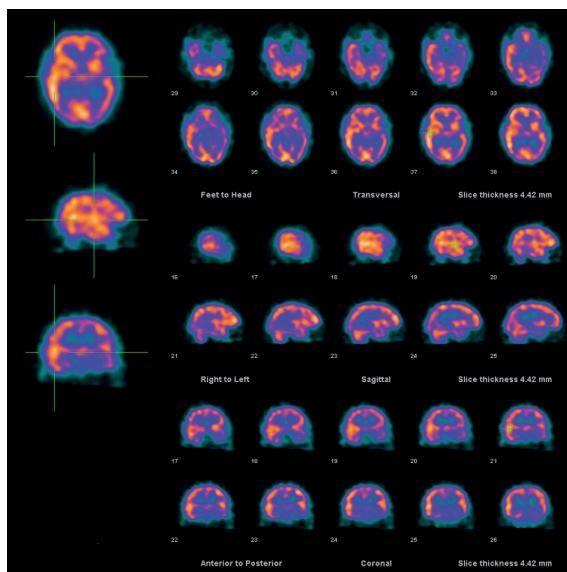


Figura 23. SPECT cerebral mostrando imágenes reconstruidas en cortes transversales, sagitales y coronales.

• PET

La Tomografía por Emisión de Positrones (PET, por sus siglas en inglés) 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 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 administran a cada paciente.

Tras la administración, el paciente permanece en sala de reposo durante unos cuantos minutos, tiempo durante el cual 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, y dotado de una electrónica de alta precisión de forma que solo considerará como evento cuan-

tificable (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 (figura 24).

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.

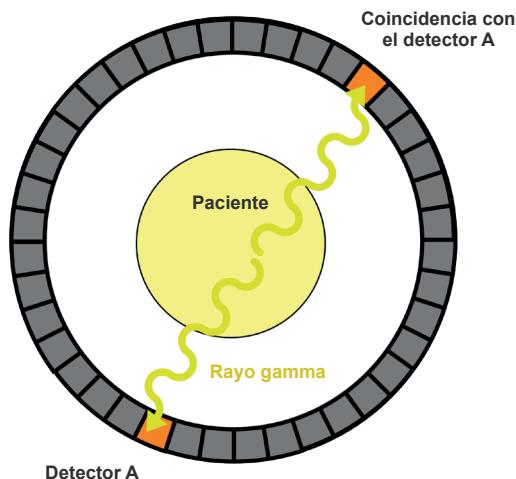


Figura 24. Registro en detectores opuestos y en coincidencia de los dos fotones de aniquilación.

En los últimos años ha crecido de forma exponencial el uso del PET. Uno de los ejemplos más conocidos de aplicación es el que permite ob-

tener 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 de cada zona.

En Oncología, en la actualidad, el PET se ha convertido en un instrumento 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, y considerando que estamos ante un procedimiento diagnóstico no invasivo.

- Equipos híbridos (SPECT-CT, PET-CT)

Las emisiones que se detectan por el SPECT y PET están atenuadas de distinta manera, según sean las diferentes densidades de los tejidos que se encuentran en su camino, antes de salir al exterior del cuerpo.

Es necesaria la corrección de esta atenuación que provocan las distintas estructuras en el interior del paciente para mejorar la calidad de imagen, con objeto de que la reconstrucción tridimensional obtenida sea el reflejo más fiel de la distribución real del trazador dentro del organismo.

Este objetivo se ha conseguido con el desarrollo de los equipos híbridos 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 (la figura 25 muestra un equipo de esta tipología y la figura 26 el resultado de este procedimiento de fusión).



Figura 25. Equipo PET-CT.

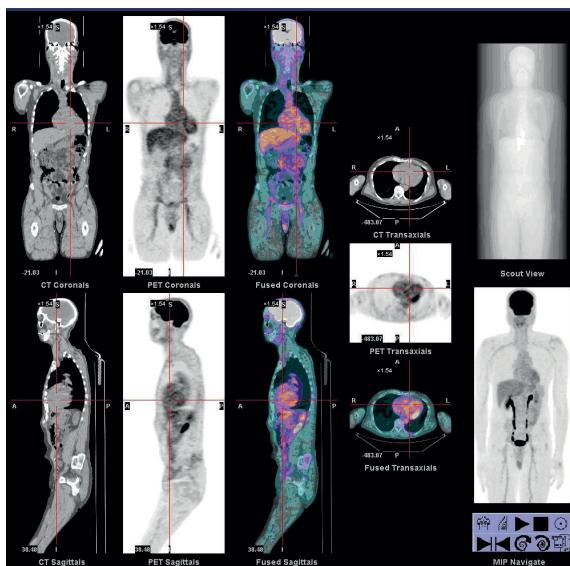


Figura 26. Imágenes de CT y PET de cuerpo entero, reconstruidas en cortes sagitales, e imágenes PET-CT fusionadas.

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 iodo-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 iodo-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, e 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).

Medicina Nuclear Terapéutica: Terapia molecular y teragnosis

En los últimos años, se han venido desarrollando en medicina nuclear 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 27).

Esta capacidad para poder 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, y 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.

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 específi-

cas, 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

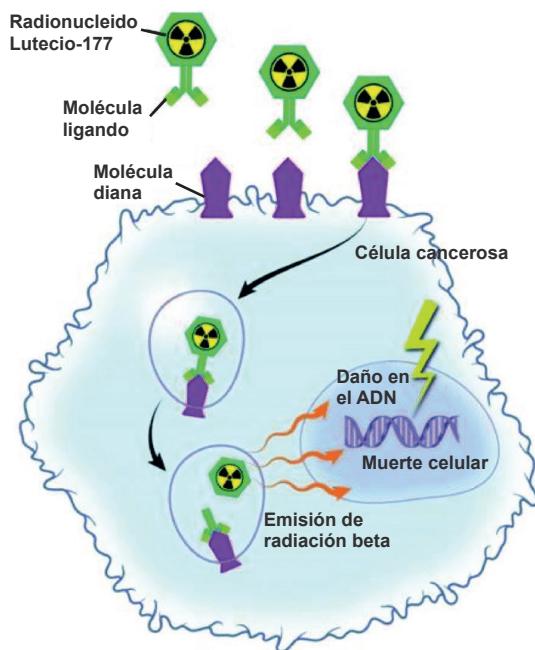


Figura 27. Esquema del fundamento de la terapia molecular en medicina nuclear.

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 del paciente.

En el procedimiento de diagnóstico y estadiaje del 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), y posterior uso de una sonda quirúrgica en el quirófano para la localización del ganglio centinela, de forma que se facilite su extirpación.

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 para detener la progresión de las células tumorales.

Este objetivo terapéutico implica que el paciente reciba una dosis en una zona localizada 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.

Los datos anatómicos de cada paciente individual, adquiridos mediante TC y eventualmente apoyados por PET y/o resonancia magnética, se

introducirán en el llamado planificador, un ordenador que cuenta con un software especializado y verificado. Mediante este, el especialista en Radiofísica Hospitalaria diseña y optimiza el plan de tratamiento más adecuado, con la aprobación del especialista en Oncología Radioterápica, que habrá delimitado antes de manera precisa los volúmenes a tratar y órganos de riesgo, y habrá definido una prescripción y fraccionamiento de la dosis.

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. Ambas se realizan en recintos con requerimientos de blindajes estructurales en su construcción muy superiores a los casos de radiodiagnóstico y medicina nuclear, para poder reducir las dosis en las zonas colindantes del exterior a esa sala a unos niveles suficientemente seguros para trabajadores y público. Además, están dotados de numerosas medidas de seguridad específicas 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.

Se describen a continuación las modalidades principales de radioterapia externa, en función del equipo que genera y emite la radiación hacia el paciente, que define ya inicialmente el tipo de tratamiento disponible y posteriormente algunas tecnologías desarrolladas para optimizar estos tratamientos.

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 (mostrado en la figura 28). La estructura por donde emerge la radiación llamada brazo, que acaba en un cabezal donde se configura la forma del campo de radiación, puede girar alrededor del paciente, que permanece tumbado en una mesa de tratamiento. En algunos equipos esta mesa también puede rotar.



Figura 28. Acelerador lineal de electrones.

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 29).

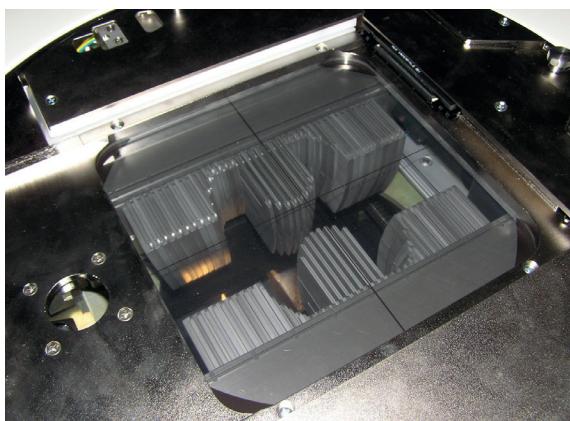


Figura 29. Colimador multiláminas que se sitúa a la salida del cabezal.

• 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. 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 TC diagnóstico), de manera que se distribuye la radiación a la entrada del paciente desde muchas direcciones a la vez que se concentra en el lugar de interés.

• Radioterapia intraoperatoria

Generalmente abreviada por sus siglas como RIO, consiste en la administración de una dosis alta de radiación mediante haces de electrones (producidos por un acelerador como el mostrado en la figura 30) 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 a irradiar (figura 25), permitiendo separar y/o proteger estos órganos y tejidos. Las dosis en sesión única adminis-

tradas con RIO tienen una equivalencia biológica superior a las mismas administradas con radioterapia externa y fraccionamiento convencional.



Figura 30. Aplicador para tratamiento de radioterapia intraoperatoria con electrones, producido por un acelerador lineal móvil.

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

La radiocirugía designa aquellos 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.

La radiocirugía se desarrolló ampliamente sobre localizaciones craneales, donde se puede alcanzar esta elevada precisión y reproducibilidad en el posicionamiento, mediante guías (conocidas también como marcos estereotáxicos, figura 31) 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 convencional más o menos adaptado en su configuración, en especial sus colimadores, un acelerador con un brazo robotizado (lo que se conoce como *cyber-knife*, 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. Este último equipo se conoce con el término inglés *gamma-knife*, su fundamento se esquematiza en la figura 32.



Figura 31. Colocación del marco estereotáxico en cráneo.

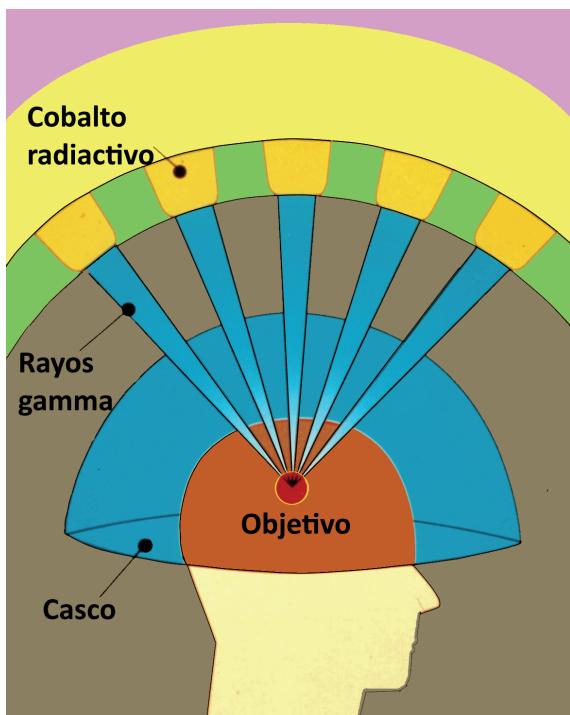


Figura.32. Fuentes radiactivas distribuidas con simetría semiesférica alrededor del cráneo

• Radioterapia estereotáctica corporal

Esta modalidad, conocida también por sus siglas en inglés (SBRT), engloba localizaciones extracraneales; exige también una alta precisión y estabilidad en el posicionamiento del paciente, pues persigue elevar las dosis administradas en cada sesión reduciendo el número total de ellas frente a los tratamientos más convencionales, lo que se conoce como tratamientos hipofraccionados.

Tanto los movimientos del cabezal de la unidad de tratamiento como de la mesa deben mantener esta alta precisión, ya que frecuentemente los haces de radiación que inciden sobre el volumen a irradiar son no coplanares (es decir, no están contenidos en el mismo plano, figura 33), lo cual se consigue combinando giros del cabezal y de la mesa alrededor de un isocentro compartido.

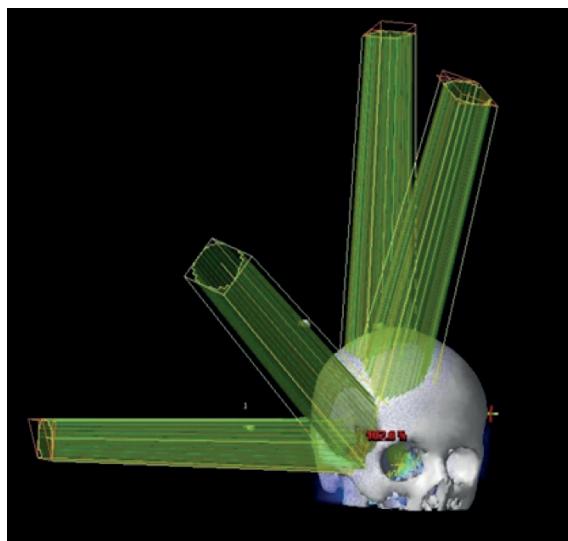


Figura 33. Ejemplo de campos no coplanares, en este caso en una localización craneal.

