



Aplicaciones de las radiaciones ionizantes en Medicina.

Fuentes de producción, sistemas de seguridad

Dr. D. ANTONIO REBOLLAR RIVAS

Jefe del Servicio Médico del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas. Madrid.

Dr. D. SANTIAGO CASTAÑO LARA

Médico del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas. Madrid.

INTRODUCCION

Llamamos radiaciones ionizantes a aquellos haces de partículas o de ondas electromagnéticas que en su interacción con la materia, tanto viva como inerte, y a través del depósito de la energía que transportan, son capaces de descomponer los átomos y moléculas previamente neutros en un par de fragmentos con carga eléctrica, generalmente un ion positivo y un electrón negativo (Tanarro, 1986) (tabla 1).

El comportamiento de estos iones en estado libre es distinto al que tenían cuando se encontraban ligados en una configuración eléctricamente

neutra. Así, la ionización perturba los procesos bioquímicos normales de las células afectadas, algunas de las cuales pueden autorregenerarse, mientras que otras resultan irreparablemente dañadas. Y aun cuando el efecto de la radiación no sea letal para una determinada célula, puede el daño ser transmitido, al reproducirse la célula, a las siguientes generaciones del mismo tejido y, si se trata de células germinales, a las posteriores generaciones del individuo (IAEA-TECDOC-366, 1986).

Los efectos biológicos adversos de las radiaciones se hicieron patentes bien pronto. El propio Becquerel, descubridor de la radiactividad natural

TABLA 1
Características de los diversos tipos de radiaciones ionizantes

Tipo de radiación	Denominación	Características
Corpusculares	Alfa	Núcleos de helio Elevado poder de ionización Poco poder de penetración Emisidas por radionucleidos
	Beta	Electrones o positrones Poder de ionización menor Poder de penetración medio Emisidas por radionucleidos
	Protón	Núcleos de hidrógeno Poder de penetración alto Producidos en aceleradores
	Neutrón	Componente del núcleo atómico Carece de carga eléctrica Poder de penetración extremo
Electromagnéticas	Rayos gamma	Cuantos de energía. Fotones Elevado poder de penetración Asociados a la emisión de partículas alfa o beta por los radionucleidos Resultan de transiciones de un estado a otro de energía en el átomo
	Rayos X	Características semejantes a los rayos gamma Producidos en aparatos generadores

en 1896, observó en sí mismo que las radiaciones eran capaces de producir quemaduras en la piel, las llamadas radiodermitis agudas; ya iniciado el siglo XX se comprobó que a menudo, éstas podían ser el punto de partida de cánceres cutáneos.

Así pues, mucho antes de ser explicados los mecanismos biológicos subyacentes ya se habían puesto de

manifiesto los principales efectos nocivos de las radiaciones: la muerte celular, responsable de las radiodermitis, y las mutaciones inducidas en el material genético, que, de afectar a las células somáticas, podían desencadenar la aparición de neoplasias y de alteraciones en el desarrollo embrionario, o mutaciones genéticas y aberraciones cromosómicas en la

descendencia del individuo irradiado, de ser las células germinales las afectadas (figura 1).

FUENTES DE RADIACION

Aunque su conocimiento y estudio apenas cuenta con un siglo de historia, la exposición del hombre a las radiaciones ionizantes no es, ni mucho menos, un fenómeno reciente, porque él y el resto de los seres vivos, desde su aparición sobre la Tierra, se han encontrado sometidos permanentemente a un cierto nivel de radiación natural o fondo radiactivo natural, tan inevitable como incontrolable. Las causas de esta radiación natural son fundamentalmente (tabla 2): la procedente del espacio exterior y la existencia en nuestro planeta de elementos radiactivos, unos presentes desde el origen del sistema solar, y otros en continua renovación (UNSCEAR, 1977, 1982). La exposición del hombre, y el resto de los seres vivos, a estas fuentes naturales varía de unos lugares a otros en relación a la distribución asimétrica de los elementos radiactivos en la corteza terrestre. Así, los grupos de población que viven a grandes alturas o en regiones de gran actividad natural reciben dosis muy superiores a la media considerada normal para el resto de la humanidad.

A la exposición procedente de estas fuentes naturales se suma hoy la debida a ciertas actividades humanas que, desde hace aproximadamente un siglo, y escalonadamente, han

FIGURA 1
Representación esquemática de los efectos biológicos de las radiaciones



La ionización perturba los procesos bioquímicos normales de las células afectadas, algunas de las cuales pueden autorregenerarse, mientras que otras resultan irreparablemente dañadas. Y aun cuando el efecto de la radiación no sea letal para una determinada célula, el daño puede ser transmitido, al reproducirse la célula, a las siguientes generaciones del mismo tejido y, si se trata de células germinales, a las posteriores generaciones del individuo.

TABLA 2
Dosis equivalente anual por persona
derivada de fuentes naturales (en microsievert)

Fuente	Irradiación externa	Irradiación interna	Total
Rayos cósmicos	300	—	300
Radionucleidos cosmogénicos	—	15	15
Radionucleidos primordiales	120	180	300
Potasio-40	—	6	6
Rubidio-87	—	950	1040
Serie del Uranio-238	140	190	330
Serie del Torio-232	—	—	—
Total (redondeado)	650	1340	2000

Adaptado de UNSCEAR, 1982

aumentado de forma notoria las dosis recibidas por la humanidad en general (creación de fuentes artificiales de radiación e introducción de tecnologías que implican la utilización de radiaciones). Estas fuentes de radiación artificial, que, si bien han sido introducidas para prestar servicio al hombre, a su salud y a su calidad de vida, representan riesgos adicionales (Upton, A.C., 1982), que por su carácter, en contraposición a las fuentes naturales, de controlables e incluso en ocasiones evitables, requieren la puesta en marcha de una serie de medidas de vigilancia y control de las que se ocupa una joven y dinámica ciencia: la *protección radiológica*.

Riesgos radiológicos

Los riesgos resultantes del manejo de fuentes de radiaciones ionizantes pueden dividirse en dos clases:

— **Riesgo de irradiación.** Se dice que hay irradiación cuando una parte o la totalidad del organismo recibe la radiación emitida por una fuente radiactiva. Hablamos de irradiación externa cuando la fuente de exposición se encuentra localizada exteriormente al organismo, y de irradiación interna, cuando la exposición deriva de fuentes interiores a él, siendo la irradiación total la suma de ambas exposiciones. Como se puede comprender, el riesgo de irradiación externa desaparece en el momento en que la fuente es retirada de las inmediaciones o es interpuesto entre ella y el organismo un material absorbente adecuado. Por el contrario, el riesgo de irradiación interna permanece hasta que la fuente es eliminada del organismo, ya sea a través

de su decaimiento físico o su eliminación biológica.

Tanto la irradiación externa como la interna pueden ser globales, si afectan de un modo homogéneo al cuerpo entero, o parciales, si inciden esencialmente sobre una parte del orga-

nismo o sobre uno o varios órganos o tejidos.

