

LA RADIACIÓN, LA GENTE Y EL AMBIENTE





La presente publicación tiene como propósito poner al alcance de la sociedad información básica sobre la energía nuclear, de manera de poder construir parámetros de normal aceptación sobre esta materia. La publicación contiene un enfoque general sobre la radiación ionizante, sus aplicaciones y efectos, así como también sobre las medidas por introducir para su uso seguro.

Uno de nuestros propósitos es promover la conservación del medio ambiente fomentando prácticas para la producción y utilización de fuentes de energía menos contaminantes. Como organización no gubernamental, participamos especialmente en la promoción y difusión del desarrollo del potencial de la fisión y fusión nucleares de manera sostenible, segura y rentable, pretendiendo capacitar a la comunidad a través de actividades específicas en los ámbitos del trabajo y la educación, sobre los alcances y los retos de la energía nuclear en el mundo de hoy.

Fundación T.E.A.

Trabajo, Educación, Ambiente

LA RADIACIÓN, LA GENTE Y EL AMBIENTE

UN ENFOQUE GENERAL SOBRE LA RADIACIÓN
IONIZANTE, SUS APLICACIONES Y EFECTOS Y
SOBRE LAS MEDIDAS QUE SE DEBEN TOMAR
PARA SU USO SEGURO.

LA RADIACIÓN, LA GENTE Y EL AMBIENTE

es una publicación de

FUNDACIÓN T.E.A. – TRABAJO, EDUCACIÓN, AMBIENTE

con el auspicio de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRES DE FEBRERO (UNTREF)

Traducción del inglés: Máximo Rudelli

Edición: Mónica Nosetto

Diseño interior: Mónica Nosetto

Diseño de tapa: Martín Feijoo

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA

La radiación, la gente y el ambiente: un enfoque general sobre la radiación ionizante, sus aplicaciones y efectos y sobre las medidas que se deben tomar para su uso seguro. –1ª ed. –

Buenos Aires: Fundación TEA – Trabajo, Educación, Ambiente, 2007. 140 p.: il.; 20x19 cm.

ISBN 978-987-23951-0-0

1. Medio Ambiente. 2. Radiación Ionizante. I. Título
CDD 304.28

Fecha de catalogación: 02/10/2007

"This document uses material originally published in the English language. This is not an International Atomic Energy Agency (IAEA) authorized translation. The IAEA shall not be responsible for any discrepancies or inconsistencies that this translation may have in respect of the original English document. The IAEA makes no warranty and assumes no responsibility for the accuracy or quality or authenticity or workmanship of the translation/publication/printing of this publication and accepts no liability for any loss or damage consequential or otherwise howsoever caused arising directly or indirectly for the use thereof whatsoever and to whomsoever."

Esta publicación es una versión libre de "Radiation, People and the Environment" publicado en inglés, por el Organismo Internacional de Energía Atómica, en 2004. El OIEA ha autorizado a la Fundación TEA para traducir el contenido de dicha publicación, pero no se responsabiliza de cualquier discrepancia o inconsistencia que tenga respecto al original en lengua inglesa, así como tampoco ofrece garantías o responde por la exactitud, autenticidad o calidad de la traducción, publicación o impresión de este material ni acepta responsabilidad por cualquier pérdida o daño en consecuencia –o de cualquier manera causado directa o indirectamente– por su uso.

FUNDACIÓN T.E.A.
TRABAJO, EDUCACIÓN, AMBIENTE

CONSEJO DE ADMINISTRACIÓN

PRESIDENTE

Carlos PALACIO

VICEPRESIDENTE

Guillermo MICO

SECRETARIA

María E. PI DE LA SERRA

TESORERO

Pablo PALLADINO

VOCALES

Dolly LOPEZ

Rubén QUIJANO

Luis RODRIGUEZ

CONSEJO ACADÉMICO

Jorge BERTONI

Máximo RUDELLI

María I. SANTORUN

María L. PERAGALO

Arnaldo BLUMENKRANTZ

Roberto SOLANILLA

María G. ALSINA

Martín PALLADINO

ÍNDICE

	PRÓLOGO	9
CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	13
	Riesgos y beneficios	14
	Preocupación general	14
CAPÍTULO 2	ÁTOMOS Y RADIACIÓN	17
	Estructura de la materia	17
	Radiactividad y radiaciones	18
	Tipos de radiación	22
CAPÍTULO 3	RADIACIÓN Y MATERIA	25
	Ionización en los tejidos	26
	Magnitudes dosimétricas	28
CAPÍTULO 4	FUENTES DE RADIACIÓN IONIZANTE	31
CAPÍTULO 5	EFFECTOS DE LA RADIACIÓN	35
	Inducción de cáncer	36
	Evaluación del riesgo	37
	Factores del riesgo de cáncer	38
	Enfermedad hereditaria	42
	Riesgo colectivo	44
	Irradiación durante el embarazo	44

CAPÍTULO 6	SISTEMA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA	47
	Principios generales	47
	Alcance de la aplicación	49
	Justificación de la práctica	50
	Optimización de la protección	52
	Limitación de la dosis	54
	Normas básicas internacionales de seguridad	55
	Infraestructura reguladora	55
CAPÍTULO 7	RADIACIÓN NATURAL	57
	Radiación cósmica	57
	Radiación gamma terrestre	58
	Inhalación del radón	60
	Irradiación interna	62
	Dosis total	62
CAPÍTULO 8	USO DE LA RADIACIÓN EN MEDICINA	63
	Radiología	64
	Medicina nuclear	66
	Radioterapia	67
	Niveles de orientación para la exposición médica	69
	Dosis total	70
CAPÍTULO 9	EXPOSICIÓN OCUPACIONAL	71
	Fuentes artificiales	73
	Fuentes naturales	75
	Dosis total	76
CAPÍTULO 10	CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	77
	Ensayos de armas nucleares	78
	El accidente de Chernóbil	80
	Emisiones radiactivas	84
	Uranio empobrecido	86
	Gestión de áreas contaminadas	87
	Dosis total	88

CAPÍTULO 11	GENERACIÓN NUCLEOELÉCTRICA	89
	Centrales nucleares	89
CAPÍTULO 12	GESTIÓN DE LOS DESECHOS RADIATIVOS	95
	Clausura	99
	Criterios para la disposición final	100
	Otras prácticas de gestión de desechos	101
CAPÍTULO 13	EMERGENCIAS	103
	Emergencias nucleares	104
	Contra medidas	106
	Criterios para la intervención	108
	Información al público	108
	Otras emergencias radiológicas	110
CAPÍTULO 14	RIESGOS DE LAS FUENTES DE RADIACIÓN	111
	Accidentes con fuentes de radiación	111
	Contaminación causada por fuentes extraviadas	113
	Dispersión intencional de material radiactivo	114
CAPÍTULO 15	TRANSPORTE DE MATERIALES RADIATIVOS	115
APÉNDICE I	GLOSARIO	119
APÉNDICE II	SÍMBOLOS Y UNIDADES	133
	BIBLIOGRAFÍA	137

PRÓLOGO

A través de la historia, la capacidad del hombre para vivir en armonía con su entorno ha dependido de su habilidad para disponer y administrar los recursos de la naturaleza. El desarrollo de la primera revolución industrial ha permitido integrar como nunca antes los recursos naturales y el trabajo bajo el imperativo de la mayor producción. De allí en adelante, la evolución de la sociedad y de la economía no ha tenido un punto de retorno. El imperativo de la mayor productividad y del bienestar y el confort ha sido lo predominante en las últimas décadas; tan predominante que hoy se cuestiona a éstos como causas casi excluyentes de la falta de sustentabilidad del hábitat donde nos encontramos.

Este fenomenal crecimiento de la producción de bienes, de las comunicaciones, de la ciencia y de la técnica, tiene como principal anclaje aunque no único, la utilización de recursos naturales no renovables para la producción de energía. Esta sobre utilización de recursos y de producción contribuyó a lo que hoy denominamos el cambio climático, provocado principalmente por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero originados en los procesos de generación eléctrica y en el transporte: vehículos con motor de combustión interna.

Este problema está siendo visto en la actualidad, como uno de los más serios que enfrenta la humanidad. Hoy los líderes planetarios deben debatir como garantizar un mundo para todos sin que esto signifique resignar desarrollo tecnológico. Como proveer de suficiente energía sustentable a un creciente número de población, diez mil millones de habitantes hacia mediados de siglo, y simultáneamente atacar el problema de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La preocupación ya dejó el plano del simple esbozo teórico para pasar al campo de las relaciones internacionales. Existe un acuerdo por parte de la casi totalidad de los países del mundo, expresado en el Protocolo de Kyoto, por el cual los estados se comprometen a tomar una serie de medidas tendientes a reducir la emisión de gases de efecto invernadero, para el año 2012. Sin embargo, en el campo práctico es poco lo que se ha avanzado.

El enfrentamiento entre países desarrollados y aquellos que luchan por su desarrollo parece encontrarse en este plano, en un muy primerísimo estadio. Los primeros, saturados de consumo y llevando la delantera en la aplicación de tecnología, pretenden esfuerzos y restricciones de aquellos que pugnan por alcanzar un mínimo nivel de bienestar para su población. Los segundos, consideran que no son responsables del daño y que los cambios en los modos de producción los llevarían a un estado inicial del capitalismo productivo que llevaría a foja cero sus planes de crecimiento y desarrollo económico.

Puesto en estos términos, el enfrentamiento se presenta como un juego de suma cero donde nadie está dispuesto a ceder, en tanto ya comprobamos mediante varias catástrofes naturales que es el planeta, o sea la humanidad sin distinción, la que está perdiendo algo más que consumo y bienestar: está perdiendo su propia oportunidad de construir futuro.

Pero existe un modo de generar energía confiable, segura, sustentable, económica y en cantidad, que no sólo garantice las actuales condiciones y modos de vida y producción imperantes en el mundo si no además, ayude a preservar el hábitat y poner un punto final a la depredación de recursos naturales y del medio ambiente. Ese modo incluye prioritariamente a la energía nuclear.