• Radioterapia externa con haces de protones

Los haces de protones tienen la 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 34).

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.



Figura 34. 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.

Estas instalaciones demandan un mayor 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, y de medir y controlar las dosis recibidas por los profesionales de la instalación.

Optimización en radioterapia externa

La optimización de los tratamientos de radioterapia descansa en toda una cadena de procedimientos y desarrollos aplicados a los mismos, desde la generación de los haces de radiación al posicionamiento del paciente, control del movimiento, verificaciones, etc.

- **Radioterapia con modulación de intensidad y arcoterapia**

El objetivo es la generación de haces de radiación mejor conformados a las formas geométricas irregulares del volumen tumoral, para reducir la dosis impartida al resto de órganos y tejidos circundantes, disminuyendo la toxicidad del tratamiento.

En la radioterapia de intensidad modulada (IMRT por sus siglas en inglés), se emplean un número grande de campos de radiación, a su vez compuestos de muchos segmentos o campos más pequeños superpuestos definidos por las láminas del colimador en movimientos controlados; todo ello permite variar significativamente la in-

tensidad de la radiación, y alcanzar una distribución con gradientes o variaciones de la dosis de radiación depositada muy abruptos.

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).

• 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.

Persiguiendo este objetivo de precisión, en la que las incertidumbres estén reducidas al mínimo y se pueda asegurar que las dosis administradas son las previstas y planificadas, se han desarrollado 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 la zona elegida.

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

Los tratamientos más evolucionados en radioterapia externa consisten en ir haciendo modificaciones en el plan de 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.

La braquiterapia se subdivide en dos modalidades fundamentales: en la primera, o de implantes temporales, la fuente (habitualmente de iridio-192 o cobalto-60) se sitúa por un tiempo determinado dentro del paciente, generalmente alojada en unas guías o aplicadores colocados previamente en él. Transcurrido el tiempo calculado para alcanzar la distribución de dosis deseada, la fuente se retira. Esto puede hacerse en una sola aplicación o repetirse en varias sesiones.

La fuente permanece alojada en un equipo o proyector de fuentes, que la mantiene encerrada dentro de un blindaje, y solo se proyecta para alojarse durante el tiempo previamente deter-

minado a través de unas guías o tubos de transferencia flexibles (ver figura 35).

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 yodo-125 para el tratamiento del cáncer en la 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 35. Proyector de fuentes radiactivas con un tubo de transferencia conectado.

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 geoméricamente adecuada; esta última modalidad permite incluso tratamientos ambulatorios, y es la más extendida en el presente.

Laboratorios de análisis e investigación

Emplean radionucleidos en técnicas analíticas para medir la cantidad y concentración de numerosas sustancias (hormonas, fármacos, etc.) en muestras biológicas obtenidas previamente del paciente, con una elevada sensibilidad, por tanto, permitiendo medir concentraciones muy pequeñas.

Generalmente, las muestras se marcan radiactivamente con yodo-125 y, en otros casos, con hidrógeno-3 (tritio) o cromo-51. Se utilizan actividades muy pequeñas y se cuantifican utilizando un contador de centelleo.

Riesgos de la radiación

Introducción

La presencia de radiaciones ionizantes en el medio ambiente y lugares de trabajo puede producir daños en la salud de las personas. La exposición en exceso a estas radiaciones puede dar lugar a la aparición de ciertos efectos negativos para la salud. Debe tenerse en cuenta que todas las actividades humanas generan ciertos riesgos, si bien muchos de ellos pueden considerarse muy bajos. La sociedad acepta ciertos niveles de riesgo en determinadas actividades con el fin de obtener los beneficios que se generan.

En el lenguaje cotidiano, el término “riesgo” tiene diferentes acepciones. Una de ellas es “la amenaza de un suceso indeseable” que incluye tanto la probabilidad de aparición como el tipo de suceso. En el campo de la protección radiológica, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) utiliza el término “riesgo” como la eventualidad de que se produzca un efecto perjudicial teniendo en cuenta no solo su probabilidad sino también la gravedad del suceso.

Riesgos radiológicos asociados a la práctica médica

Como se ha dicho en el capítulo anterior, en un centro sanitario se utilizan diversos tipos de fuentes de radiación. En un caso, serán radionucleidos, que pueden presentarse como fuentes de radiación encapsuladas o fuentes de radiación

no encapsuladas. En otros casos, se utilizarán equipos generadores de radiaciones ionizantes, como es el caso de los equipos de rayos X para diagnóstico y el de los aceleradores lineales para el tratamiento de enfermedades oncológicas.

Una fuente encapsulada o sellada es aquella en la que el radionucleido está protegido mediante una cápsula lo suficientemente segura como para evitar que este pueda entrar en contacto con el exterior. Solo emergerá de esta fuente la radiación que, emitida por el radionucleido, sea capaz de atravesar la mencionada cápsula. Este tipo de fuentes selladas solamente presentan el riesgo de irradiación en tanto en cuanto la cápsula no pierda la hermeticidad.

Para asegurarse de que esto no ocurre está reglamentado, en función de la actividad de la fuente no encapsulada, la realización periódica de pruebas de hermeticidad que efectivamente descarten la presencia de cualquier material radiactivo en el exterior del encapsulamiento por un eventual deterioro del mismo.

Se habla de fuentes no encapsuladas o abiertas cuando el radionucleido puede fácilmente entrar en contacto con el exterior. La manipulación de este tipo de fuentes implica riesgo de irradiación y de contaminación.

La irradiación es el proceso por el cual determinados equipos generadores o radionucleidos depositan energía en un medio determinado. En

el caso de irradiación externa, la fuente emisora de radiación está a una determinada distancia de la zona irradiada. Este es el fundamento de algunos tipos de tratamiento de tumores en los servicios de oncología radioterápica, y también mediante el cual se hacen radiografías en los servicios de radiodiagnóstico.

En el caso de una irradiación externa, el riesgo asociado va a depender del tipo de radiación que incide en el medio biológico, de la energía de esa radiación y también de la cantidad de radiación que llega en la unidad de tiempo.

La dosis de radiación que un paciente puede recibir como consecuencia de un estudio diagnóstico va a depender de muchos factores, como son: el tipo de estudio, las características del paciente y también el equipamiento utilizado y la técnica concreta que se emplee.

La contaminación se define como la presencia indeseada de radionucleidos en el ser humano (contaminación personal) o en el entorno que nos rodea (contaminación ambiental). En el caso de que la contaminación afecte al ser humano, esta puede ser externa o interna. Se trata de una contaminación externa cuando los radionucleidos se depositan en la piel, y se trata de contaminación interna cuando son incorporados al interior del organismo humano (a través de los alimentos que ingerimos, del aire que respiramos y excepcionalmente a través de heridas).

En el caso de contaminación, las dosis recibidas y por tanto los posibles riesgos derivados de las

mismas, van a depender de varios factores como son: el tipo de emisión o emisiones producidas, la energía asociada a las mismas, la cantidad de radionucleido que ha producido la contaminación, ya sea interna o externa, el tiempo durante el cual emitirá radiación el radionucleido contaminante y, en caso de contaminación interna, la facilidad con la que el organismo humano eliminará el radionucleido. En este caso, también hay que tener en cuenta el órgano crítico, es decir, el órgano que va a recibir una mayor dosis de radiación y, por tanto, en el cual se puede producir un mayor daño.

Para dar cuenta de esta situación, se define una magnitud llamada dosis comprometida. Por ejemplo, la dosis equivalente comprometida es una integral extendida en el tiempo de la función temporal que describe la tasa de dosis en un tejido u órgano, como consecuencia de una incorporación. El tiempo de integración considerado más habitualmente es de 50 años.

Efectos biológicos

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son consecuencia de las modificaciones que a nivel de átomos y moléculas tienen lugar en la materia viva. En la célula, algunas de estas modificaciones pueden tener consecuencias graves a corto y largo plazo. Los efectos más graves se producen al nivel de la molécula de ADN, representada en la figura 36, que puede romperse por una de sus cadenas (“rotura simple”) o por las dos (“rotura doble”). Estas roturas pueden producirse por el efecto directo de las radiaciones sobre la molécula de ADN, o como consecuencia de una reacción secundaria con un radical libre OH^- , muy reactivo, y que se forma por la acción de la radiación sobre las moléculas de agua que circundan la molécula de ADN. El 75 % del daño causado por la radiación se debe a estos radicales libres.

Estas roturas pueden producirse también espontáneamente por causas endógenas ligadas al metabolismo celular. Hoy día se estima que se producen del orden de 3000 roturas por día y célula del tipo “rotura simple” y que el 1 % de ellas se transforman en “roturas dobles”.

Si estas lesiones se reparan perfectamente por los mecanismos enzimáticos de la célula, situación que es la más frecuente en el caso de “rotura simple”, la supervivencia celular será normal. Por el contrario, si no se produce la reparación, la célula morirá. Entre estas dos situaciones extremas, para dosis de irradiación pequeñas se pueden producir situaciones en las que las lesiones no se reparan correctamente, dando lugar a

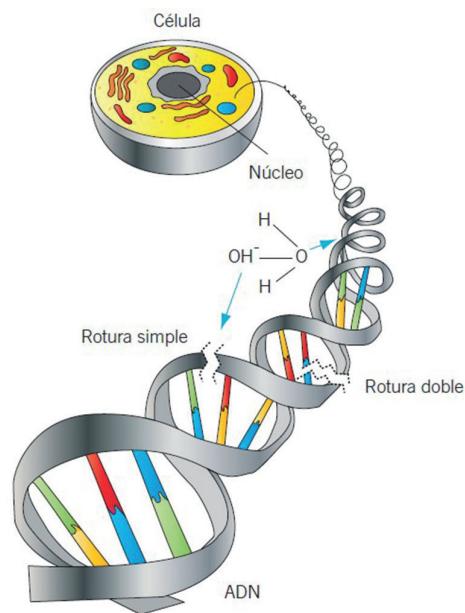


Figura 36. Representación de efectos en la cadena de ADN.

una mutación no mortal. Esta mutación puede ser benigna y sin efecto grave a largo plazo, pero también puede dar lugar a patologías genéticas o cancerosas.

La aparición de estos efectos va a depender, entre otros factores, del tipo de tejido y de la capacidad de reparación del mismo. También van a influir la edad del individuo en el momento de la exposición, su estado de salud y su predisposición genética. Por tanto, no todas las personas expuestas a radiaciones ionizantes tienen la misma respuesta.

Los efectos biológicos asociados a la exposición a radiaciones ionizantes se pueden clasificar, por tanto, en dos categorías:

- Efectos tisulares. Se producen cuando la exposición a radiaciones ionizantes origina la muerte de tal cantidad de células que da lugar a un mal funcionamiento de un tejido u órgano. La aparición de estos efectos se produce solo cuando la dosis supera un cierto valor denominado umbral de dosis. La gravedad del efecto va a depender de la dosis recibida. No todos los tejidos y órganos tienen la misma respuesta frente a las radiaciones ionizantes. Entre los más radiosensibles están los ovarios, testículos, cristalino y médula ósea. Entre estos efectos se encuentran, entre otros, la radiodermatitis, esterilidad y cataratas, algunos de ellos indicados con sus umbrales de aparición en la figura 37.
- Efectos estocásticos o probabilistas. Si se producen transformaciones celulares debido a la exposición a radiaciones ionizantes que no se reparan correctamente, estas pueden dar lugar a la aparición de un cáncer o a enfermedades hereditarias en los descendientes de la persona expuesta. A diferencia de los efectos tisulares, para estos efectos no existe un umbral de dosis. Ahora bien, la probabilidad de que aparezcan sí depende de la dosis. Clínicamente, en general no es posible distinguir los que tienen su origen en una exposición a radiaciones ionizantes de los que se producen por otros agentes.

En cuanto a la exposición prenatal, el tipo de efectos que la radiación origina sobre el embrión y el feto depende del momento en que se produzca la exposición respecto al tiempo de gestación, de acuerdo a las distintas fases de desarrollo de órganos y tejidos [2].

Tejido y efecto	Dosis umbral	
	Exposición única	Exposición prolongada durante años
Testículos		
Esterilidad temporal en el varón	0,15 Gy	0,4 Gy/año
Esterilidad permanente en el varón	3,5-6 Gy	2 Gy/año
Ovarios		
Esterilidad	2,5-6 Gy/año	>0,2 Gy/año
Cristalino		
Opacidades detectables	0,5-2 Gy	>0,1 Gy/año
Cataratas	5 Gy	>0,15 Gy/año

Figura 37. Dosis umbral para algunos efectos tisulares.