— **Riesgo de contaminación.** Se dice que hay contaminación radiactiva cuando una sustancia radiactiva se encuentra en contacto con una materia cualquiera o se encuentra dispersa en el medio. Hay contaminación externa en un individuo cuando la sustancia radiactiva se encuentra depositada sobre la superficie corporal (piel, cabellos, uñas, etc.), y contaminación interna, cuando la sustancia ha sido incorporada al organismo por cualquier vía: inhalatoria, digestiva o percutánea.

Clasificación de las fuentes de radiación

Atendiendo a la forma de presentación y de utilización del material radiactivo, puede hacerse una clasificación de las fuentes de radiación como se muestra en la tabla 3 (San Segundo, T., 1982):

— **Generadores de radiaciones**

TABLA 3
Clasificación de las fuentes de radiación utilizadas en Medicina

Fuente	Aplicaciones
Generadores de radiaciones	Radiodiagnóstico Radioterapia con rayos X Radioterapia con aceleradores
Fuentes encapsuladas	Braquiterapia (Ir-192, Cs-137) Teleterapia (Co-60, Cs-137) Fuente de energía par marcapasos
Fuentes no encapsuladas	Radiofármacos Radioinmunoanálisis Estudios morfológicos y funcionales Investigación



Radioterapia.



Radiodiagnóstico.

ionizantes. Este tipo de instalaciones está constituido por aquellos equipos que, conectados a una adecuada fuente de energía eléctrica, son capaces de producir radiaciones, como son los aparatos de rayos X, que generan este tipo de radiación, y los aceleradores de partículas, que producen electrones, protones o neutrones.

En este tipo de instalaciones no puede existir riesgo de contaminación, pero los riesgos de irradiación externa que presentan son considerables. Además, cabe apuntar que, en este caso, es preciso tener en cuenta los riesgos eléctricos derivados de la energía de alimentación. En estas instalaciones, los accidentes que cabe esperar son mínimos, ya que el manantial de radiación ionizante cesa cuando se desconecta el aparato generador de la red, reduciéndose a fallos en el sistema de desconexión, lo cual daría lugar a una exposición indebida a un flujo de irradiación externa.

— Fuentes radiactivas encapsuladas. Constituye una fuente encapsulada todo material radiactivo herméticamente cerrado y sellado dentro de un contenedor de material no radiactivo y muy resistente que lo protege de todo contacto o fuga. Resulta, por consiguiente, poco probable, en su uso ordinario, el que se produzca un escape de los radionucleidos contenidos, lo que elimina prácticamente el riesgo de contaminación. Sin embargo, si presentan riesgos de irradiación externa debidos a la desintegración radiactiva del radionucleido utilizado y cuya magnitud dependerá de la actividad de la fuente radiactiva. En este grupo incluimos las fuentes de Iridio-192, Cesio-137 y Cobalto-60, utilizadas en braquiterapia y teleterapia.

Los tipos de accidentes que cabe esperar en estas instalaciones son, en primer lugar, la aparición de fisuras en el encapsulamiento de la fuente, que tendrá como consecuencia

el escape y dispersión del material radiactivo en el ambiente, con la consecuente contaminación de personas y objetos, y en segundo lugar, los fallos en el mecanismo de posicionamiento correcto de la fuente dentro de su blindaje, con la consecuente sobreexposición a niveles indebidos de irradiación externa.

— Fuentes radiactivas no encapsuladas. Como su nombre indica, son las que contienen sustancias radiactivas, sólidas, líquidas o gaseosas, que en operaciones ordinarias pueden ser extraídas total o parcialmente de su contenedor hermético, pero no sellado, para ser manipuladas en el exterior. En este grupo incluimos todos los radioisótopos utilizados en los estudios morfológicos y funcionales de Medicina nuclear, así como los empleados en las determinaciones analíticas *in vitro*.

El riesgo fundamental que representa su uso es el de contaminación; si bien también existen riesgos de irradiación externa, dadas las pequeñas cantidades de radioisótopo que se suelen emplear y su baja actividad, éstos son mínimos.

El tipo de accidentes que pueden darse en estas instalaciones es, por una parte, el derrame del material radiactivo, y por otra, el incendio que pudiera provocar su volatilización, con formación de aerosoles, con la consiguiente contaminación del medio y del personal en ambos casos.

Fuentes de radiaciones ionizantes en medicina

Las radiaciones ionizantes comenzaron a aplicarse en la Medicina bien pronto tras su descubrimiento, y desde entonces su crecimiento y desarrollo ha sido paralelo al avance de la Medicina, permitiendo un mejor conocimiento de la anatomía y fisiología, tanto normal como patológica, de los organismos vivos. Su contribución a la investigación, al diagnóstico y al tratamiento ha sido de tal magnitud que hoy no podemos concebir la práctica clínica sin su presencia. No obstante, y a pesar de estar suficientemente comprobado el beneficio que su uso comporta, debido a los efectos biológicos adversos que se pueden derivar de su utilización, ésta debe realizarse siguiendo un conjunto de normas que limiten en lo posible el riesgo asociado a su aplicación.

Hoy en día, la exposición a las radiaciones derivada de sus usos en Medicina es, después de la proveniente de fuentes naturales, la que

Hoy en día, la exposición a las radiaciones derivada de sus usos en Medicina es, después de la proveniente de fuentes naturales, la que supone, con mucho, la mayor contribución a la dosis total recibida por el hombre, tanto a nivel individual como colectivo, variando ésta con el grado de industrialización, de tal forma que en determinados países la dosis procedente de fuentes médicas se aproxima sensiblemente a la que tiene su origen en el fondo radiactivo natural.

supone, con mucho, la mayor contribución a la dosis total recibida por el hombre, tanto a nivel individual como colectivo, variando ésta con el grado de industrialización, de tal forma que, en determinados países, la dosis procedente de fuentes médicas se aproxima sensiblemente a la que tiene su origen en el fondo radiactivo natural (UNSCEAR, 1977, 1982) (BEIR, 1980) (tabla 4).

Las aplicaciones de las radiaciones en Medicina, como en las restantes áreas de la ciencia y la tecnología, se basan en la doble interacción de la radiación con la materia, pudiendo diferenciar:

TABLA 4	
Contribución a la dosis equivalente médula ósea por varias fuentes en Estados Unidos	
Fuente	Dosis equivalente (mSv/año)
Médicas	0,925
Fondo natural	0,780
Poos radiactivo	0,045
Productos de consumo	0,040
Materiales de construcción	0,040
Industria nuclear	0,001
Viajes aéreos	0,001
Total	1,822



Radiodiagnóstico.

ionizantes. Este tipo de instalaciones está constituido por aquellos equipos que, conectados a una adecuada fuente de energía eléctrica, son capaces de producir radiaciones, como son los aparatos de rayos X, que generan este tipo de radiación, y los aceleradores de partículas, que producen electrones, protones o neutrones.