Encuestas de opinión desarrolladas en varios países, indican que la energía nuclear es percibida como una fuente limpia, segura y confiable para producir electricidad,

dato acreditado además por la existencia de más de 400 centrales en operación en el mundo entero. Pero lo que también señalan dichas encuestas es que en un alto porcentaje, la comunidad desconoce cuáles son los principios de la energía nuclear, sus fortalezas, sus ventajas sobre otras fuentes de energía, llegando incluso al colmo de la desinformación cuando se asocia una central nuclear con una bomba atómica.

De esta manera, los pequeños dramas acumulables debidos al cambio climático, con sus efectos devastadores en pérdidas económicas, de vidas y de desplazamientos de poblaciones enteras, se presentan como tolerables y hasta aceptables frente a la hipotética tragedia que podría representar el uso de energía nuclear, ante el desconocimiento y la desinformación reinante en relación con ella.

Uno de los propósitos de la *Fundación T.E.A. – Trabajo, Educación, Ambiente* – es promover la conservación del medio ambiente fomentando prácticas para la producción y utilización de fuentes de energía menos contaminantes. Como organización no gubernamental, participamos especialmente en la promoción y difusión del desarrollo del potencial de la fisión y fusión nucleares de manera sostenible, segura y rentable, pretendiendo capacitar a la comunidad a través de actividades específicas en los ámbitos del trabajo y la educación, sobre los alcances y los retos de la energía nuclear en el mundo de hoy.

La presente publicación de *“La radiación, la gente y el ambiente”*, tiene como propósito poner al alcance de la sociedad información básica sobre la energía nuclear, de manera de poder construir parámetros de normal aceptación sobre esta materia. La publicación contiene un enfoque general sobre la radiación ionizante, sus aplicaciones y efectos, así como también sobre las medidas por introducir para su uso seguro. A lo largo de sus capítulos, se describen en forma simple los conceptos de radiación y materia, el efecto de las radiaciones, el sistema de protección radiológica, el uso de la radiación en medicina, la contaminación ambiental, las centrales nucleares y la gestión de los desechos radiactivos, entre otros.

La necesidad de crear conciencia en torno al límite en el que se encuentra el planeta y las alternativas existentes para detener los daños y al mismo tiempo, garantizar a todos los habitantes del mundo niveles dignos de desarrollo, es una tarea que debe ser liderada por el mundo educativo más que por ningún otro sector.

Difundir el conocimiento existente, hacerlo asimilable y comprensible para todos y comprometer al mundo académico y científico en esta labor, ayudará a construir consensos, a juzgar en forma equilibrada las oportunidades y las amenazas y a desterrar falsos mitos y creencias sobre los retos de la energía nuclear.

El *Consejo Mundial de Energía* concluye que no se podrá alcanzar el objetivo de un futuro energético sustentable sin el concurso de la energía nuclear como fuente no emisora de gases, capaz de producir electricidad en gran escala y favorecer la estabilización de emisiones de CO₂. Quienes no comparten este criterio, argumentan que el aumento de las centrales nucleares significaría al mismo tiempo la probabilidad de una mayor proliferación de artefactos bélicos. Es de esperar que en un futuro inmediato se pueda afianzar y perfeccionar la aplicación de los tratados internacionales que hacen a la no proliferación de armas nucleares.

La *Fundación TEA*, en cumplimiento de sus objetivos y con la autorización del *Organismo Internacional de Energía Atómica*, pone a disposición de la comunidad en general este volumen, con el fin de aportar herramientas esclarecedoras para el debate de la sociedad, sobre las particularidades asociadas con la energía nuclear y con las energías alternativas en general, en pos de lograr el desarrollo humano y la preservación del medio ambiente.

La radiación es parte de la naturaleza y, por lo tanto, es inseparable de nuestra realidad. En el mundo en que vivimos, la radiación está presente en todas partes: la luz y el calor de las reacciones nucleares en el Sol son esenciales para nuestra existencia, los materiales radiactivos naturales se encuentran en el medio ambiente y por esa razón nuestros cuerpos contienen sustancias radiactivas como el carbono 14, el potasio 40 y el polonio 210. Más aún, la vida en la Tierra ha evolucionado en presencia de la radiación.

Desde que se descubrieron los rayos x y el fenómeno de la radiactividad, hace más de 100 años, se han inventado distintas formas para producir artificialmente tanto radiación como materiales radiactivos. El primer uso que se les dio a los rayos x fue para realizar diagnósticos médicos. Esto ocurrió a sólo seis meses de su descubrimiento en 1895, así es que, casi en forma inmediata, se estableció la utilidad benéfica de la radiación, aunque

desde inicios del siglo XX, los médicos y radiólogos comenzaron a aprender sobre sus potenciales riesgos, cuando algunos de ellos se expusieron indebidamente a la radiación x. Desde entonces, se desarrollaron cuantiosas aplicaciones de la radiación y los materiales radiactivos.

La radiación se clasifica en *ionizante* y *no ionizante*, según el efecto que produce en la materia. La radiación ionizante incluye los rayos cósmicos, los rayos x y la emitida por los materiales radiactivos. La radiación no ionizante comprende la luz ultravioleta, el calor, las ondas radiofónicas y las microondas.

Esta publicación trata sobre la radiación ionizante, término que con frecuencia, por simplicidad, se abrevia a radiación. Fue elaborada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en colaboración con el ex *National Radiological Protection Board* (en la actualidad parte integrante de la *Health Protection Agency*) del Reino Unido, como

Algunos usos de la radiación ionizante

Diagnóstico y tratamiento médico

Generación nucleoelectrónica

Radiografía industrial

Esterilización de equipamiento médico

Irradiación de alimentos

Baterías para satélites

Investigación científica y médica

una visión general del tema: Radiación ionizante, sus usos y efectos, así como las precauciones que se deben tomar para utilizarla de manera segura.

En su carácter de organismo de las Naciones Unidas, en ciencias nucleares y sus aplicaciones pacíficas, el OIEA brinda un amplio espectro de conocimientos y de programas para promover internacionalmente la utilización segura de las fuentes de radiación. Tiene la responsabilidad legal de desarrollar las normas de seguridad aplicables a la enorme variedad de usos de la radiación. Además, presta ayuda a sus Estados Miembros para la implementación de dichas normas, mediante proyectos de cooperación técnica, como cursos de capacitación y servicios de asesoramiento. También, posibilita el intercambio de información, mediante conferencias y publicaciones, como la presente.

Riesgos y beneficios

Se necesita establecer los riesgos y beneficios de cualquier práctica que involucre radiación, para poder hacer una evaluación bien fundada sobre su uso y reducir al mínimo todo riesgo. El descu-

brimiento de la radiación ionizante y los materiales radiactivos condujo a adelantos espectaculares, tanto en las áreas de diagnóstico como de tratamiento médico y para una gran cantidad de procedimientos en la industria, la agricultura, y la investigación. Sin embargo, las personas deben protegerse de la exposición excesiva o innecesaria a la radiación, ya que ésta puede ser nociva para los seres humanos. Por eso, en cada circunstancia controlable, es necesario hacer un cuidadoso balance del riesgo y del beneficio de los procedimientos que exponen a los individuos a la radiación.

Preocupación general

La mayor preocupación sobre la radiación ionizante se basa en su potencial para causar una enfermedad maligna en las personas expuestas y defectos hereditarios a sus progenies. La probabilidad de semejantes consecuencias depende de la cantidad de radiación que una persona recibe, independientemente de que la exposición provenga de una fuente natural o de una artificial. Como durante las últimas décadas se ha profundizado la comprensión de los efectos de la ra-

diación ionizante, se ha desarrollado un sistema de protección radiológica para resguardar a las personas de los posibles daños que ésta puede causar. A pesar de ello, comúnmente, la inquietud de la gente persiste.

La radiación es una causal, entre muchas otras, de una enfermedad muy temida: el cáncer. El hecho que nuestros sentidos no pueden detectar la radiación, hace que parezca aún más insidioso ese riesgo intangible. La preocupación colectiva se incentiva con la memoria de los accidentes ocurridos en centrales nucleares y otras instalaciones —y en algunos casos, con los efectos consecuentes de estos— además de que existe la tendencia común

de asociar a cualquier clase de radiación con todo lo "nuclear", incluyendo las armas nucleares.

Otros hechos que contribuyen con esa generalizada sensación de peligro acerca de la radiación pueden ser la falta de información clara y confiable y los malentendidos que ello siempre provoca. El objetivo de esta publicación es ayudar a la comprensión, brindando información para los no expertos. En los siguientes capítulos, se describen las fuentes y los efectos de todas las clases de radiación ionizante, a la vez que se explican los principios y métodos de la protección radiológica.

Estructura de la materia

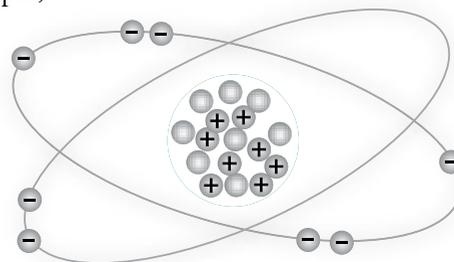
Toda la materia en nuestro universo está compuesta por *átomos*. Estos son los ladrillos básicos de los *elementos* químicos (como el hidrógeno, el carbono, el oxígeno, el hierro, el plomo, etc.). Cada átomo tiene un diminuto *núcleo* central cargado positivamente y varios *electrones*. Los electrones tienen una carga eléctrica negativa y se mueven a gran velocidad, formando nubes de límites difusos (también denominadas capas), alrededor del núcleo. El núcleo es normalmente 10 000 veces más pequeño que la nube electrónica, mientras que los electrones son aún más pequeños que el núcleo. Eso significa que la mayor parte del átomo está vacío y es difícil de representar, salvo en diagramas simplificados en gran medida.