El sistema de protección radiológica

Objetivos de la protección radiológica

Poco o nada se puede hacer para evitar el fondo natural, pero la dosis de radiación consecuencia de las actividades humanas sí puede optimizarse y reducirse a valores que supongan un riesgo casi despreciable para la salud. En este sentido actúa una disciplina que se denomina Protección Radiológica y en la que trabajan profesionales tan diversos como radiofísicos, médicos, biólogos, ingenieros, técnicos, etc. colaborando con sus conocimientos para que el desarrollo de las tecnologías que utilizan radiaciones ionizantes sea lo más seguro posible.

La finalidad de la protección radiológica es proteger la salud humana y el medio ambiente a largo plazo contra los riesgos derivados de las actividades humanas que, por las características de los materiales o equipos que utilizan, producen radiaciones ionizantes.

La ICRP, en su publicación nº 60 de 1990, presentó sus recomendaciones para el establecimiento del Sistema de Protección Radiológica; posteriormente, en su publicación n.º 103 de 2007, realiza una puesta al día de estas recomendaciones, manteniendo básicamente el mismo esquema y objetivos para dicho sistema.

Definición del sistema de protección radiológica

El objetivo del sistema de protección radiológica es disponer de una metodología estructurada para la protección contra los efectos adversos de las radiaciones ionizantes.

Para lograr ese objetivo, el sistema pretende evitar la aparición de efectos biológicos tisulares, manteniendo las dosis que reciben las personas por debajo de los valores (umbrales) a los que estos efectos se producen, así como promover la exigencia de que se apliquen todas las medidas razonables para reducir la aparición de los efectos biológicos estocásticos a niveles aceptables.

Como punto de partida para la definición del sistema de protección, la ICRP identifica todas las posibles situaciones de exposición que pueden presentarse, agrupándolas en tres tipos:

- Exposiciones planificadas: son las que se producen como consecuencia de la introducción y operación deliberada de fuentes de radiación para la obtención de algún beneficio neto. Ejemplo de ellas es la creación en un hospital de una instalación radiactiva de radioterapia para el tratamiento del cáncer.
- Exposiciones de emergencia: son las recibidas como consecuencia de la realización de acciones urgentes para evitar consecuencias no deseadas cuando se produce un accidente

en una exposición planificada. Un ejemplo de ellas serían las sufridas por personal de cuerpos de bomberos que tuvieran que intervenir para sofocar un incendio en alguna zona perteneciente a una instalación radiactiva, por ejemplo en una central nuclear.

- Exposiciones existentes: son aquellas que ya se están produciendo cuando se plantea la necesidad de decidir si hay que protegerse contra ellas. Son habitualmente consecuencia de actividades planificadas o accidentes del pasado o de la presencia de radiación de origen natural en cantidades significativas. Un ejemplo de estas últimas es la exposición de la población al radón en lugares cerrados.

La siguiente etapa es la identificación de los individuos que resultan expuestos a las radiaciones en cada una de las situaciones descritas, los cuales se agrupan en tres tipos o categorías de exposición fundamentales:

- Exposición ocupacional: es la que se produce durante el desarrollo del trabajo con fuentes radiactivas artificiales o fuentes naturales incrementadas por la acción humana.
- Exposición médica: es la que se recibe como consecuencia de los procedimientos de diagnóstico o de tratamiento a que pueden ser sometidos los individuos.
- Exposición del público: comprende todas las exposiciones no incluidas en las ocupacionales ni en las médicas y que son consecuencia

de las actividades que dan lugar a las dos anteriores, así como las derivadas de fuentes naturales que produzcan una irradiación significativa. Entre estas últimas, la legislación en cada momento establecerá sobre cuales de ellas se debe ejercer algún control.

A continuación, es necesario emprender dos tipos de acciones, las primeras orientadas a reducir la exposición actuando sobre las fuentes que la originan y las segundas orientadas a reducir las dosis que reciben los individuos expuestos a ellas. Así, en el primer caso se identifican las condiciones de seguridad que deben aplicarse a las diferentes fuentes de radiación, tanto en condiciones normales como en caso de ocurrencia de incidentes o accidentes, y en el segundo se establecen niveles de dosis individuales que es necesario evitar que sean recibidos por las personas.

Finalmente, se identifican las medidas específicas que adoptar para lograr esas condiciones de seguridad y que las dosis recibidas por las personas se mantengan por debajo de los niveles establecidos.

Para la correcta definición del sistema de protección aplicable en cada caso, resulta especialmente importante la formulación y aplicación de los principios básicos de Protección Radiológica que se enuncian a continuación.

Principios básicos de Protección Radiológica y límites de dosis

El Sistema de Protección Radiológica se fundamenta en los principios siguientes:

- Justificación. No debe adoptarse ninguna práctica con radiaciones ionizantes que no conlleve un beneficio neto para el individuo o la especie humana en su conjunto.
- Optimización. Para una fuente dada, las dosis deberán ser lo más bajas que sea razonablemente posible, teniendo en cuenta consideraciones sociales y económicas (principio ALARA).
- Limitación de dosis y riesgo. La dosis total recibida por una persona debido a actividades autorizadas con exposición a radiaciones, sin contar las recibidas como paciente en diagnósticos o tratamientos médicos, no debe

superar los límites de dosis establecidos en la legislación.

Los dos primeros principios están orientados a reducir la incidencia de las fuentes de radiación, el tercero está orientado a la protección de las personas.

Los límites de dosis solo se establecen para las exposiciones de profesionales expuestos y de miembros del público. Son el resultado del consenso científico sobre el conocimiento más actual de los efectos de la radiación, mediante una serie de estudios realizados en individuos y poblaciones expuestas a diferentes dosis de radiación y en sus descendientes. Los valores recomendados por ICRP se han incorporado a la normativa española en el Real Decreto 1029/2022 de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, y se muestran en la figura 38.

Magnitud limitada	Trabajadores expuestos	Miembros del público	Personas en formación 16-18 años (*)
Dosis efectiva	20 mSv/año oficial	1 mSv /año oficial	6 mSv /año oficial
Dosis equivalente en cristalino	100 mSv /5 años oficiales consecutivos no superando 50 mSv /año oficial	15 mSv /año oficial	15 mSv /año oficial
Dosis equivalente en piel y extremidades	500 mSv /año oficial	50 mSv /año oficial	150 mSv /año oficial

(*) Mayores de 18 años, mismos límites que trabajadores expuestos. Menores de 16 años, mismos límites que el público.

Trabajadora expuesta embarazada	
Dosis equivalente al feto	1 mSv, desde comunicación al final del embarazo. No asignación de trabajos con riesgo de incorporación/contaminación radiactiva

Figura 38. Límites de dosis establecidos en el RD 1029/2022.

La protección de pacientes en medicina es objeto de tratamiento específico por la ICRP, ya que en este caso se produce la exposición intencionada de la persona a radiaciones con el objetivo de obtener un eficaz diagnóstico o un adecuado tratamiento médico, de los que se deriva un beneficio evidente para su salud.

La aplicación del principio de justificación para los pacientes exige la demostración de que la utilización de radiaciones en un determinado procedimiento médico produce, con carácter general, un beneficio sobre la salud que compensa los riesgos derivados de la exposición a radiaciones. Además, la aplicación de ese procedimiento a cada paciente concreto debe analizarse para verificar que se mantiene ese balance positivo entre beneficio para la salud y riesgo debido a la exposición, y en casos necesarios debe llegarse al nivel de una justificación individual y no solo genérica de la práctica.

En cuanto al principio de optimización, su aplicación a los pacientes no consiste forzosamente en reducir las dosis que estos reciben, ya que las dosis deben ser las necesarias para asegurarse de que se cumplen los objetivos previstos para la prueba diagnóstica o el tratamiento prescritos por los responsables de la atención médica de la persona.

En el caso de las pruebas diagnósticas, la ICRP recomienda la utilización de niveles de referencia que son valores de dosis obtenidos de la experiencia y que sirven para identificar situaciones en las que los pacientes reciben dosis de radia-

ción inusualmente elevadas o inusualmente bajas. En el caso de los tratamientos médicos, las recomendaciones pretenden conseguir la dosis prevista en la zona del organismo a tratar, reduciendo al mínimo la dosis recibida por tejidos sanos, todo ello mediante un análisis individualizado para cada paciente.

Situaciones especiales: mujeres embarazadas o en periodo de lactancia

Es poco probable que la exposición del feto o embrión en el embarazo durante las exploracio-



Consulte con su médico antes de someterse a una exploración de rayos x

Figura 39. Cartel de advertencia.

nes radiodiagnósticas y de medicina nuclear produzca efectos tisulares o estocásticos en el niño ya nacido. No obstante, la ICRP recomienda que se eviten aquellos procedimientos diagnósticos o terapéuticos que supongan la exposición del abdomen de mujeres embarazadas o con riesgo de estarlo, salvo que existan indicaciones clínicas justificadas (se muestra en la figura 39 un cartel típico de advertencia a pacientes); asimismo recomienda que se eviten en lo posible situaciones que puedan dar lugar a que las mujeres en periodo de lactancia incorporen sustancias radiactivas al organismo que puedan posteriormente transferir al lactante.

En cuanto al tratamiento de exposiciones ocupacionales, se acepta que la dosis que puede recibir el feto como consecuencia de la actividad laboral de la madre, desde el momento en que se toma conciencia del embarazo hasta el final de la gestación, es de 1 mSv. Este es el límite de dosis que puede recibir el público y por tanto ha sido establecido para el feto atendiendo a consideraciones éticas, ya que él no participa en la decisión y no recibe beneficio alguno de ella.

La aplicación de este límite en la práctica se corresponde con una dosis recibida en la superficie del abdomen (tronco inferior) de la mujer de 2 mSv hasta el final de la gestación. Ese límite de dosis es muy inferior a las dosis que se requieren para la aparición de efectos tisulares en el feto, ya que, el aborto, las malformaciones congénitas, la disminución del cociente intelectual o el retraso mental severo, requieren dosis muchísimo mayores.

Con el fin de proteger adecuadamente al feto, es imprescindible que la trabajadora expuesta gestante, en cuanto tenga conocimiento de su embarazo, lo comunique al responsable de la protección radiológica del centro en el que trabaja y al responsable de la instalación, quienes establecerán las medidas de protección oportunas para garantizar que el desempeño de su trabajo no suponga un riesgo añadido para su hijo, en coordinación con el Servicio de Prevención de Riesgos Laborales.

A las trabajadoras expuestas embarazadas se les puede asignar un dosímetro especial para determinar la dosis equivalente en abdomen. A partir de esos datos se estima la dosis recibida por el feto. Asimismo, se tiene que llevar a cabo una evaluación cuidadosa de su puesto de trabajo, de modo que las probabilidades de incidentes en los que reciba dosis altas o pueda incorporar cantidades apreciables de sustancias radiactivas al interior del organismo sean insignificantes.

Organismos internacionales relacionados con la protección radiológica

El principal organismo internacional relacionado con la protección radiológica es la **Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)**, creada en 1928 y 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.

El **Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR)**, del que España es miembro de pleno derecho desde comienzos de 2012, 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 de manera esencial al trabajo de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

La **Organización Internacional de la 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 y con la Agencia de la Energía Nuclear de la OCDE (NEA-OCDE); se publican como Normas Básicas de Seguridad para la protección contra las radiaciones ionizantes y la seguridad de las fuentes de radiación.

La **Unión Europea (UE)**, en el tratado Euratom, establece la normativa sobre protección radiológica en directivas, la última de las cuales es la Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.

Está basada en las Normas Básicas de Seguridad publicadas por la OIEA, que a su vez lo están en las recomendaciones de ICRP. El contenido de las directivas Euratom es de cumplimiento obligado para los Estados miembros de la UE, quienes posteriormente realizan la trasposición de la misma a sus respectivas legislaciones.

En el caso de España, partes importantes de esta trasposición se recogen, a la fecha de publicación de este documento, en el Real Decreto 601/2019, de 18 de octubre, sobre justificación y optimización del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas, o en el Real Decreto 1029/2022 de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.

Esta interrelación entre los organismos citados, junto con los organismos competentes en España, se esquematiza en la figura 40.

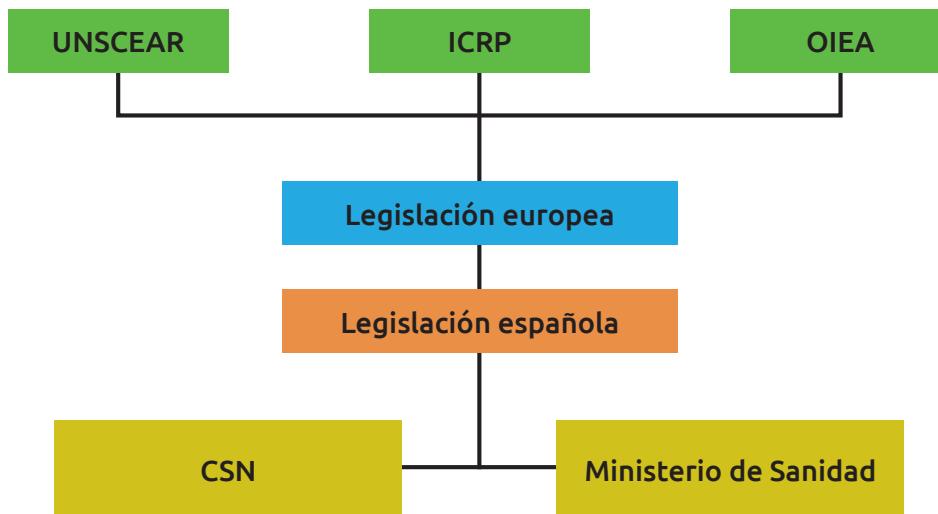


Figura 40. Organismos relacionados con la protección radiológica.