En este tipo de instalaciones no puede existir riesgo de contaminación, pero los riesgos de irradiación externa que presentan son considerables. Además, cabe apuntar que, en este caso, es preciso tener en cuenta los riesgos eléctricos derivados de la energía de alimentación. En estas instalaciones, los accidentes que cabe esperar son mínimos, ya que el manantial de radiación ionizante cesa cuando se desconecta el aparato generador de la red, reduciéndose a fallos en el sistema de desconexión, lo cual daría lugar a una exposición indebida a un flujo de irradiación externa.

— Fuentes radiactivas encapsuladas. Constituye una fuente encapsulada todo material radiactivo herméticamente cerrado y sellado dentro de un contenedor de material no radiactivo y muy resistente que lo protege de todo contacto o fuga. Resulta, por consiguiente, poco probable, en su uso ordinario, el que se produzca un escape de los radionucleidos contenidos, lo que elimina prácticamente el riesgo de contaminación. Sin embargo, si presentan riesgos de irradiación externa debidos a la desintegración radiactiva del radionucleido utilizado y cuya magnitud dependerá de la actividad de la fuente radiactiva. En este grupo incluimos las fuentes de Iridio-192, Cesio-137 y Cobalto-60, utilizadas en braquiterapia y teleterapia.

Los tipos de accidentes que cabe esperar en estas instalaciones son, en primer lugar, la aparición de fisuras en el encapsulamiento de la fuente, que tendrá como consecuencia

el escape y dispersión del material radiactivo en el ambiente, con la consecuente contaminación de personas y objetos, y en segundo lugar, los fallos en el mecanismo de posicionamiento correcto de la fuente dentro de su blindaje, con la consecuente sobreexposición a niveles indebidos de irradiación externa.

— Fuentes radiactivas no encapsuladas. Como su nombre indica, son las que contienen sustancias radiactivas, sólidas, líquidas o gaseosas, que en operaciones ordinarias pueden ser extraídas total o parcialmente de su contenedor hermético, pero no sellado, para ser manipuladas en el exterior. En este grupo incluimos todos los radioisótopos utilizados en los estudios morfológicos y funcionales de Medicina nuclear, así como los empleados en las determinaciones analíticas *in vitro*.

El riesgo fundamental que representa su uso es el de contaminación; si bien también existen riesgos de irradiación externa, dadas las pequeñas cantidades de radioisótopo que se suelen emplear y su baja actividad, éstos son mínimos.

El tipo de accidentes que pueden darse en estas instalaciones es, por una parte, el derrame del material radiactivo, y por otra, el incendio que pudiera provocar su volatilización, con formación de aerosoles, con la consiguiente contaminación del medio y del personal en ambos casos.

Fuentes de radiaciones ionizantes en medicina

Las radiaciones ionizantes comenzaron a aplicarse en la Medicina bien pronto tras su descubrimiento, y desde entonces su crecimiento y desarrollo ha sido paralelo al avance de la Medicina, permitiendo un mejor conocimiento de la anatomía y fisiología, tanto normal como patológica, de los organismos vivos. Su contribución a la investigación, al diagnóstico y al tratamiento ha sido de tal magnitud que hoy no podemos concebir la práctica clínica sin su presencia. No obstante, y a pesar de estar suficientemente comprobado el beneficio que su uso comporta, debido a los efectos biológicos adversos que se pueden derivar de su utilización, ésta debe realizarse siguiendo un conjunto de normas que limiten en lo posible el riesgo asociado a su aplicación.

Hoy en día, la exposición a las radiaciones derivada de sus usos en Medicina es, después de la proveniente de fuentes naturales, la que

Hoy en día, la exposición a las radiaciones derivada de sus usos en Medicina es, después de la proveniente de fuentes naturales, la que supone, con mucho, la mayor contribución a la dosis total recibida por el hombre, tanto a nivel individual como colectivo, variando ésta con el grado de industrialización, de tal forma que en determinados países la dosis procedente de fuentes médicas se aproxima sensiblemente a la que tiene su origen en el fondo radiactivo natural.

supone, con mucho, la mayor contribución a la dosis total recibida por el hombre, tanto a nivel individual como colectivo, variando ésta con el grado de industrialización, de tal forma que, en determinados países, la dosis procedente de fuentes médicas se aproxima sensiblemente a la que tiene su origen en el fondo radiactivo natural (UNSCEAR, 1977, 1982) (BEIR, 1980) (tabla 4).

Las aplicaciones de las radiaciones en Medicina, como en las restantes áreas de la ciencia y la tecnología, se basan en la doble interacción de la radiación con la materia, pudiendo diferenciar:

TABLA 4	
Contribución a la dosis equivalente médula ósea por varias fuentes en Estados Unidos	
Fuente	Dosis equivalente (mSv/año)
Médicas	0,925
Fondo natural	0,780
Poos radiactivo	0,045
Productos de consumo	0,040
Materiales de construcción	0,040
Industria nuclear	0,001
Viajes aéreos	0,001
Total	1,822

— Aplicaciones basadas en la acción de las radiaciones sobre la materia, es decir, en las alteraciones físicas, químicas y biológicas inducidas en los sistemas materiales por la acción de la radiación. Son aplicaciones encuadradas en este grupo la radioterapia y la esterilización de material médico.

— Aplicaciones que aprovechan la acción de la materia sobre las radiaciones. La materia provoca fenómenos de absorción y dispersión de la radiación que con ella interacciona, fenómenos que dependen tanto de la naturaleza de la radiación incidente como de ciertas características propias de la materia, tales como espesor, densidad y naturaleza. La detección y medida de la radiación transmitida permiten obtener información acerca de las propiedades referidas. En este grupo de aplicaciones debemos encuadrar fundamentalmente las imágenes médicas.

— Utilización de átomos radiactivos como trazadores. En este tipo de aplicaciones, el radionucleido se mezcla o incorpora a una sustancia para seguir su curso o comportamiento en sí mismo. En este grupo incluimos el uso de moléculas marcadas en radioinmunoanálisis, la autorradiografía celular, etc.

Habitualmente, la exposición a las radiaciones ionizantes de origen médico es dividida en tres categorías bien diferenciadas: radiodiagnóstico, radioterapia y uso de radioisótopos en medicina nuclear.

— Radiodiagnóstico. La obtención de imágenes mediante la medida de la atenuación que sufre un haz de fotones de rayos X al atravesar las estructuras corporales fue la primera de las aplicaciones de las radiaciones a la Medicina.

En las últimas décadas, los avances basados en el uso de detectores sin película, que dan información acerca del número de fotones que chocan sobre un elemento sensible, y el uso de algoritmos sofisticados de procesamiento de datos han revolucionado la calidad, seguridad y eficacia del diagnóstico por imagen, aumentado asimismo su alcance e indicaciones (tabla 5).

Son las exploraciones de cateterismo, la radiología intervencionista y la cirugía ortopédica los procedimientos de radiodiagnóstico que suponen una exposición más alta, tanto para pacientes como para operadores (ICRP, 1982).