El núcleo del átomo está compuesto por *protones*, que tienen una carga positiva igual a la carga negativa del electrón

y por *neutrones* que no tienen carga.¹ Un átomo está compuesto por igual cantidad de protones que de electrones y, por consiguiente, es eléctricamente neutro. Los átomos pueden combinarse con átomos del mismo elemento y de otros elementos, para formar entidades más grandes, eléctricamente neutras, denominadas *moléculas*. Por ejemplo, dos átomos de oxígeno componen una molécula de oxígeno, y dos átomos de hidrógeno se combinan con un átomo de oxígeno para constituir una molécula de agua.

.....
 1 Para nuestro propósito, no es necesario detallar aquí la estructura fundamental de los protones y neutrones, o explicar cómo se mantienen unidos en el núcleo.

Representación planetaria del átomo de oxígeno, con un núcleo de 8 protones y 8 neutrones dentro de 8 electrones orbitales



- Electrón
- Neutrón
- Protón

Núcleo = protones + neutrones

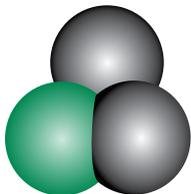
Isótopos del hidrógeno



Hidrógeno



Deuterio



Tritio

El número de electrones en el átomo –y, por lo tanto, el número de protones en el núcleo, denominado *número atómico*– otorga a cada elemento sus características únicas. Por ejemplo, el número atómico del carbono es 6, mientras que el del plomo es 82.

Debido a que los protones y los neutrones tienen casi la misma masa y son muchísimo más pesados que los electrones, prácticamente toda la masa del átomo se concentra en el núcleo, por ello a la suma de protones más neutrones se la denomina *número de masa*. Podemos identificar un elemento químico por el número de protones y neutrones que componen sus átomos y simplemente se puede usar el nombre del elemento junto con el número de masa para especificar cada especie o *nucleido*. Así, el carbono 12 es un nucleido con seis protones más seis neutrones, el plomo 208, por su parte, es un nucleido con 82 protones y 126 neutrones. Los nucleidos de un elemento que tienen un número igual de protones, pero un número diferente de neutrones, se denominan *isótopos* de dicho elemento. El hidrógeno, por ejemplo, tiene tres isótopos: el hidrógeno 1 (hidrógeno común o protio, con un núcleo de un solo protón), el hidrógeno 2 o deuterio

(un protón y un neutrón) y el hidrógeno 3 o tritio (un protón y dos neutrones). El hierro tiene diez isótopos: del hierro 52 al hierro 61, todos con los 26 protones que caracterizan el elemento, pero con 26 a 35 neutrones.

Radiactividad y radiaciones

Si bien muchos nucleidos son estables, una gran mayoría no lo es. La estabilidad está determinada, principalmente, por el equilibrio entre el número de neutrones y protones del núcleo. En los núcleos estables de menor masa, ambos números son iguales, mientras que los núcleos estables más grandes contienen levemente más neutrones que protones. Los núcleos que tienen una cantidad de neutrones excesiva con respecto a la de protones, buscan transformarse en una estructura más estable, convirtiendo un neutrón en un *protón*, emitiendo un electrón negativamente cargado o *partícula beta*; este proceso es conocido como la *desintegración beta*. A su vez, los núcleos con demasiados protones buscan estabilizarse transformando un protón en un neutrón, mediante una forma diferente

de desintegración beta: pierden una carga positiva emitiendo un *positrón*, o sea un electrón con carga positiva.

Con frecuencia, esas transformaciones dejan en el núcleo un exceso de energía, que en forma casi inmediata, en la mayoría de los casos, es disipada como *radiación gamma*, que es un flujo de *fotones* de energía elevada, es decir, paquetes discretos de energía sin masa o carga.²

Se denomina *radiactividad* a la transformación espontánea de un núcleo con su consecuente emisión del exceso de energía como *radiación ionizante*. El proceso de transformación se denomina *desintegración* o *decaimiento* y el nucleido que transmuta y emite radiación se llama *radionucleido*.

Algunos núcleos pesados, como los *actínidos*³ se desintegran produciendo *partículas alfa*, constituidas por dos protones y dos neutrones. Idéntica al núcleo del helio, la partícula alfa es mucho más pesada que la partícula beta y transporta dos unidades de carga positiva.

.....
² La radiación gamma son ondas electromagnéticas y sólo difiere de las ondas de radio y de la luz visible por el tamaño de su longitud de onda.

³ Ver glosario.

RADIACIÓN	RADIONUCLEIDO	PERÍODO
alfa	uranio 238	4,47 . 10 ⁹ años
	↓	
beta	torio 2354	24,1 días
	↓	
beta	protactinio 234	1,17 minutos
	↓	
alfa	uranio234	245 000 años
	↓	
alfa	torio 230	77 000 años
	↓	
alfa	radio 226	1600 años
	↓	
alfa	radón 222	3,823 días
	↓	
alfa	polonio 218	3,05 minutos
	↓	
beta	plomo 214	26,8 minutos
	↓	
beta	bismuto 214	19,9 minutos
	↓	
alfa	polonio 214	0,000164 segundos
	↓	
beta	plomo 210	22,3 años
	↓	
beta	bismuto 210	5,01 días
	↓	
alfa	polonio 210	138,1 días
	↓	
	Plomo 206	estable

Decaimiento de radionucleidos: diferentes clases de radiación y periodos en la serie del uranio 238

Molécula = átomos combinados

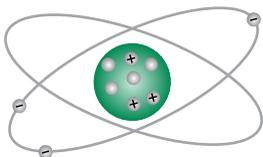
átomo de oxígeno



átomos de hidrógeno

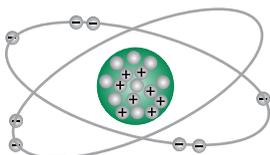
MOLÉCULA DE AGUA

Átomo = núcleo + electrones



LITIO-7
(radiactivo)

Nucleido = especies de átomo



ÁTOMO DE OXÍGENO

Radionucleidos naturales

En la naturaleza existen numerosos radionucleidos. El carbono, por ejemplo, está presente principalmente en forma de carbono 12, estable, con seis protones y seis neutrones. La interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera produce carbono 14, un radionucleido constituido por seis protones y ocho neutrones. El carbono 14, con neutrones extra, decae trocando un neutrón en protón y emitiendo una partícula beta: de esa forma, el nucleido se transforma en nitrógeno 14, estable, con siete protones y siete neutrones. La técnica de datación por carbono 14 se basa, precisamente, en la medición de la emisión de radiación beta, en los materiales que contienen carbono.

Otros radionucleidos naturales son resultantes de las sucesivas transformaciones de las series de radionucleidos originados a partir de la desintegración radiactiva del uranio y del torio. Cada una de estas series o familias remata en un nucleido estable del plomo, aunque dentro de cada familia también existen radionucleidos de otros elementos. En la página anterior se muestra la serie del decaimiento del uranio 238, que concluye en el nucleido estable plomo 206; como se puede ver, una de esas transformaciones conduce a la generación de radón 222, radionucleido que tiene una importancia especial en la protección radiológica.

Energía de la radiación

La energía de las distintas clases de radiación –las partículas alfa y beta y los rayos gamma– se expresa habitualmente en una unidad denominada **electrón volt**, cuyo símbolo es **eV**. A menudo se utilizan múltiplos de esa unidad, como un millón o **10⁶ electrón volt**, representado **MeV**. Por ejemplo, la energía de las partículas alfa emitidas por el polonio 214 es de alrededor de 7,7 MeV. Las partículas beta del plomo 214, también formado en la serie del decaimiento del uranio 238, tienen una energía máxima de 1,0 MeV, mientras los rayos gamma emitidos por el mismo radionucleido tienen una energía de 0,35 MeV.

Durante las últimas décadas, se han producido artificialmente varios centenares de isótopos radiactivos (radioisótopos) de los elementos, incluyendo, por ejemplo, estroncio 90, cesio 137 y yodo 131. También se han producido en cantidad nuevos elementos radiactivos, como el prometio y el plutonio, aunque a este último también se lo puede encontrar en la naturaleza, en micro cantidades, en los minerales de uranio.

La velocidad de las transformaciones espontáneas en una cantidad dada de material radiactivo es conocida como *actividad*. La actividad se expresa en una unidad denominada *becquerel*,

símbolo Bq, donde 1 Bq es igual a una transformación por segundo. Recibió su nombre en homenaje al físico francés Henri Becquerel. Como la unidad es muy pequeña, frecuentemente se utilizan múltiplos como el *megabecquerel*, MBq igual a un millón de becquerel. Un gramo de radio 226, por ejemplo, tiene una actividad de 37 000 MBq: es decir emite alrededor de 37 000 millones de partículas alfa cada segundo (la antigua unidad de actividad, llamada *curie* —en homenaje a la científica francesa (nacida en Polonia) Marie Curie— fue originalmente definida como la *actividad de un gramo de radio*).