Aplicación del sistema de protección radiológica

Trabajadores y trabajadoras con exposición a radiaciones

Son las personas que, por razones de su actividad laboral, están sometidas a un riesgo de exposición a las radiaciones en el que pueden recibir dosis efectivas anuales superiores a 1 mSv (límite de dosis del público). La protección radiológica de profesionales expuestos se lleva a cabo mediante la adopción de un programa de medidas operacionales basado en los siguientes principios generales:

- Evaluación previa de las condiciones de trabajo. Determinación de la exposición y aplicación del principio de optimización.
- Clasificación de los lugares de trabajo en función de la exposición presente en ellos.
- Clasificación de los trabajadores en función de las dosis que podrían recibir.
- Aplicación de medidas acordes con la clasificación de cada zona de trabajo y con la clasificación de los profesionales que desempeñan tareas en ellas.

Las medidas a aplicar tendrán fundamentalmente dos objetivos: prevenir la exposición y evaluar y vigilar las dosis recibidas.

Entre las medidas de prevención están:

- Identificación de zonas de trabajo con exposición a radiación.
- Clasificación de las zonas. La clasificación de las zonas de trabajo en función de las dosis anuales previstas y el riesgo de una contaminación o exposición potencial son las siguientes:
 - Zona vigilada. Es aquella zona en la que, no siendo zona controlada, exista la posibilidad de recibir dosis efectivas superiores a 1 mSv por año oficial.
 - Zona controlada. Es aquella zona en la que, o bien exista la posibilidad de recibir dosis efectivas superiores a 6 mSv por año oficial, o bien sea necesario seguir procedimientos de trabajo con objeto de restringir la exposición a la radiación ionizante, evitar la dispersión significativa de contaminación radiactiva o prevenir o limitar la probabilidad y magnitud de accidentes radiológicos o sus consecuencias. Dentro de ellas se distinguen:
 - » Zonas de permanencia limitada. Son aquellas en las que existe el riesgo de recibir una dosis superior a los límites de dosis.
 - » Zonas de permanencia reglamentada. Son aquellas en las que existe el riesgo de recibir en cortos períodos de tiempo una dosis superior a los límites de dosis, y que requieren prescripciones especiales desde el punto de vista de la optimización.
 - » Zonas de acceso prohibido. Son aquellas en las que existe el riesgo de recibir, en una exposición en muy corto periodo de tiempo, dosis superiores a los límites de dosis.

- Delimitación y señalización de zonas (ver figura 41). Las zonas en las que se trabaja con exposición a radiaciones se señalizan con el símbolo internacional de radiactividad: trébol con puntas radiales (riesgo de irradiación externa) o con puntas radiales y campo punteado (riesgo de irradiación externa y contaminación) y tienen los siguientes colores:
 - Zona vigilada: gris azulado.
 - Zona controlada: verde.
 - Zona controlada de permanencia limitada: amarillo.
 - Zona controlada de permanencia reglamentada: naranja.
 - Zona controlada de acceso prohibido: rojo.
- Control de accesos. Solo se permite el acceso a cada zona a personal autorizado.
- Clasificación de trabajadores. Los profesionales expuestos, en función de las condiciones de trabajo, pueden ser:
 - De categoría A. Aquellos que, por las condiciones en las que se realiza su trabajo, puedan recibir una dosis efectiva superior a 6 mSv por año oficial o una dosis equivalente superior a 15 mSv por año oficial al cristalino o superior a 150 mSv para la piel y las extremidades.
 - De categoría B. Aquellos que no sean clasificados como de la categoría A.



Figura 41. Señalización distintiva de las distintas zonas de una instalación.

- Formación e información de profesionales. Antes de incorporarse a un puesto de trabajo con exposición a radiaciones, cada profesional tiene que ser informado sobre los riesgos existentes y sobre las normas, procedimientos y precauciones de protección que debe adoptar en cada puesto de trabajo a que pueda asignarsele.

El titular de la práctica o de la empresa externa está obligado a facilitar formación y entrenamiento sobre protección radiológica antes de empezar a trabajar y periódicamente. La legislación española exige a cada profesional de las instalaciones radiactivas, que posea una licencia (de operador o supervisor según sus responsabilidades), otorgada por el CSN, que garantice su formación en protección radiológica. En el caso de las instalaciones médicas de diagnóstico mediante rayos X, los profesionales deben poseer una acreditación para operar o dirigir la instalación.

- Comprobación de las disposiciones de protección. El proyecto de las instalaciones en las que se produce exposición a radiaciones tiene que ser sometido a una evaluación por parte del regulador, CSN, para comprobar que se han tenido en cuenta las necesidades de protección radiológica adecuada. Cada nueva fuente o equipo radiactivo debe someterse a un proceso de autorización que garantice que esa evaluación se ha realizado correctamente. Los dispositivos y técnicas de protección disponibles deben además revisarse periódicamente para comprobar que funcionan correctamente y mantienen su eficacia.
- Los instrumentos utilizados para la detección y medida de la radiación tienen que ser sometidos a un programa de calibración y verificación interno en la instalación, cumpliendo periodicidades establecidas, que sea aceptado por el CSN.

Entre las medidas para la vigilancia y evaluación de las dosis recibidas por el colectivo de profesionales expuestos están:

- Vigilancia del ambiente de trabajo. Las dosis por unidad de tiempo que se pueden recibir por irradiación externa y la contaminación existente en los distintos puestos de trabajos tiene que medirse periódicamente, deben anotarse y ser evaluadas por los especialistas a cargo de la protección radiológica para asegurarse de que se mantienen en los valores previstos.
- Vigilancia dosimétrica. Las dosis recibidas por los trabajadores expuestos se determinan por dosimetría externa (cuando existe riesgo de irradiación) o dosimetría interna (cuando existe riesgo de contaminación), mediante medidas o análisis pertinentes.

Para profesionales de categoría A tiene que realizarse una vigilancia dosimétrica individual. Habitualmente se lleva a cabo utilizando dosímetros personales basados en el fenómeno de la termoluminiscencia (TLD) que deben ser leídos todos los meses para determinar la dosis superficial, la dosis profunda y, cuando proceda, las dosis en regiones localizadas que estén especialmente irradiadas. La dosimetría interna, en función de las sustancias radiactivas que pueden incorporarse al organismo, se realiza mediante equipos contadores de radiactividad corporal o mediante la realización de análisis de laboratorio de muestras de orina o heces. La periodicidad para las determi-

naciones de dosimetría interna se establece por los responsables de protección radiológica en cada caso.

La dosimetría individual, tanto externa como interna, se efectúa por servicios de dosimetría personal expresamente autorizados por el CSN.

En el caso de los trabajadores de categoría B, las dosis individuales se podrán estimar a partir de los resultados de la vigilancia radiológica realizada en los lugares de trabajo.

Los resultados de la vigilancia dosimétrica de cada trabajador deben anotarse en un historial dosimétrico individual que debe conservarse a largo plazo.

- Vigilancia de la salud. Toda persona que vaya a ser clasificada por su exposición como profesional de categoría A, deberá ser sometida a un examen de salud previo que permita comprobar su aptitud para realizar las funciones que se le asignen. Se someterán además a exámenes de salud periódicos (al menos con carácter anual) que permitan comprobar que siguen manteniendo la aptitud para ejercer sus funciones. El examen será realizado por un servicio médico de prevención de riesgos laborales.

Como resultado de esos reconocimientos médicos se determinará si la persona puede o no trabajar en presencia de radiaciones o si debe hacerlo en condiciones especiales. Los resulta-

dos de la vigilancia sanitaria se tienen que recoger en un historial clínico-laboral individual que debe conservarse un largo periodo de tiempo.

Miembros del público

Este colectivo está formado por toda persona que no es considerada trabajador profesionalmente expuesto.

La protección de los miembros del público se basará fundamentalmente en la estimación, anotación y evaluación de las dosis que pudieran recibir en régimen de funcionamiento normal de las instalaciones radiactivas y en caso de accidente. El responsable de llevar a cabo esas actividades en cada caso es el titular de la instalación.

Puesto que la población puede estar expuesta a radiaciones procedentes de diversas instalaciones, es necesario asegurarse de que la contribución de cada una de ellas resulte lo más reducida posible. Para ello se establecen valores máximos de las dosis (llamados restricciones de dosis) que se pueden recibir debidas a cada una de ellas, generalmente muy por debajo de los límites.

Las exposiciones de los miembros del público pueden producirse debido a que estos se sitúen en las inmediaciones de las instalaciones, debido a los efluentes vertidos por ellas o debido a los residuos evacuados desde las mismas.

Las instalaciones deberán tener unos blindajes y sistemas de contención que aseguren que las

dosis recibidas por el público, debidas a la exposición externa o interna, no superen el límite reglamentado y estén debidamente optimizadas (por ejemplo, con la aplicación de las restricciones de dosis citadas en el diseño). Estas instalaciones, aparte de estar señalizadas, deberán tener dispositivos luminosos o acústicos que avisen cuando estén en funcionamiento.

Los efluentes radiactivos emitidos por las instalaciones están sometidos a una autorización expresa y deben mantenerse por debajo de límites muy bajos establecidos para cada caso específico. Los estudios y estimaciones que deben realizar los responsables de cada instalación deben considerar las cantidades vertidas al medio ambiente y la capacidad de este para recibirlos. Tienen que utilizarse métodos de estimación realistas, repetirse periódicamente y tener capacidad para determinar las dosis, debidas tanto a irradiación externa como a contaminación interna, a través de todos los posibles caminos por los que la radiación procedente de las instalaciones pueda afectar a los miembros del público, seleccionando para el estudio el grupo de población más representativo de las personas que podrían recibir mayores dosis.

En caso necesario, las instalaciones deberán disponer de sistemas específicamente diseñados y contruidos para almacenar, tratar y evacuar los efluentes y residuos radiactivos. Estos sistemas deberán someterse a revisiones periódicas para comprobar que mantienen su eficacia y evitar que se produzcan descargas incontroladas al medio ambiente.

El CSN, aparte de vigilar estas instalaciones, vigila también el medio ambiente mediante un sistema de redes para la medición continua de la radiactividad ambiental en toda España.

El trámite de evaluación y autorización de cualquier instalación radiactiva que ya se comentó en un apartado anterior, también incluye los requisitos técnicos, de procedimientos, etc., que aseguren la protección radiológica de los miembros del público.

Pacientes

Los pacientes merecen consideración especial, ya que las exposiciones médicas suponen un gran beneficio diagnóstico o terapéutico frente al posible daño que puedan causar. Por ello, estas exposiciones deben estar siempre “justificadas”, la exposición que no pueda justificarse deberá prohibirse, y deben realizarse siempre bajo la supervisión y la responsabilidad de un profesional sanitario habilitado.

Los procedimientos diagnósticos deben optimizarse a fin de obtener una imagen diagnóstica adecuada con la menor dosis posible y en el caso de los tratamientos terapéuticos se deberá administrar la dosis prescrita en el órgano a tratar, procurando irradiar lo menos posible a los órganos sanos.

Para la adecuada protección de los pacientes es fundamental que, tanto los especialistas médicos como todo el personal técnico y asistencial

que interviene en los procedimientos con radiaciones, disponga de formación específica en materia de protección radiológica.

Hay todo un cuerpo legislativo que regula las exposiciones médicas, es decir, las recibidas como paciente a consecuencia de procedimientos médicos que implican exposición a radiaciones ionizantes, separado de todas las obligaciones y regulaciones de protección radiológica sobre profesionales expuestos y público que se han descrito hasta ahora.

Estas normas y obligaciones específicas para las instalaciones de diagnóstico o terapia con radiaciones ionizantes, obligan entre otras cosas al establecimiento de Programas de Garantía de Calidad y Seguridad que engloban todo el procedimiento, y están recogidas en reales decretos separados para cada uno de los tres ámbitos de aplicación: radioterapia, medicina nuclear y radiodiagnóstico [3, 4, 5].

En los procedimientos con radiaciones ionizantes aplicados en medicina, deben estar implicados los especialistas en radiofísica hospitalaria, profesionales que han adquirido la cualificación para velar por la seguridad radiológica y la optimización en estas prácticas, a través de una formación sanitaria especializada.

Reúnen estas competencias en protección radiológica enfocada a los pacientes, siendo responsables de la caracterización de los haces de radiación, la planificación y la eficaz administración de los tratamientos, el cálculo de las dosis

impartidas a los pacientes en pruebas diagnósticas y el control de la calidad de las imágenes, así como la verificación y control del estado del equipamiento emisor y detector de radiaciones ionizantes.

Una parte importante de la optimización de las prácticas se consigue mediante el uso de niveles de referencia, relativos a las dosis recibidas por los pacientes en aplicaciones diagnósticas. Se presenta el ejemplo de estos niveles en la figura 42.