No por muy repetido debemos dejar de mencionar aquí que deben ser desterradas de nuestro arsenal diag-

TABLA 5
Clasificación de las aplicaciones diagnósticas de los rayos X

Radiología clásica

- Radiografía convencional.
- Radioscopia con intensificador de imagen.
- Radiografía dental.

Radiología especializada

- Cateterismo y radiología intervencionista.
- Angiografía.
- Angiografía por sustracción digital.
- Tomografía axial computerizada.
- Mamografía.

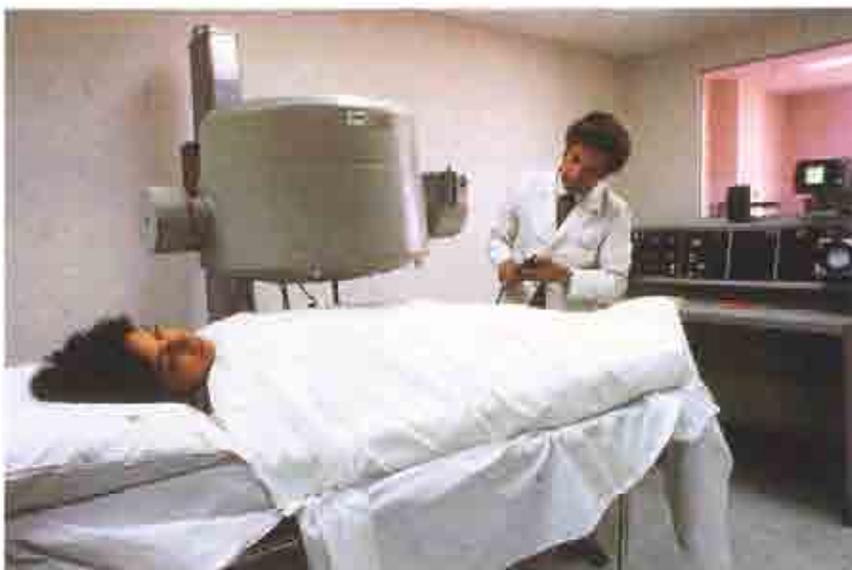
nóstico las exploraciones de escopia sin intensificador de imagen por la elevada dosis de radiación que supone para el paciente y para el médico, así como limitar el resto de las exploraciones a sus indicaciones precisas. Otro procedimiento que ha demostrado tener un rendimiento que no justifica su utilización rutinaria es la práctica de radiografías de tórax en los reconocimientos médicos periódicos preventivos.

Por último, la Resonancia Magnética Nuclear (RMN) utiliza fotones para la formación de las imágenes, pero estos fotones se encuentran en las frecuencias de las ondas de radio y no en las de las radiaciones ionizantes, y, por tanto, como hasta ahora parecen indicar las evidencias acumuladas (Elder, J.A., 1987; NCRP, 1986), se trata de un procedimiento, si no inocuo, si infinitamente menos perjudicial que el empleo de radia-

Habitualmente, la exposición a las radiaciones ionizantes de origen médico es dividida en tres categorías bien diferenciadas: radiodiagnóstico, radioterapia y uso de radioisótopos en Medicina nuclear.

ciones ionizantes. Esto, junto a su resolución, la capacidad de distinguir entre tejidos sanos y enfermos, su versatilidad a la hora de elegir las proyecciones y los planos de corte y la incipiente posibilidad de realizar estudios funcionales, llevará, cuando se solucionen los problemas de costes, a sustituir a gran parte de las actuales técnicas basadas en los rayos X.

— Radioterapia. En este tipo de aplicaciones se aprovecha el poder destructivo que las radiaciones ionizantes ejercen sobre las células vivas, limitándose su utilización en el momento actual casi exclusivamente al campo de la oncología. Dada la mayor radiosensibilidad de la célula neoplásica por su gran velocidad de reproducción y en general su elevado grado de indiferenciación, las células sanas que se ven alcanzadas por la radiación sufren un daño menor, re-



Medicina nuclear.

sultando posible, mediante una adecuada distribución de la radiación en el espacio y en el tiempo, la destrucción del tumor, sin causar daños irreparables al tejido sano circundante.

En este campo se utiliza una gran diversidad de fuentes en función de la naturaleza del tumor, su localización, extensión, etc., clasificándose sus procedimientos en dos categorías: la braquiterapia y la teleterapia con haces de radiación (tabla 6).

TABLA 6 Utilización de radiaciones ionizantes en radioterapia	
Técnica	Fuentes
Braquiterapia	
— Superficial	Sr-90/Y-90
— Endocavitaria	Cs-137
— Intersticial	Ir-197
Terapia con haces de radiación	
— De contacto	Generadores de rayos X (10-50 kV)
— Media tensión	Rayos X (50-150 kV)
— Ortotensión	Rayos X (100-500 kV)
— Teleterapia	Cs-137, Co-60
— Terapia de alta energía	Aceleradores de partículas

En la braquiterapia, la fuente radiactiva encapsulada se sitúa en contacto con el tumor con el fin de concentrar en él la mayor dosis posible, con escasa irradiación del tejido sano. Antiguamente las fuentes estaban constituidas por el radionucleido natural Radio-226, pero, dados sus enormes inconvenientes en lo referente a la protección radiológica (ICRP, 1981), ha sido sustituido por placas de Estroncio-90 en equilibrio con Ytrio-90 en terapia superficial; fuentes de Cesio-137 o Cobalto-60 en terapia endocavitaria, y alambres y horquillas de aleaciones de platino con Iridio-192 en terapia intersticial.

Cuando el tamaño, localización y extensión no hacen factible la utilización de la braquiterapia, se acude a la utilización de haces de radiación externos, abarcando su gama los equipos de rayos X, las fuentes encapsuladas de Cesio-137 y Cobalto-60 y los aceleradores de partículas.

— Uso de radioisótopos en medicina nuclear. Podemos hablar de dos grandes grupos de aplicaciones: el diagnóstico y la terapéutica con radionucleidos en forma de fuentes no encapsuladas.

En el terreno diagnóstico (tabla 7), aprovechando la posibilidad de detectar isótopos radiactivos introducidos en el organismo, se estudian gran cantidad de órganos y funciones. Se suelen utilizar Tecnecio-99m, Galio-67, Talio-201, Iodo-123, etc., ya sea de forma pura o bien marcando determinadas moléculas. Mención especial merece la Tomografía por Emisión de Positrones (TEP), que, a través de la detección de la aniquilación de un positrón emitido por determinados isótopos (Carbono-11, Oxígeno-15 o Flúor-18) y un electrón presente en las estructuras a estudiar, permite el análisis cinético de procesos fisiológicos y bioquímicos, incluyendo volumen y flujo sanguíneo, consumo de oxígeno y sustratos, es decir, grado de actividad. El elevado coste de estas instalaciones hace que hasta la fecha no se haya generalizado su empleo, quedando restringido a unos pocos centros hospitalarios en todo el mundo.