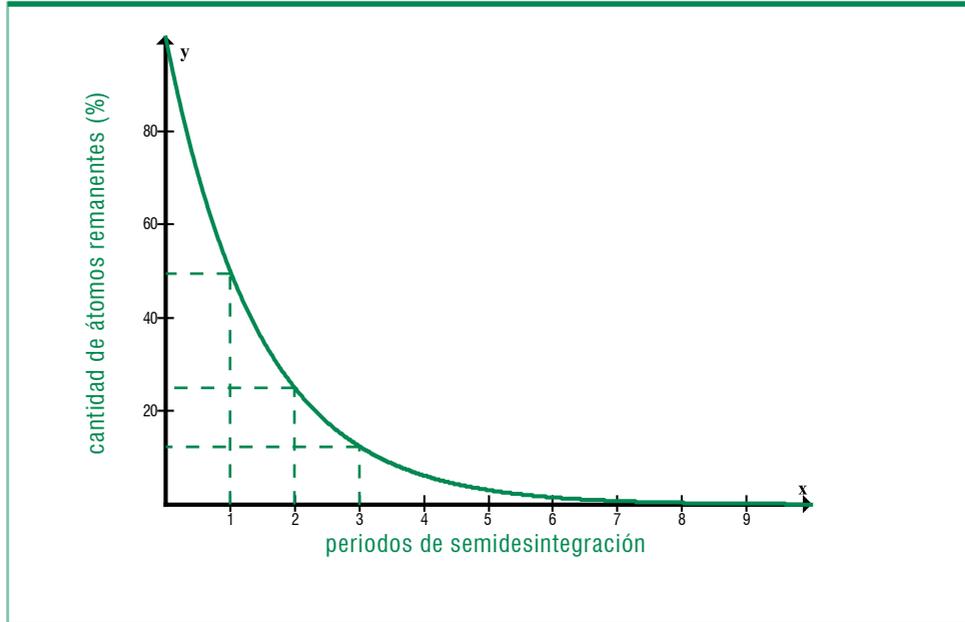
Henri Becquerel
(1852–1908)



Marie Curie
(1867–1934)

Periodo de semidesintegración

El tiempo requerido para reducir la actividad de un radionucleido a la mitad de su valor original se denomina **periodo de semidesintegración**, símbolo $t_{1/2}$ (en adelante, simplemente el periodo). Dicho de otra manera, es el lapso necesario para que la mitad de los núcleos radiactivos de los átomos en una muestra desaparezcan. Cada radionucleido tiene un periodo único; éste puede variar desde fracciones de segundo hasta millardos de año. El periodo del yodo 131 es 8 días; el del cesio 137, 30 años; el del carbono 14, 5730 años; el del plutonio 239, 24 000 años; y el del uranio 238, 4470 millones de años. En periodos sucesivos, la actividad de un radionucleido se reduce por decaimiento a un 1/2, 1/4, 1/8, etc., de su valor inicial. Esto significa que podemos predecir la actividad de una muestra dada. A medida que la cantidad de un radionucleido disminuye, decrece proporcionalmente la radiación que emite.



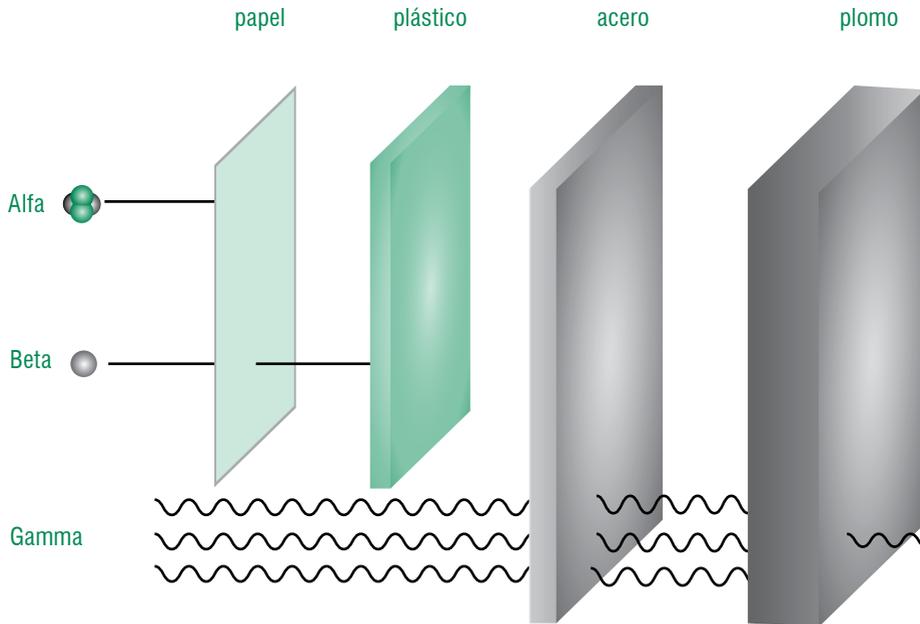
Tipos de radiación

La mayor parte de los tipos comunes de radiación proviene de materiales radiactivos, aunque algunas de ellas también pueden ser producidas con equipos especiales. El ejemplo más importante es el de los rayos x, que usualmente son producidos disparando un haz de electrones contra un blanco metálico (comúnmente tungsteno). Los electrones de los átomos del metal absorben la energía del haz de

electrones —en términos científicos, los átomos son excitados— y luego, a medida que se “relajan”, liberan energía en forma de rayos x. La radiación, por consiguiente, proviene del metal pero no del núcleo atómico, a diferencia de la radiación emitida por los materiales radiactivos. Por su modo de producción, no existe un periodo (tiempo requerido para reducir la actividad) en los rayos x; cuando se interrumpe el haz de electrones, simplemente la radiación desaparece.

La radiación alfa (α) son núcleos del elemento helio cargados positivamente, emitidos por un núcleo de un radionucleido de número atómico mayor que 83. Las partículas alfa, a pesar de su alta energía, sólo pueden recorrer distancias muy limitadas en el aire (1-2 centímetros). Además, son absorbidas completamente por una hoja de papel o la piel humana. No obstante, la radiación alfa puede ser peligrosa si ingresa en el cuerpo humano por inhalación o ingestión, debido a que puede provocar una exposición importante y, por ende, daño en tejidos tales como el revestimiento del pulmón o del estómago.

La radiación beta (β) son electrones emitidos por un núcleo inestable. Las partículas beta, mucho más pequeñas que las alfa, pueden penetrar profundamente en materiales o tejidos. La radiación beta puede ser absorbida completamente por láminas de plástico, vidrio o metal. Normalmente, no penetra más allá de la capa superficial de la piel. Sin embargo, exposiciones prolongadas a emisores beta de altas energías pueden causar quemaduras de la piel. Además, estos emisores pueden ser peligrosos si son inhalados o ingeridos.



La radiación gamma (γ) son fotones de energía muy elevada, emitidos por un núcleo inestable, frecuentemente a posteriori de la emisión de una partícula beta. La radiación gamma, cuando atraviesa la materia, produce ionización de los átomos, principalmente por interacción con los electrones. Es muy penetrante y sólo materiales densos como el acero o el plomo, de un espesor sustancial, pueden proveer un buen blindaje. La radiación gamma, por consiguiente, puede causar exposiciones importantes a los órganos internos, aunque no se haya inhalado o ingerido el radionucleido que la emite.

Los rayos x también son fotones de energía alta, como la radiación gamma, producidos artificialmente. Son igualmente penetrantes y la ausencia de un blindaje de material denso en la fuente que los emite puede causar exposiciones considerables a los órganos internos.

Los neutrones (n) son emitidos por núcleos inestables, especialmente durante la fisión y la fusión nuclear. Si bien son un componente de los rayos cósmicos, los neutrones, por lo común, son producidos artificialmente. Debido a que son partículas eléctricamente neu-

tras, los neutrones suelen ser muy penetrantes y cuando interactúan con la materia o tejidos humanos causan la emisión de radiación beta y gamma. Los neutrones, por consiguiente, demandan blindajes importantes para reducir la exposición.

La radiación cósmica llega del espacio exterior. Es una mezcla de muchos tipos de radiación, que incluye protones, partículas alfa, electrones y otras partículas, poco comunes, de energías muy altas. A medida que penetran en la atmósfera, inician complejas reacciones nucleares y por ello la radiación cósmica al nivel del suelo está formada por una gran variedad de partículas elementales. La mayor parte de la dosis a ese nivel procede de los muones⁴ y los electrones.

.....
⁴ Los muones son partículas de carga equivalente a la de un electrón o un positrón y constituyen la componente más penetrante de la radiación cósmica.

Radionucleidos:	Nucleidos inestables
Radiactividad:	Emisión de radiación
Tipos de radiación:	Alfa, beta, gamma, neutrón, y rayos x
Actividad:	Tasa de decaimiento del radionucleido
Periodo:	Lapso hasta reducir la actividad a la mitad

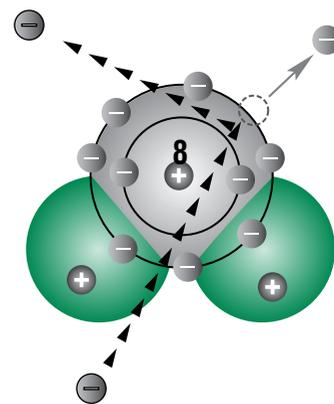
Cuando la radiación atraviesa la materia, deposita energía en ella. Las partículas alfa y beta, eléctricamente cargadas, ceden su energía en *interacciones eléctricas* con los electrones del material. Los rayos gamma y x pierden energía de varias maneras, todas ellas implican la liberación de electrones del átomo, los que luego ceden energía en interacciones con otros electrones. Los neutrones también pierden energía de diversos modos, aunque el más importante es la colisión con los protones de otros núcleos. Los protones son puestos en movimiento y, como tienen carga, también ceden la energía en interacciones eléctricas. Por lo tanto, en todos los casos la radiación produce interacciones eléctricas con la materia.

En algunos procesos, un electrón del material puede absorber suficiente energía como para escapar del átomo dejando, entonces, al átomo o a la molécula cargados positivamente. La figura de esta

página ilustra dicha transformación para una molécula de agua. La molécula tiene diez protones y diez electrones en total, pero sólo nueve electrones permanecen después del paso de la partícula cargada; la molécula en su conjunto queda con un exceso de carga positiva.

El proceso por el cual un átomo o una molécula neutra adquieren una carga se denomina *ionización* y el ente resultante *ion*. A su vez, una vez arrancado del átomo, el electrón puede ionizar a otros átomos o moléculas. Toda la radiación que produce *ionización* –tanto directamente, como las partículas alfa y beta o indirectamente como los rayos gamma, x, y los neutrones– es conocida como *radiación ionizante*. Cuando las partículas cargadas atraviesan los átomos también

Ionización de una molécula de agua por una partícula cargada



pueden ceder energía a los electrones sin desalojarlos de sus órbitas; dicho proceso se denomina *excitación*.