Valores de referencia en radiografía para adultos

Exploración	Dosis superficie a la entrada (DSE) en mGy
Abdomen AP	10,0
Columna lumbar AP/PA	10,0
Columna lumbar L	30,0
Columna lumbo-sacra L	40,0
Cráneo AP	5,0
Cráneo L	3,0
Cráneo PA	5,0
Mamografía	10,0
Pelvis AP	10,0
Tórax L	1,5
Tórax PA	0,3
Dental	7,0

Figura 42. Valores de referencia incluidos en el Real Decreto 1976/1999.

En el caso de pacientes pediátricos, por tener una mayor sensibilidad a la radiación, debe prestarse aún mayor atención al cumplimiento de los principios de justificación y optimización de la exploración. De la misma manera ha de hacerse con las mujeres embarazadas para la protección del feto, y las mujeres lactantes en caso de procedimientos de medicina nuclear para la protección del bebé.

Supervisión de la aplicación del sistema

La legislación española prevé que, en el caso de múltiples instalaciones o instalaciones singulares complejas, el titular disponga de una organización específica para asesorarle en materia de protección radiológica y a la que encomendar las funciones, no la responsabilidad, que le son exigibles en esta materia. Estas organizaciones son los servicios y unidades técnicas de protección radiológica y deben ser expresamente autorizados por el CSN.

En el caso de las instalaciones de rayos X para diagnóstico médico, esas organizaciones son las encargadas de verificar y certificar que el diseño y construcción de las instalaciones es adecuado desde el punto de vista de seguridad y protección radiológica. Durante el funcionamiento de esas instalaciones, también verifican que se mantienen las condiciones de seguridad y que aplican las medidas necesarias para la protección radiológica de los pacientes, los trabajadores y el público.

Los servicios de protección radiológica se constituyen dentro de la organización de los titulares de las instalaciones. Las unidades técnicas de protección radiológica son empresas privadas que trabajan para las instalaciones mediante contrato.

Al frente de estas organizaciones tiene que haber profesionales con un diploma otorgado por el CSN, el cual constituye la titulación de mayor categoría en nuestro país en materia de protección radiológica. Cuando estos profesionales actúan en el ámbito de las instalaciones médicas, la legislación exige que sean además especialistas en radiofísica hospitalaria. El resto de los técnicos que trabajan en los servicios y unidades de protección radiológica también tiene que disponer de formación y experiencia específicas en protección radiológica.

Los servicios y unidades de protección radiológica actúan como entidades muy especializadas que velan por la correcta aplicación del sistema de protección radiológica en las instalaciones a las que atienden.

En España existen servicios de protección radiológica autorizados en la práctica totalidad de los grandes hospitales de la red de sanidad pública y privada. En el caso de los hospitales públicos, dan también servicio a las instalaciones que utilizan radiaciones en otros establecimientos sanitarios como pequeños hospitales o centros de salud de su zona.

Las funciones más importantes de los servicios y unidades de protección radiológica son:

- Planificación de nuevas instalaciones y autorización de puesta en servicio de fuentes de radiación nuevas. Evaluación de riesgos previa. Participación en las fases de diseño, montaje, instalación, operación, modificaciones y clausura de las instalaciones radiactivas y radiológicas.
- Efectuar la estimación de los riesgos radiológicos asociados a las instalaciones y a los puestos de trabajo: clasificación radiológica de las zonas de trabajo y clasificación de profesionales expuestos.
- Vigilancia dosimétrica de profesionales expuestos.
- Asignación de dosis a los trabajadores expuestos a partir de los datos dosimétricos aportados por el Servicio de Dosimetría Personal autorizado.
- Actualización y mantenimiento de los historiales dosimétricos de los trabajadores expuestos.
- Vigilancia radiológica de los lugares de trabajo.
- Determinación de características de la instrumentación para la vigilancia de la radiación; comprobaciones, calibraciones y garantía de calidad asociada.
- Gestión de efluentes y de residuos radiactivos y residuos NORM.
- Vigilancia radiológica ambiental y control de dosis al público.
- Elaboración y aplicación de procedimientos de trabajo para el control de la recepción, manejo, transporte y almacenamiento de material radiactivo.
- Supervisión de la adquisición de material y equipos radiactivos y radiológicos.
- Establecimiento de las normas de acceso, permanencia y trabajo en zonas con riesgo radiológico.
- Establecimiento de medidas de prevención de accidentes e incidentes.
- Preparación e intervención en situaciones de exposición de emergencia.
- Desarrollo de programas de formación continuada en protección radiológica y perfeccionamiento de profesionales expuestos.
- Investigación y análisis de accidentes e incidentes y medidas correctoras.
- Evaluación de los riesgos y definición de las condiciones de trabajo de las trabajadoras embarazadas y en periodo de lactancia.
- Elaboración del Manual de Protección Radiológica y de los procedimientos asociados sometidos a garantía de calidad.
- Mantenimiento de registros y archivo.
- Preparación de la documentación necesaria en materia de protección radiológica.
- Ejecución de programas de verificación y calibración de los sistemas de detección y medida de las radiaciones.
- Comprobación de que se lleva a cabo la vigilancia sanitaria de los trabajadores expuestos, en colaboración con el Servicio de Prevención de Riesgos Laborales.
- Participación en la optimización de los procedimientos y aplicación de restricciones de dosis.
- Desarrollo de programas y medidas de control de calidad del equipamiento radiológico, de medicina nuclear y de radioterapia.

Control de las autoridades

En España, el organismo competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica es el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), ente de Derecho Público independiente de la Administración Central del Estado.

Desde su creación en 1980, el CSN ha asumido 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 en las comunidades autónomas. Debe informar anualmente al Congreso, 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:

- Vigila y controla los niveles de radiación medioambiental en el territorio nacional.
- Examina y concede licencias a las personas que trabajan en las instalaciones radiactivas y acredita a las personas que trabajan en las instalaciones de radiología médica.
- 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.

- Controla las dosis de radiación que pueden recibir 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.

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.

Entre las funciones del CSN, figura la de colaborar con las autoridades sanitarias en todo lo relacionado con la protección radiológica de los pacientes.

Medidas de protección radiológica

Radiodiagnóstico

Para evitar la irradiación innecesaria de profesionales expuestos y miembros del público, las salas radiológicas están debidamente diseñadas, adecuadamente blindadas y convenientemente señalizadas. Las normas deben ir encaminadas a minimizar el riesgo de irradiación externa. En las salas de radiodiagnóstico se deberá:

- Cerrar las puertas de las salas durante el funcionamiento del equipo.
- Al manejar los equipos, cada profesional estará siempre que sea posible protegido por blindajes estructurales (paredes y cristales plomados).
- Siempre que por las características propias de la exploración se haga necesaria la inmovilización del paciente, esta se realizará mediante la utilización de sujeciones mecánicas apropiadas. Si esto no fuera posible, la inmovilización será realizada por una o varias personas que ayuden voluntariamente. En ningún caso se encontrarán entre ellos menores de dieciocho años ni mujeres gestantes. Si no se dispone de personal voluntario, la inmovilización se llevará a cabo por profesionales expuestos, estableciendo turnos rotatorios.
- En el caso de profesionales que deban permanecer en el interior de la sala, se protegerán con prendas adecuadas tales como delantales y protectores plomados, gafas plomadas y guantes, siempre que con ellos no se comprometa la finalidad perseguida por la explo-

ración. En general actuarán de forma que se reduzca al mínimo posible su exposición a radiaciones.

- Con esos mismos objetivos, dentro de las salas se utilizarán blindajes fijos o móviles como mamparas plomadas colgantes o faldones adosados a la mesa de pacientes.

Para la protección de pacientes se deberá:

- Elegir los parámetros en el equipo de rayos X adecuados a las características de cada paciente para obtener la calidad necesaria de las imágenes para su utilización en el diagnóstico.
- Reducir el tamaño de la zona del organismo que se irradia, limitándola mediante los dispositivos de colimación, siempre que sea posible, al área que interesa explorar y utilizando la técnica correcta.
- En relación al punto anterior, la recomendación actual, con carácter general, es no emplear protectores plomados adicionales para pacientes, como los gonadales, ya que producen más inconvenientes que beneficios [6].
- Elegir el sistema de imagen adecuado, de forma que se obtenga la mejor calidad con el mínimo de exposición a radiaciones para cada paciente.
- Preguntar a las pacientes en edad de procrear sobre la posibilidad de que estén embarazadas.

Radioterapia

Las fuentes y los equipos generadores de radiación utilizados en radioterapia producen radiaciones de gran intensidad, como consecuencia de las cuales, en caso de incidentes, se pueden recibir dosis absorbidas significativas. Esto implica que haya que tomar medidas especiales de protección radiológica a la hora de trabajar con ellas.

Las salas de tratamiento donde están situadas estas fuentes y equipos se diseñan con blindajes adecuados, generalmente constituidos por muros de hormigón de espesores superiores a 1 metro, o en determinados puntos cantidades importantes de plomo, acero, etc.

Se debe poner especial cuidado en evitar cualquier irradiación no deseada o accidental, y para ello es necesario asegurar que ninguna persona permanecerá en el interior de la sala durante el tratamiento o cualquier irradiación. Para ello es preciso disponer de procedimientos de trabajo en condiciones normales (los cuales se integran en el Reglamento de Funcionamiento) bien diseñados y conocidos por todas las personas implicadas en la instalación, que incluyan los trabajos de mantenimiento o reparación de averías.

También deben quedar definidos desde el inicio de la actividad de una instalación aquellos procedimientos que se aplicarán en caso de una emergencia, como es el caso de la presencia inadvertida de personas en el interior de la sala del acelerador durante la irradiación. Estos procedi-

mientos se integrarán en el Plan de Emergencia interior de la instalación.

- Es de crucial importancia el conocimiento por todo el personal que puede tener participación en la actividad de la instalación, del funcionamiento y la ubicación en el puesto de operador y dentro de la sala, de todos los pulsadores de emergencia que detienen los movimientos o la irradiación en el acelerador en caso de emergencia (o que retraen la fuente radiactiva a su posición de seguridad en el caso de proyectores de fuentes).
- Los técnicos operadores deben prestar especial atención durante cualquier irradiación a la posición y estado normal del paciente y a la ausencia de otras personas en el interior de la sala, a través de los monitores que muestran en su puesto de control continuamente las imágenes tomadas por cámaras situadas en el interior de la sala.
- Existen además mecanismos de seguridad que reducen la posibilidad de estos incidentes, como el interruptor de última persona, que debe pulsarse desde un punto del interior de la sala con visión completa de ella, previo a cualquier irradiación.
- También existen mecanismos de seguridad en las puertas de acceso a las salas de tratamiento, de aceleradores o proyectores de fuentes, que detienen la radiación si se abren inadvertidamente e impiden el inicio de la misma si no están completamente cerradas.
- Existen señalizaciones y alarmas luminosas y acústicas que indican el funcionamiento de la instalación y la situación de irradiación.

En braquiterapia, además de las anteriores consideraciones, se debe ejercer un control cuidadoso sobre las fuentes radiactivas.

- Todas las fuentes que no estén en uso, deben estar almacenadas en contenedores blindados adecuados, en la gammateca de la instalación, identificadas y registradas.
- Las normas de preparación de las fuentes, así como de manipulación, traslado, implantación y retirada, estarán reflejadas en el Reglamento de Funcionamiento de la instalación.
- Se deberán tener procedimientos adecuados, por ejemplo en caso de pérdida de control sobre alguna fuente, o error en los mecanismos que retraen la fuente a su posición de seguridad en los tratamientos de braquiterapia de alta tasa.

Los blindajes de las salas deben comprobarse periódicamente en condiciones de funcionamiento reales para verificar que mantienen su efectividad, realizándose regularmente medidas de niveles de radiación en los espacios contiguos para comprobar que las dosis de radiación se mantienen en los valores previstos en el diseño.

En cualquier manipulación de fuentes radiactivas (cada vez menos frecuentes), se optimizará la radiación recibida aplicando las medidas de protección basadas en la distancia, tiempo y blindaje.

Es muy importante que al terminar la realización del tratamiento, colocación de fuentes implantadas o cualquier manipulación, se realicen mediciones con detectores de radiación adecuados de las salas y materiales utilizados para verificar

que no se ha perdido ninguna fuente, ya que este suceso podría dar lugar a elevadas dosis tanto a profesionales como a público.

Desde el punto de vista de protección de pacientes, en radioterapia resulta muy importante:

- Efectuar una planificación muy precisa y detallada de la estrategia de irradiación más adecuada para alcanzar las dosis prescritas en el volumen objetivo o volumen blanco, optimizando la protección de los órganos y tejidos próximos a la zona que se desea tratar, con el objetivo de que las dosis que reciban sean tan bajas como sea posible.
- Se emplearán todos los dispositivos disponibles, como sistemas auxiliares de imagen y posicionamiento o seguimiento del paciente, y todas las comprobaciones necesarias para controlar la ejecución correcta del tratamiento previamente diseñado.
- Tiene que prestarse gran atención a caracterizar con la mayor precisión los haces de radiación y fuentes radiactivas que se emplean, para determinar con exactitud las dosis absorbidas por el tumor y por los órganos de riesgo. Igualmente se aplica el mayor rigor en las revisiones y comprobaciones periódicas del funcionamiento de los equipos, dejando constancia y comunicando a la empresa encargada de la asistencia técnica cualquier anomalía que se detecte.
- Asimismo, durante el desarrollo de los tratamientos, cualquier indicación, alarma o anomalía debe ser cuidadosamente evaluada, suspendiendo la emisión de radiación ante cualquier sospecha de mal funcionamiento.