Las técnicas *in vitro* que utilizan radioisótopos poseen un amplio campo de aplicaciones en clínica e investigación. El radioinmunoanálisis conjuga la gran sensibilidad de la detección radiactiva con la especificidad de las reacciones antígeno-anticuerpo y posibilita el análisis cuali-



tativo y cuantitativo de una gran variedad de sustancias: hormonas, tóxicos, fármacos, en los fluidos corporales. Suelen utilizarse como radionucleidos marcadores el Iodo-125, Cromo-51, Hidrógeno-3 y Carbono-14.

Las aplicaciones terapéuticas constituyen la llamada radioterapia metabólica, que se basa en la acumulación de una sustancia radiactiva no encapsulada en el órgano o región a tratar con el fin de depositar allí la dosis de radiación. Las aplicaciones más características residen en el tratamiento de los hipertiroidismos y de neoplasias tiroideas con Iodo-131.

SEGURIDAD Y VIGILANCIA

La necesidad de poner en marcha medidas de vigilancia y control para prevenir la aparición de efectos biológicos adversos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes fue denunciada inicialmente por Russ, en 1916, cuando expuso ante la Roentgen Society, de Londres, las fatales consecuencias que estaban produciéndose entre investigadores y médicos que descuidaban o desconocían los medios de protección. Por ello, ya desde un principio se plantea la imperiosa necesidad de imponer una serie de restricciones y limitaciones en el uso de las radiaciones, y es así como va tomando cuerpo una nueva filosofía, la de la *protección radiológica*, cuya finalidad (ICRP, 1977) es la protección de los individuos, sus descendientes y la humanidad en su conjunto contra

TABLA 7 Aplicaciones diagnósticas de los radionucleidos no encapsulados
Estudios morfológicos
— Gammagrafía (tiroidea, cerebral, hepática, ósea, etc.)
— Cisternografía y ventriculografía cerebral
— Arteriografía, flebografía y linfografía isotópica
— Esplenografía isotópica.
Estudios funcionales
— Estudios de flujo sanguíneo a diferentes órganos
— Estudios de motilidad del tracto digestivo
— Estudios de ventilación - perfusión pulmonares
— Determinación del filtrado glomerular
— Supervivencia eritrocitaria
— Estudios de ferrocinética
— Test de depleción y estimulación tiroidea
— Estudios de absorción digestiva (vitamina B12, grasas, etc.)
— Angiogramografía dinámica hepática.
Estudio "in vitro"
— Determinaciones por RIA de hormonas y fármacos
— Determinación de marcadores tumorales
— Determinación de volemia y equilibrios hidroelectrolítico.

los riesgos que se derivan de las actividades humanas que, por las características de los materiales y equipos que utilizan, pueden implicar irradiaciones.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), cuyas directrices son aceptadas en la mayoría de los países, en las recomendaciones adoptadas en 1977, sentó las bases del Sistema de Protección Radiológica hoy vigente, que debe obedecer a tres criterios generales, que pueden enunciarse:

— Justificación del empleo de la tecnología radiactiva frente a las de tipo convencional, en el sentido de que los beneficios esperados compensen suficientemente el riesgo del daño ocasionado.

— Optimización de los procedimientos, de forma tal que las dosis factibles de ser originadas sean tan bajas como, razonablemente, se pueda lograr con los conocimientos actuales.

— Limitación de la exposición a la radiación, de forma que los niveles alcanzados en el funcionamiento normal de las instalaciones estén dentro de los límites de dosis establecidos tanto para los trabajadores profesionalmente expuestos como para el público en general.

Técnicas de prevención y limitación del riesgo de irradiación externa

Las dosis de radiación recibida por un individuo al permanecer en las proximidades de una fuente radiactiva determinada depende de tres factores fundamentales: la distancia entre la fuente y el individuo, el tiempo de permanencia y la materia interpuesta entre una y otra.

La radiación gamma y los rayos X se propagan en el aire siguiendo la ley de proporcionalidad inversa al cuadrado de la distancia. Fácilmente se comprende, por tanto, que en muchos casos bastará con alejarse suficientemente de la fuente radiactiva o del generador de rayos X para que el nivel de radiación disminuya a valores tolerables que permitan estancias más o menos prolongadas para la realización, en condiciones aceptables de seguridad, de los trabajos u operaciones necesarios. En la práctica esto se consigue eligiendo un emplazamiento adecuado para la instalación y, dentro del mismo, la correcta ubicación del lugar de almacenamiento y de operación con las fuentes de radiación, manejándolas, si es preciso, a distancia mediante

Las dosis de radiación recibida por un individuo al permanecer en las proximidades de una fuente radiactiva determinada depende de tres factores fundamentales: la distancia entre la fuente y el individuo, el tiempo de permanencia y la materia interpuesta entre una y otra.

manipuladores de control remoto, como es el caso de las unidades de cobaltoterapia, aceleradores de partículas y equipos generadores de rayos X; con pinzas, en el caso de disoluciones; e incluso con sistemas automáticos de posicionamiento de fuentes en el caso de Braquiterapia endocavitaria.

En el caso de las partículas α y β debe tenerse en cuenta su limitado alcance en el aire, que depende de su energía inicial. Así, las partículas α más energéticas no atraviesan más de unos pocos centímetros en aire en condiciones normales, y solamente una pequeña proporción de las partículas β emitidas por algunos radionucleidos alcanzan a recorrer, en tales condiciones, una distancia superior a tres metros.

Otro factor a tener en cuenta es el tiempo durante el que una persona va a estar expuesta a un determinado nivel de radiación. Lógicamente, cuanto menor sea el tiempo empleado en las operaciones, menor será la dosis recibida. Por ello es muy

importante que las personas que hayan de operar con fuentes de radiación estén bien adiestradas y conozcan debidamente las operaciones que van a efectuar, con objeto de invertir en ellas el menor tiempo posible.