Ionización en los tejidos

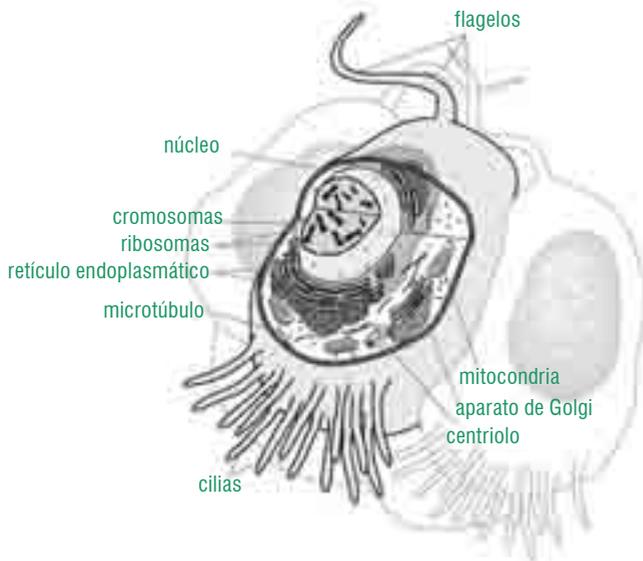
Cada vez que una partícula cargada ioniza o excita un átomo, pierde energía hasta no tener suficiente energía para volver a interactuar; el resultado final de estas mermas de energía es un diminuto incremento de la temperatura del material del cual el átomo forma parte. Así, toda la energía cedida por la radiación a los tejidos biológicos

es disipada finalmente como calor, gracias al incremento de las vibraciones de las estructuras atómicas y moleculares. La ionización inicial y los cambios químicos consecuentes son los causantes de los efectos biológicos nocivos.

La *célula* es la unidad fundamental del tejido biológico. Tiene un centro de control denominado *núcleo*, que es una estructura compleja que no debe ser confundida con el núcleo atómico. Alrededor del 80 por ciento de la célula es agua, el otro 20 por ciento son compuestos biológicos complejos. Cuando la radiación ionizante atraviesa el tejido celular produce moléculas de agua eléctricamente cargadas. Éstas se rompen en entidades denominadas *radicales libres*, como el radical libre hidroxilo (OH), compuesto por un átomo de oxígeno y un átomo de hidrógeno. Los radicales libres son químicamente muy reactivos y pueden alterar las moléculas esenciales de la célula.

Una molécula fundamental es el *ácido desoxirribonucleico (ADN)* que se encuentra principalmente en el núcleo de la célula. El ADN controla la estructura y función de la célula y trasporta copias de sí mismo: las moléculas de ADN son enormes y las estructuras que las albergan, los

Estructura de la célula



cromosomas, son visibles al microscopio. Todavía no se conocen totalmente todos los mecanismos por los cuales la radiación daña a las células, aunque se sabe que muchos implican cambios en el ADN. Estos pueden suceder de dos maneras: la radiación puede ionizar una molécula de ADN produciendo directamente un cambio químico, o el ADN puede modificarse indirectamente cuando interactúa con un radical hidroxilo libre producido por la radiación en el agua presente en la célula. En cualquier caso, el cambio químico puede causar un efecto biológico perjudicial que origine el desarrollo de un cáncer o defectos genéticos hereditarios. En el capítulo 5 se dan más detalles sobre los efectos de la radiación.

Una de las propiedades más importante de todos los tipos de radiación ionizante es su potencial para penetrar la materia. La capacidad de penetración que tiene cada tipo de radiación aumenta con su energía, pero a la misma cantidad de energía la penetración varía de una radiación a otra. Con las partículas cargadas, como las alfa y las beta, la penetración depende también de la masa de la partícula y su carga. A igual energía, una partícula beta penetrará un espesor mayor

que una alfa. Las partículas alfa apenas pueden atravesar la capa externa, muerta, de la piel humana, por consiguiente, los radionucleidos que las emiten no son peligrosos para la salud, a menos que penetren en el organismo por inhalación, ingestión o lesiones en la piel. Las partículas beta atraviesan hasta un centímetro de tejido, por lo cual los radionucleidos que las emiten son peligrosos para los tejidos superficiales pero no para los órganos internos, a menos que también sean introducidos en el cuerpo. En el caso de la radiación indirectamente ionizante, como los rayos gamma y los neutrones, la penetración depende de la naturaleza de sus interacciones con el tejido. Los rayos gamma pueden atravesar el cuerpo, por lo que los radionucleidos que los emiten, tanto desde el exterior como del interior, pueden ser peligrosos. Los rayos x y los neutrones también logran atravesar el cuerpo.



Diagrama del ADN

La radiación ionizante y los tejidos

Partículas cargadas



Interacciones eléctricas



Ocurre la ionización



Cambios químicos



Efectos biológicos

Magnitudes dosimétricas

Categorización de las magnitudes dosimétricas

Dosis absorbida

Energía impartida por la radiación a la unidad de masa de tejido

Dosis equivalente

Dosis absorbida ponderada por el daño de las clases diferentes de radiación

Dosis efectiva

Dosis equivalente ponderada por el daño a los diferentes tejidos

Dosis efectiva colectiva

Dosis efectiva de una fuente de radiación a un grupo

No podemos percibir a la radiación ionizante directamente por medio de nuestros sentidos, pero sí detectarla y medirla con otros medios: estos incluyen métodos tradicionales, basados en *películas fotográficas*, *tubos Geiger-Müller* y *contadores de centelleo*, así como técnicas modernas que utilizan *materiales termoluminiscentes* y *diodos de silicio*. Podemos interpretar las mediciones que hacemos en términos de la cantidad de energía que la radiación habría depositado en todo el organismo o en una parte específica del mismo. Cuando no es posible la medición directa, por ejemplo, cuando un radionucleido se acumula en un órgano interno, se puede calcular la dosis absorbida, a partir de la cantidad de actividad retenida en ese órgano.

Se llama *dosis absorbida* a la cantidad de energía que la radiación ionizante deposita en una unidad de masa de materia, como el tejido humano. Se expresa en una unidad denominada *gray*, símbolo Gy, donde 1 gray es igual a 1 joule por kilogramo. Frecuentemente, se usan submúltiplos de gray, como el *miligray* (mGy) o sea un milésimo de gray. El gray rememora al físico inglés Harold Gray.

Los distintos tipos de radiación ionizante difieren en el modo de interactuar con el material biológico; de allí que dosis absorbidas iguales (es decir, a igual cantidad de energía depositada) no tengan necesariamente iguales consecuencias biológicas. Por ejemplo, 1 Gy de radiación alfa es más dañino al tejido que 1 Gy de radiación beta, porque una partícula alfa, al ser más lenta y tener una carga mayor, disipa su energía en menor espacio a lo largo de su recorrido. Entonces, se necesita otra magnitud para poner en un pie de igualdad a todos los tipos de radiación ionizante, en relación con su potencial para ocasionar daño. Dicha magnitud es la *dosis equivalente*, que se expresa en una unidad denominada *sievert*, símbolo Sv. Habitualmente, se utilizan submúltiplos de sievert, como el *milisievert*, mSv, es decir, un milésimo de sievert. La denominación sievert es en homenaje al físico sueco Rolf Sievert.

La dosis equivalente es igual a la dosis absorbida multiplicada por un factor de ponderación. Dicho factor considera como determinado tipo de radiación distribuye su energía en el tejido, definiendo así su eficacia relativa para causar daño biológico. Para los rayos gamma, rayos x,

Órgano o tejido	Factor de ponderación tisular
Colon	0,12
Esófago	0,05
Estómago	0,12
Gónadas	0,20
Hígado	0,05
Mamas	0,05
Médula ósea	0,12
Piel	0,01
Pulmón	0,12
Superficie ósea	0,01
Tiroides	0,05
Vejiga	0,05
Resto	0,05
Total cuerpo	1,00

y partículas beta, el factor de ponderación de la radiación se fijó en 1, razón por la cual la dosis absorbida y la dosis equivalente son numéricamente iguales. Para las partículas alfa, el factor se fijó en 20, por lo que se estima que la dosis equivalente es 20 veces la dosis absorbida. Los valores del factor de ponderación de la radiación para los neutrones de diferentes energías van de 5 a 20.

Definida de dicho modo, la dosis equivalente provee un índice de la proba-

bilidad de daño a un órgano o tejido específico, por la exposición a la radiación sin tener en cuenta su tipo o energía. Por ejemplo, 1 Sv de radiación alfa al pulmón tendría el mismo riesgo de inducción de un cáncer fatal que 1 Sv de radiación beta. El riesgo para las diferentes partes del cuerpo humano varía de un órgano a otro. Por ejemplo, el riesgo de cáncer fatal por unidad de dosis equivalente es menor para la tiroides que para el pulmón. Existen otros perjuicios importantes para la salud, como tumores malignos no fatales o el riesgo de consecuencias hereditarias graves causadas por la irradiación de los testículos u ovarios. Dichos efectos son diferentes tanto en naturaleza como en importancia y debemos tenerlos en cuenta al evaluar el deterioro total de la salud causado por la exposición a la radiación

Podemos hacer frente a estas complejidades tomando la dosis equivalente en un órgano o tejido importante del cuerpo y multiplicarla por el factor de ponderación relacionado al riesgo asociado a dicho órgano o tejido. La adición de las dosis equivalentes ponderadas es una magnitud denominada *dosis efectiva*, que permite representar todas las dosis equivalentes en el cuerpo como un único

Cálculo de la dosis efectiva

Considere la circunstancia en la cual un radionucleido causa exposición del pulmón, el hígado y la superficie ósea

Suponga que las dosis equivalentes a esos tejidos son, respectivamente, 100, 70, y 300 mSv

La dosis efectiva es calculada como $(100 \times 0,12) + (70 \times 0,05) + (300 \times 0,01) = 18,5$ mSv

El cálculo muestra que el riesgo de efectos nocivos de este ejemplo en particular de exposición a la radiación será igual que el riesgo de 18,5 mSv absorbido uniformemente en todo el cuerpo

La **dosis equivalente** se expresa en una unidad denominada **sievert**, en homenaje al físico sueco Rolf Sievert



Rolf Sievert
(1896-1966)

La **dosis absorbida** se expresa en una unidad denominada **gray**, en homenaje al físico inglés Harold Gray (1905-1965)

número. La dosis efectiva también tiene en cuenta la energía y tipo de radiación y por consiguiente da una indicación general del detrimento a la salud. Es más, la dosis efectiva se utiliza tanto para la exposición externa e interna como para la irradiación, sea ella uniforme o no.