Medicina nuclear y laboratorios de análisis clínico o investigación

En Medicina Nuclear, tanto diagnóstica como terapéutica, y en los laboratorios de inmunoenálisis o investigación, los radionucleidos utilizados lo son en forma no encapsulada, por lo que existe no solo riesgo de irradiación, sino también de contaminación radiactiva (externa e interna) para el personal que los manipule.

También las superficies, objetos y equipos son susceptibles de sufrir contaminación, que debe ser evitada, pues a la postre podría suponer contaminación e irradiación del personal.

Por ello, los procedimientos de trabajo, desde el punto de vista de la presencia de radiación en el ámbito laboral, deberán tener en cuenta el control de los dos tipos de riesgos.

De forma general, para reducir la contaminación se aplicarán las siguientes normas:

- Está prohibido fumar, comer, beber, en las zonas clasificadas de la instalación.
- Se llevará ropa que no deje desprotegidas grandes zonas del cuerpo. Se recomienda usar zapatos cerrados o zuecos y llevar recogido el pelo.
- Para la manipulación de las fuentes se usarán guantes de goma o plástico, de un solo uso, que posteriormente se tratarán como residuo sólido. Se llevará dosímetro de muñeca y anillo cuando se manipulen las fuentes (bajo los guantes). En principio y salvo situaciones excepcionales, se manipulará el material radiactivo en la cabina de preparación que corresponda.
- Se evitará tocar con los guantes puestos elementos ajenos a las manipulaciones de radionucleidos, como teléfonos, grifos... El personal se lavará las manos después de la manipulación de material radiactivo y siempre que salga de la instalación.
- Se utilizarán equipos de protección individual (bata y calzas desechables, guantes de látex, gafas de plástico, etc.).
- Se utilizarán preferiblemente gafas en lugar de lentes de contacto con vistas a reducir riesgo por contaminación en ojos.
- Se intentará reducir al mínimo el tiempo de manipulación de fuentes, y aumentar al máximo la distancia a ellas. El transporte de actividad y la inyección se realizará con el vial blindado correspondiente o contenedores adecuados. La manipulación se realizará cubriéndose con la mampara plomada o delantal plomado y gafas plomadas, o bajo protección de la cabina correspondiente.
- Se evitarán pinchazos y heridas (en particular no usar recipientes de bordes cortantes, ni introducir las agujas de las jeringas, una vez usadas, en su capuchón protector antes de ser tiradas al cubo de residuos sólidos). Si el manipulador tuviera una herida abierta por debajo de la muñeca, no trabajará con material radiactivo.
- Siempre se colocará papel secante desechable sobre la superficie de trabajo. Si se manipula un radionucleido líquido sobre una bandeja, el volumen de esta será mayor que el de los frascos que contenga, y siempre se colocará en la bandeja papel secante.

- La orina y heces de los pacientes pueden ser fuentes de contaminación, por lo que se analizará la necesidad de gestionarlas como residuos radiactivos.
- Se tomarán medidas para el control del material radiactivo en relación a la adquisición, almacenamiento, traslado y posterior gestión de residuos.
- Se realizarán periódicamente medidas de contaminación utilizando métodos adecuados y procediendo a eliminar cualquier contaminación que se encuentre.
- La persona responsable de protección radiológica establecerá unas normas específicas para pacientes sometidos a tratamientos con material radiactivo, considerando que los mismos son una fuente de irradiación externa y contaminación radiactiva.

En general, en Medicina Nuclear y en laboratorios, y para reducir el riesgo por irradiación, se suele utilizar como material para blindaje:

- Para radionucleidos emisores beta: materiales plásticos, metacrilato, PVC o similares.
- Para radionucleidos emisores gamma: elementos de alta densidad, generalmente plomo o vidrio plomado.

En los laboratorios, adicionalmente:

- Se utilizarán siempre pipetas automáticas con puntas desechables.
- Se restringirán los trabajos con material radiactivo a la zona radiológica autorizada del laboratorio.

- El material radiactivo volátil se manipulará siempre en vitrinas de extracción de gases equipadas con los filtros adecuados, para poder evitar de esta manera su posible dispersión.
- Se utilizará solo material desechable.
- Se gestionarán los residuos radiactivos generados de la forma adecuada.

En relación con la protección de pacientes en medicina nuclear diagnóstica es muy importante que se les administren actividades de sustancias radiactivas acordes con los niveles de referencia establecidos en la legislación y lo más reducidas posible siempre que permita una adecuada calidad de la exploración médica a realizar.

Por último, es muy importante la adecuada calibración, verificación y comprobación de los instrumentos utilizados para medir las actividades de sustancias radiactivas a administrar a cada paciente, bien sea para el diagnóstico o para llevar a cabo tratamientos con radionucleidos.

Producción y gestión de residuos radiactivos

El residuo radiactivo

Se denomina residuo radiactivo a cualquier material o producto de desecho para el cual no está previsto ningún uso, está contaminado o que contiene radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por la autoridad competente.

En el sector sanitario los residuos radiactivos son de baja y media actividad. Suelen constituir este tipo de residuos objetos tales como toallas de papel, algodones y gasas, jeringas usadas y viales, guantes de goma y cubiertas para calzado, filtros de aire, etc. (ver figura 43).

Gestión de los residuos radiactivos

Un aspecto importante en el desarrollo de la protección radiológica es realizar una correcta gestión de los residuos radiactivos que permita

minimizar los riesgos de contaminación e irradiación para profesionales expuestos y público en general, y reducir el impacto de los mismos sobre el medio ambiente. Para ello es necesario realizar las siguientes acciones:

- Caracterización de los residuos, determinando las propiedades físicoquímicas y radiológicas de los mismos.
- Clasificación atendiendo a diferentes parámetros tales como la actividad, el periodo de semidesintegración, etc.
- Segregación, etiquetado y recogida. Los residuos radiactivos se guardan en contenedores adecuados atendiendo al tipo de radiación emitida y al estado físico de los mismos, utilizando contenedores blindados y debidamente señalizados. Existirán contenedores para los residuos en todos los lugares donde se estén generando.
- Almacenamiento. Las instalaciones generadoras de residuos radiactivos deben disponer de lugares específicos para el almacenamiento

Características	Residuo de baja y media actividad	Residuo de alta actividad
Periodo de semidesintegración	No debe ser superior a 30 años	Casi siempre superior a 30 años
Actividad específica por elemento	Baja, no supera ciertos valores establecidos para esta categoría	Alta, supera los valores establecidos para la categoría anterior
Calor	No desprenden	Pueden desprender calor
Tipo de emisores	Beta, gamma y alfa < 0,37 GBq/T	Beta, gamma y alfa > 0,37 GBq/T
Blindaje	No los necesitan muy potentes	Necesitan potentes blindajes

Figura 43. Características de distintos tipos de residuos radiactivos.

seguro de los mismos hasta su posterior evacuación. El diseño de estos almacenes incluye los blindajes necesarios, bandejas o sistemas de contención para residuos líquidos y sistemas de ventilación provistos de filtros adecuados para los gaseosos.

Procedimientos de evacuación y acondicionamiento

Como primera consideración hay que tener en cuenta que una buena parte de los residuos generados como consecuencia de las actividades en el sector sanitario presentan niveles de actividad muy bajos, por lo que muy probablemente podrán ser evacuados como residuos convencionales.

Aun no cumpliéndose lo anterior de partida en el residuo cuando se genera, si el periodo de semidesintegración del radionucleido no es muy elevado, pueden almacenarse el tiempo necesario en la propia instalación radiactiva (o en una instalación autorizada al efecto dentro del centro sanitario), hasta que la actividad se haya reducido a los valores regulados, por debajo de los cuales el material no ha de ser considerado radiactivo.

Por tanto, la gestión final de los residuos radiactivos se realiza de acuerdo a las siguientes modalidades de actuación: vertido controlado y evacuación de residuos de baja y media actividad para su almacenamiento.

- Vertido controlado. Se aplica a residuos contaminados con radionucleidos de corto perio-

do de semidesintegración y baja actividad que tras un periodo de almacenamiento adecuado pueden ser eliminados, de forma controlada, por dilución al medio ambiente o gestionados como residuos convencionales. Es la modalidad de actuación más habitual con los residuos generados en las instalaciones radiactivas médicas.

- Evacuación de residuos de media y baja actividad. A través de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), como única empresa autorizada para el tratamiento final de estos residuos, la solución más generalizada es el "almacenamiento en superficie" pudiendo incluir o no barreras adicionales de ingeniería.

En este último proceso de gestión de los residuos, previamente a su disposición en las instalaciones dedicadas al almacenamiento final, los residuos han de estar debidamente acondicionados. El acondicionamiento de los residuos comprende un conjunto de procesos desde que se producen hasta que son envasados. Durante este proceso, los residuos son primeramente clasificados para posteriormente reducir su volumen generalmente por compactación o incineración. Los residuos líquidos de baja y media actividad se someten a una serie de procedimientos (precipitación química, filtración, centrifugación, evaporación, intercambio iónico), con el fin de separar los radionucleidos de la solución que los contiene. También puede utilizarse la incineración en el caso de líquidos combustibles (aceites, líquidos de centelleo...), o sustancias orgánicas (cadáveres de animales, tejidos, líquidos orgánicos, etc.).



Figura 44. Instalaciones de Enresa en El Cabril.

El último paso en el acondicionamiento es la inmovilización de los residuos para evitar la dispersión de los radionucleidos. Se realiza mediante procesos de solidificación o inclusión en matrices sólidas (asfaltos, cementos y resinas plásticas principalmente). Una vez incluidos los residuos en la matriz solidificada, se envasan en contenedores metálicos que pueden ir provistos de un blindaje de hormigón armado.

Para conseguir aislar los residuos radiactivos durante un largo periodo de tiempo, pueden interponerse entre el residuo y el entorno humano una serie de barreras artificiales cuyo objetivo esencial es impedir que el agua superficial o subterránea entre en contacto con los bidones o contenedores en los que se encuentran los

residuos acondicionados. Estos sistemas deben cumplir tres premisas: estar situados por encima del nivel de las aguas subterráneas (nivel freático), estar protegidos de las lluvias por una cobertura impermeable y disponer de sistemas colectores de las aguas que pudieran filtrarse hasta el interior del almacenamiento.

En España, la pequeña parte de residuos de media y baja actividad producidos en hospitales que no son retenidos en la instalación temporalmente para su decaimiento y evacuación como residuo convencional, son acondicionados finalmente en las instalaciones de almacenamiento de residuos de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa) en El Cabril (Córdoba), (figura 44) donde son, finalmente, almacenados.

Funciones y responsabilidades

Las sustancias radiactivas y los equipos productores de radiaciones ionizantes no pueden ser utilizados por personas (físicas o jurídicas) que no estén expresamente autorizadas para ello. Asimismo, es necesario disponer de la autorización de funcionamiento para la instalación radiactiva donde se utilizará el material o equipos indicados. Estas autorizaciones son concedidas por el organismo competente de Industria de la comunidad autónoma correspondiente.

A continuación, se reflejan las obligaciones y responsabilidades asignadas a los centros, entidades, empresas y personas implicadas en el uso de radiaciones ionizantes, definidas en la legislación vigente.

Protección radiológica del trabajador expuesto y del público

La persona que ejerza como titular del centro ostenta la máxima responsabilidad en la aplicación de los principios de protección radiológica reflejados en la legislación vigente en el ámbito de la instalación radiactiva. Sus obligaciones y responsabilidades fundamentales en materia de protección radiológica son:

- Garantizar el cumplimiento de las especificaciones de la autorización de funcionamiento de la instalación radiactiva, las normas establecidas en el correspondiente Manual de Protección Radiológica, así como las dispo-

siciones legales vigentes sobre instalaciones radiactivas.

- Asegurar que se imparte una formación en protección radiológica adecuada previa y continuada a todo el personal de la instalación.
- Comunicar al Consejo de Seguridad Nuclear cualquier situación, accidente o incidente que reduzca la seguridad de profesionales o público en materia de protección radiológica.
- Tomar las medidas oportunas en caso de incumplimiento de las normas de protección radiológica establecidas.
- Firmar y tramitar la documentación preceptiva de la instalación radiactiva y aprobar los procedimientos relativos a la protección radiológica.
- Facilitar la labor de inspección del Consejo de Seguridad Nuclear: el acceso, la documentación y los medios necesarios para el cumplimiento de su misión.

El personal que manipule material o equipos radiactivos y el que dirija dichas actividades, deberá disponer de una licencia específica concedida por el Consejo de Seguridad Nuclear. Existen dos tipos de licencias que capacitan para la supervisión y operación de las instalaciones radiactivas.

La licencia de supervisor capacita para dirigir y planificar el funcionamiento de una instalación radiactiva y las actividades de quienes estén capacitados como operadores.

La licencia de operador capacita para la manipulación de materiales o equipos productores

de radiaciones ionizantes, conforme a procedimientos e instrucciones preestablecidos.