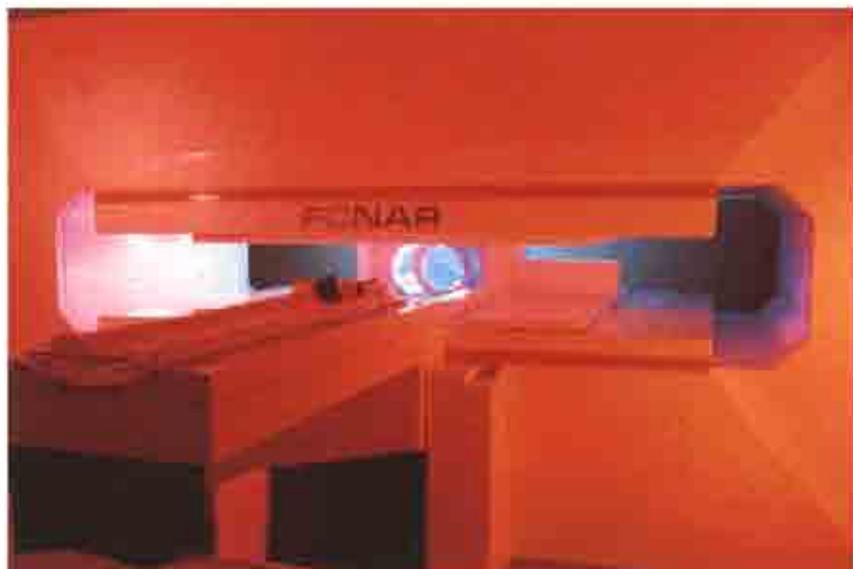
En la práctica son frecuentes las situaciones en que estos dos factores (distancia y tiempo), por sí solos, no bastan para conseguir condiciones de trabajo adecuadas, bien porque a la máxima distancia practicable los niveles de radiación sigan siendo demasiado altos, o bien porque el tiempo a emplear en la operación haya de ser prolongado. En tales casos se precisa interponer entre la fuente de radiación y las personas potencialmente expuestas un blindaje constituido por material absorbente de composición y espesor apropiados en función de la radiación que estemos utilizando (tabla 8). Bastará una hoja de papel para detener la radiación α ; y la β sería totalmente absorbida por algunos centímetros de un material ligero, como madera, vidrio o plástico. Para construir, en cambio, un blindaje adecuado para los rayos X o la radiación gamma es preciso emplear materiales más pesados (plomo, hormigón). El empleo de blindajes es generalmente el recurso preferido, ya que proporciona unas condiciones de trabajo intrínsecamente seguras y evita continuos controles administrativos para imponer a los trabajadores tiempos y distancias determinados en cada operación.

De una forma práctica, las medidas encaminadas a minimizar en lo posible el riesgo de irradiación externa procedente del uso de equipos generadores de radiaciones, fuentes encapsuladas y, en menor medida, de fuentes no encapsuladas pueden ser resumidas en:

— Emplear la cantidad mínima posible de material radiactivo o cuidar de que se produzca la mínima cantidad de radiaciones, en el caso de los

TABLA 8
Espesores de semi-reducción para rayos X y gamma (cm)

Material	Energía			
	0,5 MeV	1 MeV	2 MeV	4 MeV
Agua	7	10	14	20
Hormigón	2	4,4	6,7	8,8
Aluminio	3	4	6,1	8,2
Hierro	1	1,4	2,2	2,6
Uranio	0,2	0,45	0,8	0,9
Plomo	0,43	0,9	1,4	1,5



Resonancia magnética nuclear.

equipos generadores, compatibles con la información o con el efecto que se desea obtener.

— Limitar al mínimo necesario el tiempo de las operaciones y de permanencia de las personas en las proximidades del manantial radiactivo, limitando asimismo el número de trabajadores expuestos, siempre que sea compatible con la seguridad de la operación a realizar.

— Mantener la mayor distancia posible entre la fuente de radiación y las personas, de manera que sea compatible con métodos eficaces de trabajo.

— Utilizar un blindaje adecuado entre el manantial y las personas, bien sean profesionalmente expuestos o miembros del público.

— Realizar un análisis detallado de los accidentes posibles y adoptar las correspondientes medidas de emergencia.

— Efectuar la vigilancia radiológica de las zonas de trabajo y del personal profesionalmente expuesto de forma periódica.

Técnicas de prevención y limitación del riesgo de contaminación

La contaminación interna provocada por la incorporación al organismo de material radiactivo es siempre un problema delicado debido a que no desaparece hasta que el material decae o es eliminado biológicamente. Por ello, el control más efectivo del riesgo de contaminación consiste en prevenir la entrada de productos radiactivos; es decir, esen-

cialmente, es un problema de confinamiento y de limpieza.

Los métodos y medidas más importantes que se adoptan para el control y prevención del riesgo de contaminación son, esencialmente, cinco: diseño y equipamiento de las instalaciones, sistema de ventilación eficaz, procedimientos de descontaminación, uso de prendas y equipos de protección personal y unos correctos hábitos del personal.

En primer lugar, las instalaciones deben estar diseñadas y equipadas de forma tal que sea mínimo el riesgo con que se lleven a cabo las operaciones: a tal fin, y en función de la cantidad y características de los radioisótopos a manipular, la instalación deberá contar con vitrinas de humos, cajas de guantes, equipos de descontaminación, recipientes para residuos radiactivos, etc.

Los sistemas de ventilación tienen por objeto la renovación continua del aire para diluir y evacuar las posibles sustancias nocivas que puedan quedar en suspensión. El aire de ventilación que debe garantizar un caudal adaptado al grado de contaminación previsible ha de pasar una sola vez por la zona que se trate, estando los puntos de entrada y salida suficientemente separados para evitar toda recirculación, y las salidas dotadas de filtros que impidan el vertido de los contaminantes a la atmósfera.

El problema de la descontaminación debe abordarse ya en el diseño de las instalaciones, proyectando los equipos y superficies de trabajo de forma que sean fácilmente descontaminables, debiendo completarse con el empleo de prendas protectoras e instrumentos de detección.

Las prendas de protección personal incluyen las batas de laboratorio, monos, delantales impermeables, guantes de goma, zapatos y charcos, cubrecalzados, máscaras de papel o con filtros de lana de resina o carbón activado, etc.

No hay que olvidar que en toda instalación radiactiva se debe disponer de un vestuario debidamente acondicionado para el cambio de ropas y prendas protectoras, así como de un servicio de ducha, además de recipientes destinados a la recogida de prendas contaminadas y, si fuera preciso, detectores de contaminación de manos, pies y ropa.

Por último, cuando se trabaja con radioisótopos no encapsulados se impone una estricta limpieza personal, dado que una de las vías de contaminación es a través de la piel o por ingestión de productos contaminados; de ahí que el personal haya de adquirir y cumplir unos buenos hábitos, entre los que caben destacar:

— No introducir en las zonas activas prendas que no sean las de trabajo, ni comida, ni bebida.

— No comer, beber ni fumar en las zonas de trabajo.

— Ducharse al final de la jornada laboral y lavarse cuidadosamente las manos antes de fumar, beber o comer.

— Usar y mantener en buen estado el equipo de protección personal.

— Utilizar los dosímetros personales y los instrumentos de trabajo precisos, cumpliendo todas las instrucciones y normas de protección establecidas.

En resumen, para luchar contra el riesgo de contaminación en la manipulación de fuentes radiactivas no encapsuladas, además de seguir las recomendaciones mencionadas en el apartado dedicado al riesgo de irra-

El empleo de blindajes es generalmente el recurso preferido para reducir el riesgo de irradiación externa, ya que proporciona unas condiciones de trabajo intrínsecamente seguras y evita continuos controles administrativos para imponer a los trabajadores tiempos y distancias determinados en cada operación.

diación externa, deben ponerse en práctica las siguientes medidas:

— Realizar la manipulación de radioisótopos no encapsulados dentro de recintos especiales, tales como vitrinas y cajas de guantes dotados de sistemas de ventilación e instrumentos de trabajo apropiados.

— Delimitar y confinar los posibles derramamientos de sustancias radiactivas dentro de recipientes o superficies bien definidas y de material fácilmente descontaminable.