A veces, es útil tener la medida de la dosis de radiación total recibida por un grupo de personas o por toda una población. La magnitud usada para expresar ese total es la *dosis efectiva colectiva*. Se obtiene sumando, para todas las personas expuestas, la dosis efectiva que cada individuo del grupo o de la población ha

absorbido de la fuente de radiación de que se esté tratando. Por ejemplo, la dosis efectiva de todas las fuentes de radiación es, en promedio, 2,8 mSv por año. Dado que la población mundial es de alrededor de 6000 millones de personas, la dosis efectiva colectiva anual a la población mundial es el producto de ambos números –alrededor de 17 000 000 *sievert hombre* (Sv hombre).

Normalmente, el término dosis efectiva se abrevia a dosis y la dosis efectiva colectiva es llamada comúnmente *dosis colectiva*. Éste será el caso en los siguientes capítulos.

La radiación ionizante ingresa en nuestras vidas de diversos modos. Se origina en procesos naturales, como el decaimiento del uranio en la Tierra, y en técnicas artificiales, como la utilización de rayos x en medicina. Así es que podemos clasificar a la radiación en natural o artificial, según su origen. Las fuentes¹ naturales incluyen los rayos cósmicos, la radiación gamma terrestre, los *productos del decaimiento* del radón en el aire y diversos radionucleidos encontrados corrientemente en la comida y bebida. Las fuentes artificiales comprenden la utilización de la radiación x en medicina, la *precipitación radiactiva* debida a los ensayos

.....
1 El término fuente es usado por la “Comisión internacional de protección radiológica” (ICRP) para indicar el origen de una exposición, no necesariamente una fuente física de radiación. Por ejemplo, cuando se liberan materiales radiactivos al medio ambiente como desecho, la instalación en su conjunto y el material emitido pueden considerarse como las fuentes, siempre dependiendo del contexto.

de armas nucleares en la atmósfera, las emisiones de desechos radiactivos de la industria nuclear, la utilización industrial de la radiación gamma, y varios artículos entre los *productos de consumo*. En los siguientes capítulos se da mayor información sobre ambos tipos de fuentes.

Cada fuente de radiación tiene dos características importantes: la dosis a los seres humanos y la facilidad para poder alterar dicha dosis. Hasta hace poco, la radiación de las fuentes naturales parecía, a la vez, no tener importancia y ser inalterable—un hecho natural más. Ahora sabemos, no obstante, que las dosis debidas a los productos del decaimiento del gas radón (un producto del decaimiento del uranio) dentro de las viviendas en determinadas zonas geográficas pueden ser extraordinariamente elevadas. Vale agregar que es sencillo atenuar dichas dosis en las viviendas existentes y cuando se construyen nuevas se puede

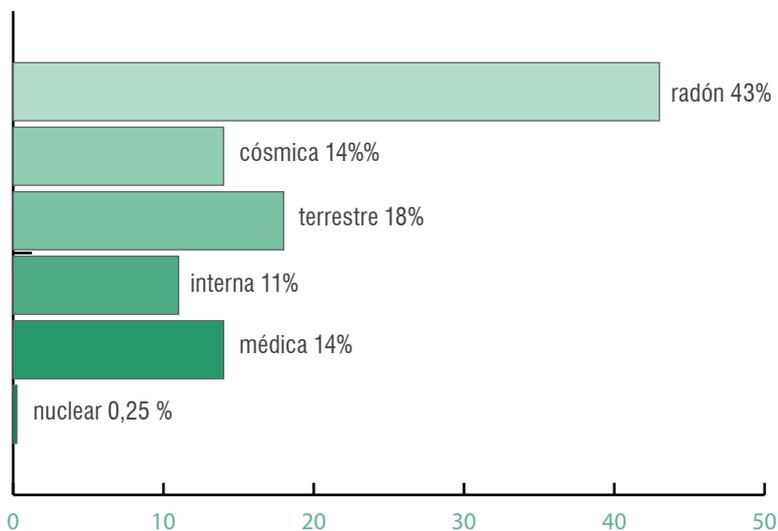
evitar concentraciones elevadas del gas en su interior. En contraste, poco podemos hacer para cambiar nuestra exposición a otras fuentes de radiación naturales. Esa exposición básica a los rayos cósmicos, a la radiación gamma terrestre y a la emitida por los elementos radiactivos naturales dentro del cuerpo humano da una dosis anual de alrededor de 1 mSv, o más, al habitante promedio en el mundo. Una dosis semejante (como mínimo) debida a los productos del decaimiento del radón, es prácticamente inevitable para muchas personas.

En general, es más fácil controlar la dosis proveniente de las fuentes de radiación artificiales que la de las naturales, ya que en las primeras se puede alterar o interrumpir la producción de la radiación, aunque no siempre es conveniente hacerlo. Por ejemplo, es importante prestar atención a las dosis debidas a los exámenes médicos con rayos x, pero sería imprudente reducirlas demasiado si ello significa perder información esencial para el diagnóstico.

El Comité científico de las Naciones Unidas para el estudio de los efectos de las radiaciones atómicas (UNSCEAR por las siglas de su nombre en inglés)

fue establecido en 1955 para estimar los riesgos posibles a la salud debidos a la precipitación radiactiva provocada por los ensayos de armas nucleares en la atmósfera. En la actualidad, el UNSCEAR publica regularmente información sobre las dosis debidas a todas las fuentes. Los resultados de la última revisión, publicados en 2000, se muestran en el gráfico, en la siguiente página. La dosis total anual, promediada en toda la población del mundo, es de alrededor de 2,8 mSv. Más del 85 por ciento del total proviene de fuentes naturales, mientras que la mitad procede de los productos de decaimiento del radón dentro de las viviendas. La exposición médica de pacientes alcanza el 14 por ciento del total, a su vez, todas las otras fuentes artificiales –la precipitación radiactiva, los artículos de consumo, la exposición ocupacional y las emisiones de la industria nuclear– sólo significan menos de 1 por ciento del valor total.

Las variaciones más grandes de la dosis se deben a los productos del decaimiento del radón dentro de las viviendas, los cuales pueden producir dosis anuales de 10 mSv o más. Las dosis anuales a las personas expuestas a



Compilado de los datos en las Tablas 1 y 2 del informe 2000 del UNSCEAR a la Asamblea General de la ONU

Exposición promedio a todas las fuentes de radiación = 2,8 mSv/a

la radiación en el trabajo, en la actualidad, en la mayoría de los países están limitadas por ley a 50 mSv o menos, aunque sólo una fracción pequeña de los trabajadores excede los 20 mSv. Es improbable que miembros de la población reciban más que una fracción de 1 mSv por año de la exposición ocasional a fuentes artificiales. La dosis al paciente en algunos procedimientos de diagnóstico puede estar en alrededor de 10 mSv. De los productos de consumo con material radiactivo, como los detectores de humo y los relojes con es-

feras luminosas, las dosis anuales son a lo sumo 1 μ Sv (1 millonésimo de un sievert), aunque artículos menos comunes, como los manguitos² incandescentes que contienen torio, en ciertas circunstancias pueden aportar tanto como 0,1 mSv al año.

.....
 2 Camisa o funda utilizada en los faroles a gas butano. En muchos países se ha reemplazado el torio con tierras raras.

Dosis anuales promedio de todas las fuentes de radiación en la población mundial

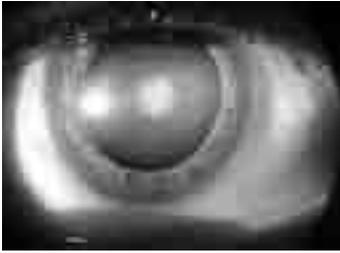
Fuente	Dosis (mSv)
Natural	
Cósmica	0,4
Rayos gamma	0,5
Interna	0,3
Radón	1,2
Artificial	
Médica	0,4
Ensayos atmosféricos de armas nucleares	0,005
Chernóbil	0,002
Generación nucleoelectrica	0,0002
Total (redondeado) mSv	2,8

Diferentes dosis de radiación, suministradas a tasas diversas, a las distintas partes del cuerpo, pueden causar variados efectos a la salud en el transcurso del tiempo.

Una dosis muy grande a todo el cuerpo puede ocasionar la muerte en días o semanas. Por ejemplo, a menos que se preste atención médica, es probable que una dosis absorbida de 5 gray o más, recibida instantáneamente, sea fatal debido al daño que causa a la médula ósea y al tracto gastrointestinal. Con una atención médica apropiada, se podría salvar la vida de una persona que estuvo expuesta a 5 gray, pero aun con asistencia médica, una dosis al cuerpo entero de unos 50 gray, seguramente sería mortal. Una dosis considerable en un área localizada del cuerpo, sin ser fatal, podría producir efectos agudos. Por ejemplo, una dosis absorbida instantánea de 5 gray a la piel probablemente produzca eritema –enrojecimiento doloroso de la piel– en alrededor de una semana, mientras que una dosis similar

a los órganos de la reproducción podría acarrear esterilidad. Estos tipos de secuelas se denominan *efectos deterministas*: sólo suceden si la dosis o la tasa de dosis es mayor que un determinado valor umbral; además, el efecto sobreviene con más rapidez y mayor gravedad a medida que tanto la dosis como la tasa de dosis aumentan. Los efectos deterministas en un individuo, como consecuencia de la exposición a la radiación, pueden identificarse clínicamente (aunque en la práctica, no siempre fueron inmediatamente reconocidos como secuela de una irradiación, en los pocos casos que ocurrieron derivados de accidentes –ver capítulo 14).