Especial relevancia tiene la formación en materia de protección radiológica. Todas las personas que trabajan en una instalación radiactiva reciben una formación previa y continuada en esta disciplina. Los programas de formación, adecuados a las tareas realizadas por el personal implicado, son homologados por el Consejo de Seguridad Nuclear.

La formación previa debe cubrir como mínimo los aspectos relativos a los riesgos radiológicos asociados, las normas y procedimientos de protección radiológica, reflejando todas las normas de trabajo con radiaciones ionizantes, incluyendo el uso de los dispositivos de dosimetría personal, la gestión de residuos radiactivos, las pautas de actuación a seguir ante un incidente o accidente radiológico, así como las normas de descontaminación. Asimismo, deberán conocer las características de los radionucleidos u otras fuentes de radiación ionizante utilizadas en su trabajo. En el caso de mujeres embarazadas, se indicará la necesidad de efectuar rápidamente la declaración de embarazo y notificación de lactancia. Esta información será entregada en documentos escritos.

Las obligaciones y responsabilidades asignadas al supervisor de una instalación nuclear o radiactiva son las siguientes:

- Conocer y autorizar los trabajos y las operaciones que se realizan en la instalación.

- Cumplir y hacer cumplir las especificaciones indicadas en la autorización de la instalación, Reglamento de Funcionamiento, Manual de Protección Radiológica específico, Plan de Emergencia y cualquier otro documento oficialmente aprobado.
- Elaborar los informes anuales relativos al funcionamiento de la instalación y enviarlos al Consejo de Seguridad Nuclear.
- En caso de emergencia, accidente o incidente, adoptar las medidas necesarias, dejar constancia de ellas, comunicárselas al jefe de protección radiológica y al titular de la instalación.
- Detener en cualquier momento el funcionamiento de la instalación si estima que se han reducido las condiciones de seguridad.
- Vigilar el funcionamiento de los diferentes equipos de medida de la instalación radiactiva.
- Mantener un inventario actualizado del material radiactivo.
- Gestionar los residuos radiactivos.

Las obligaciones y responsabilidades asignadas al operador de una instalación nuclear o radiactiva son las siguientes:

- Conocer y cumplir las normas establecidas en el Manual de Protección Radiológica y las medidas a tomar en caso de emergencia radiológica.
- Comunicar al supervisor, de forma inmediata, cualquier accidente o incidente.
- Utilizar de forma correcta los equipos productores de radiaciones ionizantes.
- Utilizar los equipos de protección radiológica necesarios en cada situación.

- Detener en cualquier momento el funcionamiento de la instalación radiactiva si estima que se han reducido las condiciones de seguridad si no es posible localizar al supervisor.

Las instalaciones radiactivas están sometidas a un doble control. Por una parte, existe un control externo a la instalación realizado por la Administración Pública y por otra parte hay un control interno realizado en la propia instalación.

El control externo realizado desde la Administración se lleva a efecto a través de la evaluación de los documentos preceptivos, y de las inspecciones realizadas por el personal técnico del Consejo de Seguridad Nuclear, oficialmente designado para ello.

El resultado de las inspecciones quedará reflejado en actas que serán debidamente firmadas por el inspector correspondiente, así como por el supervisor de la instalación.

El control interno de las instalaciones nucleares o radiactivas se realiza por el supervisor y el Servicio de Protección Radiológica. Este servicio es responsable de velar por el cumplimiento de las normas de protección radiológica establecidas.

Existe la posibilidad de que una instalación contrate los servicios de protección radiológica a una Unidad Técnica de Protección Radiológica (UTPR) ajena al propio centro. En esta situación, la UTPR tendrá las mismas obligaciones y responsabilidades que los propios servicios de protección radiológica.

La fabricación de aparatos, equipos y accesorios que incorporen sustancias radiactivas o sean generadores de radiaciones ionizantes requieren una autorización específica de la autoridad competente, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear.

Protección radiológica del paciente

La legislación española traspone la normativa aprobada en la Unión Europea. Las medidas de protección radiológica de los pacientes están fundamentalmente establecidas en varios reales decretos [3,4,5,7].

El objetivo es garantizar la mejora de la calidad y eficacia del acto médico con radiaciones ionizantes, evitando exposiciones inadecuadas o excesivas, sin impedir el uso beneficioso de las radiaciones.

Las responsabilidades enunciadas desde la directiva europea aluden específicamente a determinados perfiles profesionales:

- Toda exposición médica debe tener lugar bajo la responsabilidad clínica de un profesional sanitario habilitado.
- El profesional sanitario habilitado, el experto en física médica (que corresponde a la figura del radiofísico en España) y las personas habilitadas para realizar los aspectos prácticos de los procedimientos médico-radiológicos deben participar en el proceso de optimización.

- El prescriptor y el profesional sanitario habilitado deben participar en el proceso de justificación de cada exposición médica.
- En las prácticas médicas radiológicas, un radiofísico participará convenientemente, siendo su nivel de implicación proporcional al riesgo radiológico que presenta la práctica (de forma muy directa en las prácticas de terapia).
- En todos los centros y servicios sanitarios en que se utilicen radiaciones ionizantes, un especialista en Radiofísica Hospitalaria actuará o aportará asesoramiento especializado, según proceda, en relación con las materias relativas a la física de la radiación.
- El especialista en Radiofísica Hospitalaria asumirá la responsabilidad de la dosimetría física y clínica para evaluar la dosis administrada al paciente u otras personas sometidas a exposición médica y asesorará sobre el equipo médico-radiológico.
- Contribuirá a la optimización de la protección radiológica del paciente, la preparación de las especificaciones técnicas del equipo médico-radiológico y del diseño de la instalación, la definición y realización del control de calidad del equipo médico-radiológico, el análisis y registro documental de sucesos que conlleven o puedan conllevar exposiciones médicas accidentales o no intencionadas y la elaboración del programa de garantía de calidad de las unidades asistenciales, entre otros aspectos.

Las instalaciones serán objeto de vigilancia por parte de las autoridades sanitarias de las comunidades autónomas en cuanto al cumplimiento de los criterios de calidad incluidos en los reales

decretos citados, para garantizar la protección al paciente y deberán estar inscritas en el Censo Nacional del Ministerio de Sanidad.

En particular, las instalaciones deben presentar en la Consejería de Sanidad de su comunidad autónoma la documentación correspondiente al Programa de Garantía de Calidad y Seguridad.

Este programa debe incluir, entre otros aspectos, el control de calidad de los aspectos clínicos y de la instrumentación y una evaluación de los indicadores de dosis al paciente y la calidad de la imagen.

Referencias

[1] Se encuentra información oficial sobre los programas de cribado mamográfico en: <https://www.sanidad.gob.es/areas/promocionPrevenccion/cribado/cribadoCancer/cancerMama/infoGeneral.htm>

[2] Comisión Internacional de Protección Radiológica. Publicación ICRP-84. Embarazo e irradiación médica. Traducción al español. Sociedad Española de Protección Radiológica, Sociedad Argentina de Radioprotección.

[3] Real Decreto 1976/1999, de 23 de diciembre, por el que se establecen los criterios de calidad en radiodiagnóstico. BOE núm. 311, de 29 de diciembre de 1999.

[4] Real Decreto 1566/1998, de 17 julio, por el que se establecen los criterios de calidad en radioterapia. BOE núm 206, de 28 de agosto de 1998.

[5] Real Decreto 673/2023, de 18 de julio, por el que se establecen los criterios de calidad y seguridad de las unidades asistenciales de medicina nuclear. BOE núm. 171, de 19 de julio de 2023.

[6] European consensus on patient contact shielding. *Physica Medica*, Volume 96, April 2022, Pages 198-203. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.12.006>

[7] Real Decreto 601/2019, de 18 de octubre, sobre justificación y optimización del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas. BOE núm 262, de 31 de octubre de 2019.

Glosario

ACTIVIDAD RADIACTIVA

Velocidad con la que tienen lugar cambios, transformaciones o desintegraciones en el núcleo atómico. La actividad se expresa en becquerels (Bq). Un becquerel representa una desintegración en un segundo. La antigua unidad era el curio.

ACELERADOR

Equipo de uso médico o industrial que tiene capacidad para emitir fotones y electrones de alta energía (del orden de varios MeV). En el caso primero, los haces de fotones y electrones conformados geoméricamente pueden ser dirigidos con gran precisión hacia la localización anatómica deseada.

ACTIVIDAD ESPECÍFICA

Es la actividad radiactiva por unidad de masa o volumen. Sus unidades son: el Bq/gr o el Bq/ml.

ADN

Ácido desoxiribonucleico. Macromolécula esencial del material genético. Es la base de la herencia biológica.

ÁTOMO

Es la más pequeña porción de un elemento que presenta las propiedades químicas del mismo. Constituido por un núcleo formado por neutrones y protones, estos últimos con carga positiva, rodeado de electrones con carga negativa.

BECQUEREL (Bq)

Es la unidad de actividad radiactiva, representa una desintegración en un segundo.

BLINDAJE

Sistema constituido por un material que se utiliza para absorber o atenuar una determinada radiación. Cuando se desea atenuar radiación gamma o rayos X, se suele utilizar hormigón normal, hormigón baritado, o elementos preferentemente de alto número atómico como el plomo. Cuando se desea atenuar radiación beta, se suelen utilizar en primer término elementos o materiales de bajo número atómico como el metacrilato.

CÁMARA DE IONIZACIÓN

Equipo electrónico que se utiliza para detectar y medir la radiación. El fundamento físico en el que se basa su funcionamiento es la ionización que la radiación produce en el gas que contiene, dando lugar a una carga o corriente medible, proporcional a la dosis absorbida por el gas.

CÉLULA

Unidad funcional más pequeña capaz de existir de forma independiente. Está formada por el núcleo y el citoplasma, ambos separados por la membrana nuclear. El citoplasma está separado del medio en el cual se encuentra la célula por otra membrana llamada membrana celular.

CITOPLASMA

Comprende la parte de la célula contenida entre la membrana celular y el núcleo de la misma. El citoplasma es el lugar donde se realizan todas las funciones metabólicas de la célula.

CONTAMINACIÓN RADIACTIVA

Presencia indeseada de uno o más radionucleidos en el ser humano (contaminación personal) o en el entorno que le rodea (contaminación ambiental). Para que se produzca una contaminación radiactiva, los radionucleidos han de estar como fuentes abiertas (no encapsulados).

CROMOSOMAS

Componentes celulares contenidos en el núcleo de la célula, portadores de genes (unidades de material genético). Son los responsables de transmitir la información hereditaria que contiene la célula y también dirigen la actividad del citoplasma de la misma.

CURIO

Unidad antigua de actividad radiactiva, equivale a: $3,7 \times 10^{10}$ Bq. Esta cantidad también se puede expresar en gigabecquerels como 37 GBq, ya que 10^9 Bq = 1 GBq.

DESCONTAMINACIÓN

Proceso mediante el cual se elimina toda o parte de la contaminación radiactiva.

DESINTEGRACIÓN

Transformación nuclear, mediante la cual el núcleo de los átomos radiactivos emite partículas o radiación con el fin de acercarse a una situación de mayor estabilidad.

DETRIMENTO

El daño total en la salud experimentado por un grupo expuesto y sus descendientes como resultado de la exposición del grupo a una fuente de radiación. El detrimento es un concepto

multiatributo. Sus principales componentes son las magnitudes estocásticas: probabilidad de un cáncer fatal atribuible, probabilidad ponderada de un cáncer no fatal atribuible, probabilidad ponderada de efectos heredables severos, y el acortamiento de la expectativa de vida si el daño ocurre.

DNA

Véase ADN.

DOSÍMETRO

Sistema detector utilizado para estimar la dosis de radiación.

DOSÍMETRO DE TERMOLUMINISCENCIA

Sistema detector formado por una sustancia que, al ser irradiada, retiene la energía depositada por la radiación en su proceso de interacción con la misma y la emite en forma de luz cuando es calentada en un proceso de lectura del mismo. La luz emitida es proporcional a la energía absorbida por el dosímetro.

DOSIS

A veces se emplea este término de forma genérica, para designar distintas cantidades utilizadas para estimar la energía transferida a un medio en el proceso de interacción de la radiación con el mismo, o el daño biológico ocasionado.

DOSIS ABSORBIDA

Energía absorbida por unidad de masa en un determinado material.

DOSIS EQUIVALENTE

Dosis absorbida promedio en un órgano o tejido, ponderada según el tipo y calidad de la radiación.

DOSIS EFECTIVA

Suma de las dosis equivalentes ponderadas por los factores correspondientes a los tejidos y órganos del cuerpo, que tienen en cuenta su radiosensibilidad específica y contribución al detrimento.

DOSIS INTERNA

Dosis de radiación recibida como consecuencia de los radionucleidos depositados en el organismo humano.

DOSIS UMBRAL PARA REACCIONES TISULARES.

Aquella dosis que se estima que resulta en solo un 1 % de incidencia de reacciones tisulares para una muestra de población expuesta a esa dosis.

EFFECTOS DETERMINISTAS

También llamados no estocásticos y englobados dentro de lo que se consideran reacciones tisulares a la radiación. Se caracterizan por tener umbral a la hora de su aparición. La gravedad de estos efectos depende de la dosis. Ejemplos de estos efectos son las cataratas radioinducidas, caída del cabello, esterilidad, etc.