— Tener previstas, ante la posibilidad de un derrame incontrolado, las medidas oportunas para evitar la propagación de la contaminación a otras superficies, efluentes, ropa, aire, etc.

— Seguir procedimientos de trabajo correctos y practicar la limpieza y descontaminación regular de los lugares de trabajo y los equipos e instrumentos utilizados.

— Efectuar controles periódicos para garantizar que el grado de contaminación del aire, superficies, efluentes y personal se mantiene dentro de los márgenes previstos, siempre por debajo de los límites establecidos.

Control y vigilancia radiológica

La vigilancia radiológica constituye parte esencial de todo programa de prevención de riesgos de las instalaciones radiactivas para poder garantizar que ni los trabajadores ni el público en general reciban dosis de radiación indebidas o superiores a los límites establecidos (Real Decreto 1.753/1987, de 25 de noviembre) (tabla 9).

Generalmente, el control se efectúa a dos niveles: la vigilancia radiológica individual de las personas pro-

Límites especiales de dosis	
Menores de 18 años (sólo estudiantes y aprendices, y siempre mayores de 16 años)	3/10 de los límites
Mujeres en condiciones de procrear (dosis en el abdomen)	13 mSv al trimestre
Mujeres gestantes (dosis al feto)	10 mSv en embarazo

fesionalmente expuestas y la vigilancia de las zonas de trabajo.

La vigilancia radiológica individual de las personas profesionalmente expuestas se practica controlando la radiación externa recibida, mediante la dosimetría personal, y la contaminación interna del organismo, mediante análisis de bioeliminación y determinaciones en contadores de radiactividad de cuerpo entero. El sistema de dosimetría personal consiste en determinar la dosis de irradiación

Los métodos y medidas más importantes que se adoptan para el control y prevención del riesgo de contaminación son, esencialmente cinco: diseño y equipamiento de las instalaciones, sistema de ventilación eficaz, procedimientos de descontaminación, uso de prendas y equipos de protección personal y unos correctos hábitos del personal.

externa recibida por las personas con una periodicidad no superior a un mes, ya sea mediante la lectura del dosímetro personal que porta el trabajador profesionalmente expuesto, clasificado en la categoría A, o mediante la dosimetría de área en personas de categoría B (tabla 10). La vigilancia de la incorporación de radionucleidos se suele efectuar indirectamente mediante el análisis de excretas por métodos radioquímicos, o directamente en contadores de radiactividad corporal.

Además, los trabajadores han de ser sometidos a exámenes médicos con periodicidad no superior a un año para comprobar su estado general y determinar especialmente el estado y función de los órganos expuestos a la radiación. Reconocimientos médicos adicionales deberán realizarse siempre que se sospeche que ha tenido lugar una irradiación anormal. En estos reconocimientos se efectuarán todas las exploraciones que se consideren necesarias en relación con las características de la exposición (CSN, 1986).

Para tener la certeza de que se opera dentro de los márgenes de se-

TABLA 9
Límites anuales de dosis equivalentes

Personas profesionalmente expuestas		Miembros del público
Exposición total y homogénea del organismo	50 mSv	5 mSv
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Mano, antebrazo, tobillo y pie	500 mSv	50 mSv
Cualquier otro órgano o tejido considerado individualmente	500 mSv	50 mSv

TABLA 10
Clasificación de las personas profesionalmente expuestas

Se consideran profesionalmente expuestas aquellas personas que por las circunstancias en que se desarrolla su trabajo, bien sea de modo habitual u ocasional, están sometidas a un riesgo de exposición susceptible de entrañar dosis anuales superiores a 1/10 de los límites anuales de dosis.

- Categoría A: Por las condiciones de su trabajo no es improbable que reciban dosis superiores a 3/10 de los límites anuales.
- Categoría B: Por las condiciones de su trabajo es muy improbable que reciban dosis superiores a 3/10 de los límites anuales.

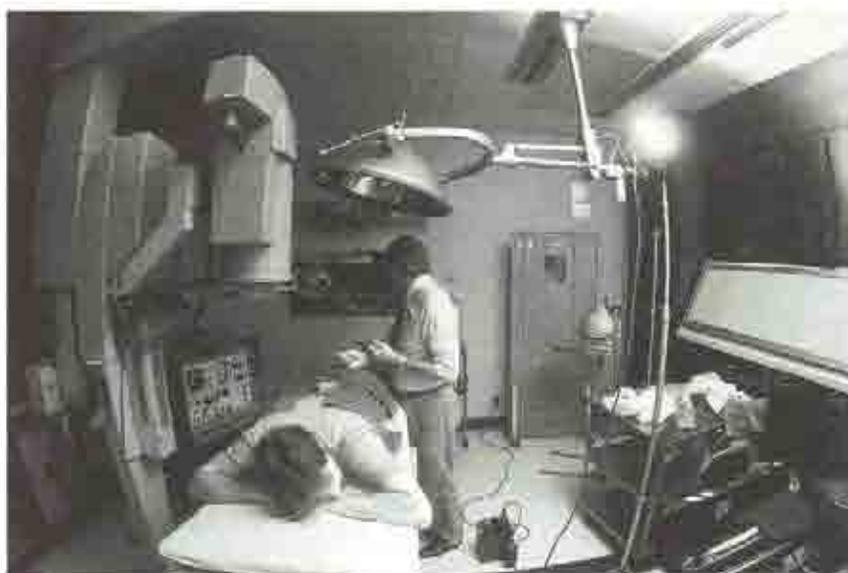
Reales Decretos 2.519/1982 y 1.753/1987.

guridad preestablecidos es preciso evaluar constantemente las condiciones radiológicas en las zonas de trabajo, que de forma general incluyen la determinación de los niveles de radiación, la vigilancia del aire, la comprobación de la estanqueidad de las fuentes encapsuladas, la medida de la contaminación en superficies y el control radiológico de los efluentes.

En relación a los niveles de radiación o posibilidades de contaminación, con objeto de facilitar el control, las zonas de trabajo se vienen clasificando como zonas vigiladas y zonas controladas, pudiendo distinguirse dentro de estas últimas zonas de permanencia limitada y zonas de acceso prohibido (tabla 11), que como tal deben ser adecuadamente señalizadas.

GESTION DE RESIDUOS RADIATIVOS

Para garantizar razonablemente la ausencia de riesgos en las aplicaciones de las radiaciones ionizantes no sólo es necesario controlar el funcionamiento normal de las instalaciones y prevenir los posibles accidentes, sino que, además, es preciso controlar los residuos radiactivos pro-



ducidos en las mismas, dándoles un tratamiento adecuado y, en su caso, transportándolos en condiciones de seguridad y almacenándolos en lugares seguros a muy largo plazo. Todo ello constituye la denominada gestión de residuos.