Ciertos tipos de consecuencias deterministas recién sobrevienen después de transcurrido un tiempo considerable desde la exposición. Habitualmente no son fatales, pero pueden producir alguna incapacidad al afectar el funcionamiento de ciertas partes del cuerpo o pueden manifestarse otros cambios no malignos. Los



Catarata en un ojo humano. Imagen ampliada recogida durante un examen médico. La pérdida de transparencia del cristalino causa una reducción progresiva de la visión y puede desembocar en ceguera

ejemplos más conocidos son las cataratas (opacidad del cristalino) y daños cutáneos (disminución del grosor de la piel y ulceración). Usualmente, se necesita una dosis absorbida de varios gray para provocar dichas afecciones.

Si la dosis es menor, o es absorbida en un tiempo más largo, las células somáticas tienen mayor oportunidad de reparación, sin dejar rastros de la lesión aguda. Aun así, los tejidos pueden haber sido dañados y las secuelas podrían aparecer sólo posteriormente (quizás décadas más tarde), o incluso en los descendientes del individuo irradiado. Estos tipos de consecuencias se llaman *efectos estocásticos*: no existe certeza de que sobrevengan, aunque la probabilidad de que sucedan aumenta con el incremento de la dosis, teniendo en cuenta que el momento de la manifestación de cualquier secuela y su gravedad no dependen de la dosis. Debido a que la mayoría de dichos efectos no tienen como única causa conocida a la radiación, habitualmente es imposible de determinar clínicamente si un caso individual es consecuencia o no de la exposición a la radiación.

Inducción de cáncer

El más importante de los efectos estocásticos es un cáncer, lo cual siempre es grave y frecuentemente fatal. Aunque la causa precisa de la mayoría de los tumores malignos sigue siendo desconocida o pobremente comprendida, se sabe que la exposición a agentes como el humo del tabaco, el amianto y la radiación ultravioleta, así como a la radiación ionizante, participan en la inducción de ciertos tipos de cáncer. El desarrollo de un cáncer es un proceso complejo, de múltiples etapas, que generalmente tarda años en completarse. La radiación parece actuar principalmente en la fase de iniciación, introduciendo mutaciones en el ADN de las células normales de los tejidos. Dichas mutaciones hacen que la célula entre en una senda de crecimiento anormal que a veces puede conducir al desarrollo de un tumor maligno.

Dado que no es posible distinguir entre los casos de cáncer que son el resultado de la exposición a la radiación y los casos debidos a otras causas, ¿cómo es posible calcular el riesgo de cáncer ocasionado por la radiación? En la práctica, hay que recurrir a la epidemiología —el estu-

dio estadístico de la incidencia (número de casos y su distribución) de desórdenes específicos en grupos poblacionales delimitados. Suponiendo que en un grupo irradiado se conoce tanto el número de personas como las dosis recibidas, la observación, entonces, de la aparición de cáncer en el grupo y la comparación con las dosis y el número esperado de casos de cáncer en otro grupo similar pero no irradiado, permite estimar el riesgo de cáncer por unidad de dosis. Esto generalmente se denomina *factor de riesgo*. Es muy importante incluir en dichos cálculos la información de grandes grupos de individuos para reducir al mínimo la incertidumbre estadística en la estimación y tomar en cuenta otros factores, como la edad y el sexo, que afectan el desarrollo espontáneo de cáncer.

No todo tumor maligno es fatal. La mortalidad promedio por cáncer tiroideo, inducido por la radiación, es un poco menos del 10 por ciento (aunque fue mucho más bajo –menor que el 1 por ciento– en los casos producidos por el accidente de Chernóbil en niños y adolescentes), la mortalidad promedio por cáncer de mama es de alrededor del 50 por ciento y la debida a cáncer cutá-

neo, cerca del 1 por ciento. En protección radiológica es de mayor importancia el riesgo de cáncer fatal debido a su trascendencia extrema. El uso del riesgo de cáncer mortal hace también más fácil la comparación con otros riesgos fatales con los que se tropieza en la vida. En oposición, la comparación de riesgos no fatales es difícil.

Evaluación del riesgo

La fuente principal de información sobre el riesgo adicional de cáncer, como consecuencia de la exposición de todo el cuerpo a la radiación gamma, es el estudio de los sobrevivientes de las bombas atómicas arrojadas sobre Hiroshima y Nagasaki, en agosto de 1945. Debido a que aún vive una cantidad importante de ellos, es necesario predecir cuántos casos extra de cáncer eventualmente serán detectados en ese grupo. Con ese propósito, se utilizan varios métodos matemáticos y esto significa, inevitablemente, otra fuente de incertidumbre en la estimación del riesgo. Además, otra fuente de incertidumbre es que las dosis efectivamente recibidas por los sobrevivientes solamente pueden ser estimadas de la información

disponible y distintas evaluaciones han llegado a conclusiones algo diferentes.

Otras estimaciones del riesgo de la exposición a los rayos x y gamma de diversos órganos y tejidos provienen de individuos expuestos a la radiación externa durante el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades, así como también de los pobladores de las Islas Marshall, que estuvieron expuestos a la precipitación radiactiva durante ensayos atmosféricos de armas nucleares. A su vez, la información sobre los efectos de los radionucleidos emisores alfa proviene de mineros expuestos al radón y a sus productos de decaimiento, de trabajadores expuestos al radio 226 de las pinturas luminosas, de algunos pacientes con enfermedad ósea tratados con radio 224, y de otros pacientes a quienes se les administró un medio de contraste que incluía un óxido de torio.

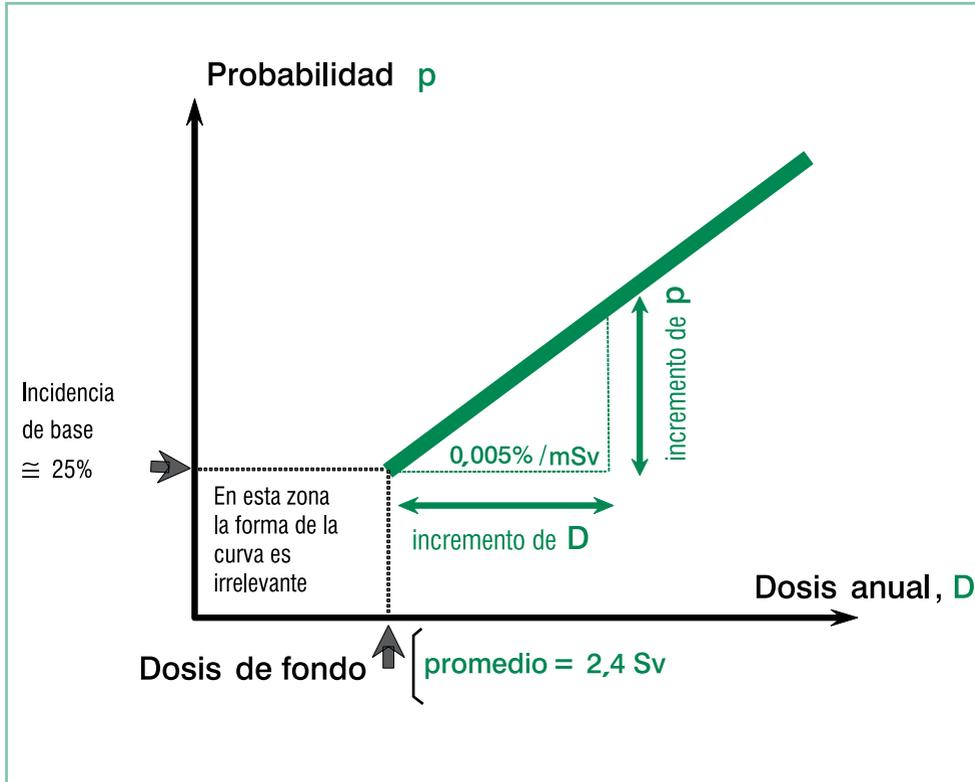
La información de esta naturaleza es evaluada periódicamente por el UNSCEAR y por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por las siglas de su nombre en inglés) a fin de realizar las estimaciones del riesgo más apropiadas. La ICRP efectúa estimaciones del riesgo con el propósito de

desarrollar las recomendaciones para la protección radiológica. El OIEA elabora sus normas de seguridad radiológica teniendo en cuenta el asesoramiento del UNSCEAR y de la ICRP.

Factores del riesgo de cáncer

La mayoría de los sobrevivientes de los bombardeos atómicos en el Japón y de los individuos expuestos de los otros grupos estudiados recibió dosis enormes durante lapsos breves. Las observaciones de la incidencia de cáncer en esos grupos, junto con las estimaciones de las dosis que recibieron, indican que para dosis y tasas de dosis altas existe una relación lineal entre la dosis y el riesgo. De este modo, por ejemplo, duplicando la dosis se duplicaría el riesgo.

No obstante, la mayoría de las exposiciones a la radiación involucra dosis bajas recibidas durante períodos largos. A niveles bajos de exposición, los estudios de incidencia de cáncer en la población expuesta no proporcionan una evidencia directa sobre la relación entre la dosis y el riesgo, dado que el número de casos de cáncer extras que podría esperarse de la exposición a la radiación es demasiado



pequeño para revelarlo (comparado con el número total de casos de cáncer en la población). Por consiguiente, es necesario considerar otra información científica sobre los efectos de la radiación en células y organismos y adoptar un criterio acerca de la forma más probable de la relación dosis-riesgo. Durante muchos años, la solución internacionalmente aceptada fue suponer que la relación para

las dosis bajas es totalmente lineal hasta el origen (conocida como la *hipótesis "lineal-sin umbral" o LNT*, en inglés), es decir, que cualquier dosis de radiación extra tiene un efecto perjudicial, aunque sea pequeño. Sin embargo, se ha llegado a interpretar que algunos experimentos radiobiológicos parecerían sugerir que las dosis bajas de radiación no tienen efecto perjudicial, dado que el organismo puede

reparar con éxito todo el daño causado por la radiación, e incluso que las dosis bajas de radiación podrían estimular mecanismos de reparación en las células, hasta tal punto que ayudarían a prevenir el cáncer. Otros experimentos se han utilizado como base de teorías para las que las dosis bajas de radiación son más nocivas (por unidad de dosis) que las dosis elevadas, o que los efectos hereditarios de la radiación podrían tornarse peores de generación en generación.