EFFECTOS ESTOCÁSTICOS

También llamados probabilísticos. Estos efectos no tienen umbral y la probabilidad de su aparición aumenta con la dosis. Son siempre graves y ejemplos de ellos son la inducción de cáncer y los posibles efectos genéticos.

EFFECTOS GENÉTICOS

Los que afectan a la salud de los descendientes de la persona irradiada. Son mutaciones producidas en los genes y que originan malformaciones de cualquier tipo.

EFFECTOS SOMÁTICOS

Aquellos que afectan a la salud de la persona irradiada, ejemplo de ellos es el cáncer radioinducido.

ELECTRÓN

Partícula constituyente de la corteza atómica. Tiene carga negativa y su masa es muy pequeña comparada con la masa del protón.

ELECTRÓN VOLTIO

Es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado en el vacío a una diferencia de potencial de un voltio. Es la unidad de energía de uso en la física nuclear. Sus múltiplos más utilizados son: el kiloelectrónvoltio (keV) 1000 eV y el megaelectrónvoltio (MeV) 1 000 000 eV.

ELEMENTO

Materia o sustancia en la cual los átomos que la forman tienen todos el mismo número atómico, por ejemplo el oxígeno, el hidrógeno, etc.

EQUIPO DE RAYOS X

Aparato utilizado en el ámbito sanitario, y cuyo funcionamiento se basa en la generación de haces de fotones, utilizados tanto para el diagnóstico como para terapia, aunque esta aplicación es mucho menos frecuente. La energía de los fotones utilizados en las aplicaciones diagnósticas varía desde algunas decenas hasta algo más de 100 keV.

EQUIVALENTE DE DOSIS PERSONAL

Es una magnitud operacional: el equivalente de dosis en tejido blando (comúnmente interpretado como “la esfera ICRU”) a una profundidad apropiada, d , por debajo de un punto especificado del cuerpo humano. La unidad del equivalente de dosis personal es el julio por kilogramo ($J\ kg^{-1}$) y su unidad especial es el sievert (Sv). El punto especificado está usualmente determinado por la posición en la que se porta el dosímetro individual.

EQUIVALENTE DE DOSIS AMBIENTAL.

El equivalente de dosis ambiental en un punto de un campo de radiación que se produciría por el correspondiente campo alineado y expandido en la esfera ICRU a una profundidad de 10 mm y sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado. La unidad del equivalente de dosis ambiental es el $J\ kg^{-1}$ y su nombre especial es sievert (Sv).

ERITEMA

Enrojecimiento de la piel que puede ser consecuencia de la congestión de los capilares como resultado de una determinada irradiación.

EXPOSICIÓN

Acción de someter o someterse a las radiaciones ionizantes.

FACTOR DE PONDERACIÓN DE LA RADIACIÓN

Factor utilizado para calcular la dosis equivalente, que corrige según la eficacia de la radiación para producir efectos biológicos.

FACTOR DE PONDERACIÓN TISULAR

Factor utilizado para calcular la dosis efectiva, que pondera la diferente sensibilidad de los distintos órganos o tejidos a las radiaciones ionizantes.

FOTÓN

Paquete de energía asociado a la radiación electromagnética. Los rayos X y la radiación gamma están formados por haces de fotones y su mayor o menor capacidad de penetrar en el medio depende de la energía de los mismos.

FUENTES RADIATIVAS

Aquellas sustancias o materiales que contienen algún elemento radiactivo, por tanto con capacidad para producir radiaciones ionizantes.

GENÉTICO

Lo relativo a la herencia biológica.

GÓNADAS

Órganos que producen las células sexuales reproductoras (ovarios y testículos).

GRAY

Unidad de dosis absorbida; equivale a $1\ J/kg$.

IAEA

Ver OIEA.

ICRP

Comisión Internacional de Protección Radiológica.

INTERVENCIÓN

Actividad humana que evita o reduce la exposición de las personas a la radiación procedente de fuentes que no son parte de una práctica o que están fuera de control, actuando sobre las fuentes, las vías de transferencia y las propias personas.

IONIZACIÓN

Fenómeno que ocurre cuando un átomo neutro, o una molécula, adquiere o pierde carga eléctrica, convirtiéndose en un ión positivo o negativo (catión o anión respectivamente).

IRPA

Asociación Internacional de Protección Radiológica.

IRRADIACIÓN

Proceso de exposición a la radiación.

ISÓTOPOS

Átomos del mismo elemento que tienen el mismo número de protones en su núcleo, pero difieren en el número de neutrones.

ISOTOPO RADIOACTIVO

Ver radionucleidos.

keV

Kiloelectrónvoltio. Unidad de energía equivalente a 1000 electrónvoltios.

LEUCEMIA

O cáncer hematológico: grupo de enfermedades malignas que generalmente afectan a los linfocitos aunque también a otros precursores de las diferentes líneas celulares de la médula ósea.

LÍMITE DE DOSIS

Valores de la dosis efectiva o de la dosis equivalente en ciertos órganos o tejidos que no deben ser rebasadas. Los límites de dosis están basados en recomendaciones hechas por la ICRP y se recogen en el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.

MeV

Megaelectrónvoltio. Unidad de energía equivalente a 1 millón de electrónvoltios.

MOLÉCULA

Agrupación de átomos que constituyen la cantidad más pequeña de un compuesto que puede existir independientemente y que presenta todas las propiedades químicas del mismo.

MOL

Cantidad de una sustancia que contiene el Número de Avogadro (6,023 1023) de átomos o moléculas.

MUTACIÓN

Cambio o alteración en material genético.

NEUTRÓN

Partícula sin carga eléctrica que acompaña a los protones en el núcleo del átomo.

NÚCLEO

Parte central del átomo, con carga positiva y constituida por protones y neutrones a los que se les suele denominar nucleones.

NÚMERO ATÓMICO (Z)

Número de protones en el núcleo (y de electrones en la corteza del átomo si está en su estado neutro). Es característico de cada elemento.

NÚMERO MÁSCO (A)

Número total de neutrones y protones (nucleones) en el núcleo del átomo.

OIEA (IAEA)

Organismo Internacional de Energía Atómica.

OIT

Organización Internacional del Trabajo.

OMS

Organización Mundial de la Salud.

OPS

Oficina Panamericana de la Salud.

PARTÍCULA ALFA

Partícula cargada positivamente compuesta de dos protones y dos neutrones. Las partículas alfa son emitidas por elementos pesados; tienen bajo poder de penetración y ceden su energía cerca de la fuente emisora.

PARTÍCULA BETA

Electrones, con poder de penetración mayor que el de las partículas alfa por ser más ligeras que estas y carga negativa. También pueden tener carga positiva, en cuyo caso se denominan positrones.

PENETRACIÓN

Distancia máxima alcanzada por una partícula alfa o beta antes de perder su energía y ser absorbida en un medio determinado.

PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN

Intervalo de tiempo que ha de transcurrir para que el número de átomos de un radionucleido se reduzca a la mitad, o lo que es lo mismo, su actividad se reduzca a la mitad.

PRÁCTICA

Actividad humana que puede aumentar la exposición de las personas a la radiación procedente de una fuente artificial, o de una fuente natural cuando los radionucleidos naturales son procesados por sus propiedades radiactivas, fisionables o fértiles, excepto en el caso de exposición de emergencia.

PROTÓN

Partícula de carga positiva que junto con los neutrones forma parte del núcleo atómico.

RADIACIÓN

Emisión de energía o de partículas desde una fuente.

RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Radiación que transmite energía y que consiste en ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz.

RADIACIÓN IONIZANTE

Partículas y radiación electromagnética con longitud de onda igual o menor a 100 nanómetros o frecuencia igual o mayor a 3×10^{15} hz, capaces de producir iones directa o indirectamente.

RADIOACTIVIDAD

Fenómeno mediante el cual determinados elementos con núcleos inestables tienden, a lo largo del tiempo y con mayor o menor rapidez, a transformarse en núcleos más estables mediante la emisión espontánea de algunas partículas o radiación gamma.

RADIOISÓTOPO

Ver radionucleido.

RADIONUCLEIDO

Átomo de núcleo inestable que se desintegra espontáneamente emitiendo partículas (alfa o beta) o radiación gamma, o ambas.

RADIONUCLEIDOS ARTIFICIALES

Son los que se originan a partir de reacciones nucleares utilizadas por el ser humano.

RADIONUCLEIDOS NATURALES

Son aquellos que forman parte de la Tierra desde el origen de la misma. Además del potasio-40 y del rubidio-87, están los integrantes de las tres grandes cadenas de desintegración (uranio-235, uranio-238 y torio-230). Los dos primeros radionucleidos y los cabezas de las tres series tienen un periodo de semidesintegración bastante elevado, comparable a la edad de la Tierra.

RADIONUCLEIDOS COSMOGÉNICOS

Son los que se originan debido a reacciones nucleares producidas por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera.

RADIOTERAPIA

Tratamiento de células y tejidos tumorales mediante la aplicación de radiaciones ionizantes.

RAYOS CÓSMICOS

Radiación ionizante procedente del Sol y del espacio exterior.

RAYOS GAMMA

Radiación electromagnética de muy baja longitud de onda, emitida por un núcleo inestable. Su poder de penetración es importante y directamente proporcional a su energía asociada.

RAYOS X

Radiación de naturaleza electromagnética que procede de la corteza atómica, o bien se produce en dispositivos especialmente diseñados, cuando un haz de electrones acelerados por un potencial eléctrico choca contra un blanco metálico. En el primer caso (radiación característica) la energía de los fotones corresponde a la diferencia energética existente entre los niveles en los que se produce la desexcitación. En el segundo (radiación de frenado), el poder de penetración de los rayos X dado por su energía, depende de la energía suministrada a los electrones por el potencial de aceleración.

SERVICIO DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Entidad propia de un titular, expresamente autorizada por el Consejo de Seguridad Nuclear, para desempeñar las funciones de protección radiológica.

SIEVERT

Unidad de dosis equivalente y de dosis efectiva.

TRAZADOR

Sustancia química a la que se le une un radionucleido para formar un radiotrazador, de forma que, tras administrarse a un individuo, pueda ser detectado por instrumentos de medida de la radiación situados externamente, a lo largo de un proceso o lapso de tiempo.

UNIDAD TÉCNICA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Entidad contratada por un titular, no integrada en su organización o propiedad, expresamente autorizada por el Consejo de Seguridad Nuclear para desempeñar las funciones de protección radiológica.

UNSCEAR

Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de la Radiación Atómica.

VATIO

Unidad de potencia eléctrica.

Principales disposiciones legales

- Ley 25/1964 sobre Energía Nuclear (BOE, 4 de mayo de 1964).
- Ley 15/1980 de Creación del CSN (BOE, 25 de abril de 1980), reformada por la Ley 33/2007, de 8 de noviembre.
- Ley 31/1995. Prevención de Riesgos Laborales (BOE, 10 de noviembre de 1995).
- Ley 14/1999 de Tasas y Precios Públicos por servicios prestados por el Consejo de Seguridad Nuclear (BOE, 5 de mayo 1999).
- Real Decreto 1085/2009, de 3 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico.
- Real Decreto 39/1997. Reglamento de los Servicios de Prevención (BOE, 31 de enero de 1997).
- Real Decreto 220/1997. Creación y regulación de la obtención del título oficial de especialista en radiofísica hospitalaria (BOE, 1 de marzo de 1997).
- Real Decreto 412/1997. Solicitud para la obtención del título de especialista en radiofarmacia (BOE, 16 de abril 1997).
- Real Decreto 673/2023, de 18 de julio, por el que se establecen los criterios de calidad y seguridad de las unidades asistenciales de medicina nuclear (BOE núm. 171, 19 de julio de 2023).
- Real Decreto 1566/1998. Establecimiento de los criterios de calidad en radioterapia (BOE, 28 de agosto de 1998).
- Real Decreto 1976/1999. Establecimiento de los criterios de calidad en radiodiagnóstico (BOE, 29 de diciembre de 1999).
- Real Decreto 1217/2024, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes.
- Real Decreto 601/2019, de 18 de octubre, sobre justificación y optimización del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas. BOE núm 262, de 31 de octubre de 2019.
- Real Decreto 1029/2022 de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. BOE núm 305, de 21 de diciembre de 2022.

- DIRECTIVA 2013/59/EURATOM DEL CONSEJO, de 5 de diciembre de 2013. Diario oficial de la Unión Europea, 17-1-2014, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.
- Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación. Colección Seguridad no 115. Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena. 1997.
- Guías de Seguridad del Consejo de Seguridad Nuclear (www.csn.es).

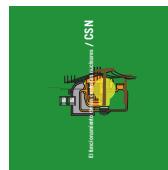
Otras publicaciones



Emergencia en centrales nucleares



Desmantelamiento y clausura de centrales nucleares



El funcionamiento de las centrales nucleares



El uso de radiaciones en medicina



Dosis de radiación



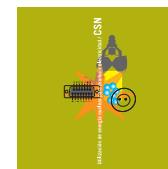
Protección radiológica en la industria, agricultura, docencia e investigación



Las radiaciones en la vida diaria



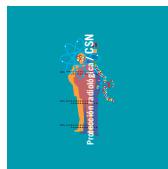
El transporte de materiales radiactivos



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