El tratamiento al que deben ser sometidos los residuos suele basarse, según los casos, en alguno de los tres procedimientos siguientes:

- Retención temporal de aquellos residuos que contengan radionucleidos de período corto, para que su actividad decaiga a valores que permitan su dispersión al ambiente.
- Dilución en sustancias inertes y dispersión al ambiente dentro de los límites y condiciones establecidas.
- Concentración y contención de residuos que no pueden ser dispersados bien por su forma física, por su alta actividad o por su contenido isotópico.

La gestión de residuos en medicina, más que una cuestión de tratamiento complicado, es un problema de clasificación correcta, buena administración de los mismos y control riguroso de las evacuaciones; todo ello llevado a cabo por personal responsable y expresamente designado, dejando constancia en los correspondientes registros.

En función de su forma física, los residuos radiactivos deben ser clasificados en residuos sólidos, líquidos y gaseosos.

Tratamiento de residuos sólidos

El destino final de este tipo de residuos sólo puede ser su evacuación,

si es posible lograr un decaimiento tal de su actividad que puedan ser tratados como residuos convencionales, o su almacenamiento definitivo en lugares acondicionados y autorizados.

En Medicina, la mayoría de estos residuos son susceptibles de llegar a un decaimiento suficiente como para hacer innecesario elevar los costes y ocupar espacio en los almacenamientos con materiales que propiamente no son radiactivos. Por otra parte, tomar la decisión de evacuarlos requiere un control riguroso de todos los pasos para garantizar una baja actividad específica en el momento de la evacuación y disponer de autorización para ello. En caso de no poder ser evacuados, los residuos deben ser compactados, ocupando el menor volumen posible, y envasados con un blindaje que posibilite su transporte sin riesgos hasta su lugar de almacenamiento definitivo.

La composición y naturaleza de estos residuos sólidos puede ser muy variada: fuentes encapsuladas defectuosas o parcialmente agotadas, viales contaminados, algodones, papeles absorbentes, jeringas, generadores de radioisótopos, ropa de cama, pijamas, equipos de protección, etc.

Tratamiento de residuos líquidos

Los residuos líquidos de baja actividad pueden ser descargados controladamente al alcantarillado general, previa dilución si es necesario. Otros residuos más activos precisan ser retenidos por periodos más o menos prolongados para que decaiga convenientemente su actividad. Ello

TABLA 11

Clasificación de las zonas de trabajo

Zona vigilada

Zonas donde no es improbable recibir dosis superiores a 1/10 de los límites establecidos.

No es obligatorio el uso de dosímetros personales, pero sí la realización de dosimetría de área.

Zona controlada

Zonas donde no es improbable recibir dosis superiores a 3/10 de los límites establecidos.

Es obligatorio el uso de dosímetros personales.

— Zonas de permanencia limitada:

Existe riesgo de recibir en una exposición única dosis superiores al límite anual.

Limitación del tiempo de operación.

— Zonas de acceso prohibido:

Existe riesgo de recibir en una exposición única dosis superiores a los límites anuales.

Para poder acceder a ellas, habrá que reducir previamente los niveles de radiación por medios técnicos.



exige en general depósitos apropiados provistos de métodos de detección de fugas con doble contención o bandejas de recogida. Cuando en un período razonable de tiempo no se reduce suficientemente la actividad de los residuos, se recurre a procedimientos previos de separación, concentración y solidificación que permitan reducir su volumen y tratarlos como residuos sólidos.

En general, estos residuos están constituidos por restos de radioisótopos no utilizables, desechos de estudios de RIA, excretas de pacientes sometidos a terapia metabólica, agua procedente de procesos de descontaminación, etc.

Tratamiento de residuos gaseosos

Cuando la radiactividad se debe a la presencia de partículas en suspensión, el tratamiento más adecuado es la filtración, después de la cual los gases filtrados pueden ser dispersados a la atmósfera. Debe tenerse en cuenta que, tras retener sustancias radiactivas, el filtro, al ser sustituido, se convierte en desecho radiactivo. Cuando se trata de gases radiactivos propiamente dichos, deben realizarse diluciones suficientes para poder ser evacuados, y si aún no es posible, utilizar mecanismos físico-químicos específicos de separación y adsorción.

Para garantizar razonablemente la ausencia de riesgos en las aplicaciones de las radiaciones ionizantes, no sólo es necesario controlar el funcionamiento normal de las instalaciones y prevenir los posibles accidentes, sino que, además, es preciso controlar los residuos radiactivos producidos en las mismas, dándoles un tratamiento adecuado y, en su caso, transportándolos en condiciones de seguridad y almacenándolos en lugares seguros a muy largo plazo. Todo ello constituye la denominada gestión de residuos.

BIBLIOGRAFIA

- Beir: *Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, National Research Council: The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation*. National Academy Press, Washington, 1980.
- CSN: *Bases para la vigilancia médica de los trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes*. Guía de Seguridad núm. 7.4 del Consejo de Seguridad Nuclear, 1986.
- Elder, J. A.: *Radiofrequency Radiation Activities and Issues: a 1986 perspective*.

Health Physics, Vol. 53, pp. 607-611, 1987.

IAEA-TECDOC-366: *What the general practitioner should know about medical handling of overexposed individuals*. IAEA, Vienna, 1986.

ICRP: *The Principles and General Procedures for Handling Emergency and Accidental Exposures of Workers*. ICRP Publication 28, Pergamon Press, Oxford, 1977.

ICRP: *Protection Against Ionizing Radiation from External Sources Used in Medicine*. ICRP Publication 33, Pergamon Press, Oxford, 1981.

ICRP: *Protection of the Patient in Diagnostic Radiology*. ICRP Publication 34, Pergamon Press, Oxford, 1982.

ICRP: *Nonstochastic Effects of Ionizing Radiation*. ICRP Publication 41, Pergamon Press, Oxford, 1984.

Kumazawa, S.: *Occupational exposure to ionizing radiation in the United States*. Office of Radiation Programs, Washington, 1983.

Mettler, F. A.: *Medical Effects of Ionizing Radiation*. Grune & Stratton, Inc., Orlando, 1985.

Ministerio de Sanidad y Consumo: *Protección Radiológica. Parte general*. Guías de Sanidad Ambiental, 1986.

Ministerio de Sanidad y Consumo: *Protección Radiológica. Radiodiagnóstico*. Guías de Sanidad Ambiental, 1986.

Ministerio de Sanidad y Consumo: *Protección Radiológica. Radioterapia*. Guías de Sanidad Ambiental, 1986.

Ministerio de Sanidad y Consumo: *Protección Radiológica. Medicina Nuclear*. Guías de Sanidad Ambiental, 1986.

San Segundo, T.T.: *Consideraciones en torno a las aplicaciones pacíficas de la radiactividad*. Rev. Energía Nuclear, 138, pp. 285-302, 1982.

Unsclear: *Radiation. Doses, Effects, Risks*. United Nations, New York, 1985.

Unsclear: *Ionizing radiation: sources and biological effects*. United Nations, New York, 1982.

Upton, A. C.: *Radiaciones de bajo nivel y sus efectos biológicos*. Investigación y Ciencia, Barcelona, 1982.