Después de una revisión importante de los efectos biológicos a dosis bajas de radiación ionizante, el UNSCEAR concluyó, en 2000, que *“... un aumento en el riesgo de cáncer proporcional a la dosis de radiación es coherente con el conocimiento alcanzado hasta ahora y, por lo tanto, sigue siendo la aproximación más científicamente defendible de ‘la respuesta a dosis baja’ ”*. Sin embargo, el UNSCEAR también aceptó que hay incertidumbres y declaró que *“... una analogía de respuesta a la dosis estrictamente lineal no debería esperarse en todas las circunstancias”*.

Para algunos de los tipos de radiación fuertemente ionizantes, como las partículas alfa, el *factor de riesgo* es el

mismo, tanto a dosis bajas como a dosis altas, pero para la radiación débilmente ionizante, como los rayos gamma, hay una evidencia radiobiológica considerable que indica que el cuadro es más complicado. Para dicho tipo de radiación, una relación lineal es una buena aproximación de la respuesta a la dosis, tanto en las regiones de dosis baja como en las regiones de dosis altas, pero el riesgo por unidad de dosis (la pendiente de la relación lineal) es menor a dosis y tasas de dosis bajas que a dosis y tasas de dosis altas. Sobre esa base, la ICRP ha estimado los factores de riesgo para un cáncer fatal a dosis y tasas de dosis bajas adoptando como criterio un prudente factor de reducción igual a 2. De hecho, el riesgo de una dosis dada dependerá del sexo y la edad del individuo en el momento de la exposición. Por ejemplo: si una persona recibe una dosis tardíamente en la vida, es posible que un cáncer inducido por la radiación no tenga tiempo para manifestarse antes de que fallezca por otra causa. El riesgo de cáncer de mama es virtualmente cero para los hombres y dos veces el valor “promedio”, de $0,4 \times 10^{-2}$ o 1 en 250 por Sv, para las mujeres. Además, los

adelantos recientes en el conocimiento indican que la constitución genética de una persona puede influir en su riesgo de cáncer después de la irradiación. En la actualidad, sólo podemos identificar a las raras familias que pueden conllevar un aumento del riesgo, pero en el futuro los expertos podrían ser capaces de considerar esas características heredadas.

Además, para diferentes poblaciones los factores de riesgo no son los mismos. Esto se debe, parcialmente, a que distintas poblaciones tienen distribuciones de edad diferentes. Por ejemplo, como la edad promedio de una población de trabajadores es generalmente mayor (y por consiguiente su esperanza de vida es menor) que el conjunto de la población, el factor de riesgo para la primera es algo menor que para la última. Para la ICRP el factor de riesgo para los trabajadores es 4×10^{-2} o 1 en 25 por Sv. Diferentes factores de riesgo también pueden ser consecuencia de diferencias en la incidencia preponderante de cáncer (o aún de tipos especiales de cáncer) derivado de cualquier causa, porque se supone que el riesgo de la radiación está relacionado con la incidencia dominante. Por ejemplo, el

Órgano o tejido	Factor de riesgo ($\times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$)
Colon	0,85
Esófago	0,30
Estomago	1,10
Hígado	0,15
Mamas	0,20
Médula ósea	0,50
Ovario	0,10
Piel	0,02
Pulmón	0,85
Superficie ósea	0,05
Tiroides	0,08
Vejiga	0,30
Resto	0,50
Total (redondeado)	5,00

Factores de riesgo de la ICRP de cáncer fatal para toda la población

factor de riesgo para países con un nivel de mortalidad por cáncer relativamente alto (el caso de los países desarrollados) sería más grande que para aquellos donde la mortalidad por cáncer es menos común (en los países en desarrollo). Sin embargo, dichas diferencias, comparadas con la incertidumbre, en los factores de riesgo de la ICRP son demasiado pequeñas y, por lo tanto, los valores de la ICRP –basados en “promediar” las características de las poblaciones de cinco países dispares– pueden usarse razonablemente en todo el mundo.

Enfermedad hereditaria

Además del cáncer, el otro efecto tardío importante de la irradiación es la enfermedad genética. Como con el cáncer, la *probabilidad* de una enfermedad hereditaria —no su gravedad— depende de la dosis. El daño genético surge de la irradiación de los testículos y ovarios, órganos que producen los espermatozoides y los óvulos. La radiación ionizante puede inducir en estas células, o en las células madres que las crean, *mutaciones* que pueden dar lugar a *efectos deletéreos* en las generaciones siguientes. Las mutaciones son el resultado de cambios estructurales en el ADN de las células madre individuales, que son las que posteriormente transfieren con el ADN la información hereditaria a las siguientes generaciones. Las enfermedades hereditarias que pueden ocasionar son de distinta gravedad: desde la muerte temprana y defectos mentales serios a anomalías relativamente ligeras del esqueleto y desórdenes metabólicos menores.

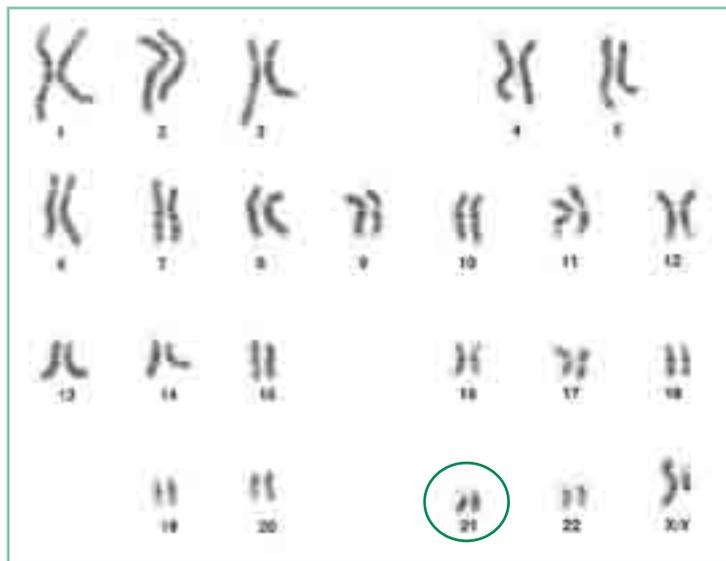
Aunque las mutaciones en los seres humanos parecen no tener causa evidente, la radiación natural y otros agentes

ambientales también pueden ocasionarlas y contribuir a la manifestación de enfermedades genéticas. No obstante, en la prole de los seres humanos, no existe una evidencia categórica de defectos hereditarios atribuibles a la exposición a la radiación natural o artificial. En especial, los extensos estudios de los descendientes de los sobrevivientes de los bombardeos atómicos, no han demostrado un aumento de importancia estadística en los defectos hereditarios. En cambio, los resultados negativos ayudan a establecer para ellos una estimación del techo del factor de riesgo.

Se han realizado, en animales, principalmente en ratones, extensos estudios experimentales del daño hereditario inducido por la radiación ionizante. Los mismos cubren una amplia gama de dosis y tasas de dosis y demuestran claramente que la radiación ionizante produce mutaciones. Los resultados también revelan con qué frecuencia los defectos hereditarios son inducidos por dosis conocidas. Dicha información permite hacer estimaciones del riesgo hereditario en los seres humanos, cuando se la considera en conjunto con los estudios de los sobrevivientes japoneses.

Con esos antecedentes, la ICRP ha evaluado el riesgo de enfermedad hereditaria grave en la población en general expuesta a dosis y tasas de dosis bajas. Estimó un factor de riesgo de $1,0 \times 10^{-2}$ por Sv o 1 en 100 por Sv para enfermedades que se manifiestan en cualquier momento en todas las generaciones. Las mutaciones que producen enfermedades estrictamente heredables, como la hemofilia y el síndrome de Down, representan alrededor de la mitad del total, el resto se manifiesta en un grupo de enfermedades llamadas multifactoriales, como la diabetes y el asma. Esta estimación del riesgo acarrea una incertidumbre considerable, principalmente para las enfermedades multifactoriales, sobre las cuales hay poco conocimiento respecto a la incidencia que tienen sobre ellas la interacción de los factores genéticos y medioambientales.

La irradiación de los testículos y ovarios sólo conlleva a un riesgo de efectos hereditarios si ocurre antes o durante el período reproductivo. Dado que la proporción de la población trabajadora que probablemente tenga hijos es menor que la de la población general, el



factor de riesgo para los trabajadores es menor. La ICRP estima el riesgo a la población trabajadora en $0,6 \times 10^{-2}$ por Sv o 1 en 170 por Sv para las enfermedades hereditarias graves en todas las generaciones futuras.

Las evaluaciones más recientes, muestran que los riesgos de efectos hereditarios pueden ser menores que esas primeras estimaciones, especialmente para las enfermedades multifactoriales. En su informe del año 2001 a la Asamblea General de la ONU, el UNSCEAR presentó una revisión integral de los riesgos here-

La mutación en el cromosoma 21, marcado con el círculo, es causante del Síndrome de Down

ditarios de la exposición a la radiación. Para una población compuesta por una sola generación expuesta a la radiación, se estimó que el riesgo a la progenie es de 0,3-0,5 % por Gy. Es decir, entre un tercio y un medio de la estimación de la ICRP, citada anteriormente, para todas las generaciones. Para las siguientes generaciones el riesgo es considerablemente menor. Dicho de otra manera, esta nueva estimación del riesgo por gray es del orden del 0,4-0,6 por ciento de la frecuencia fundamental de dichas enfermedades en la población humana.

Riesgo colectivo

Una consecuencia importante de la suposición de que el riesgo es proporcional a la dosis, sin umbral a dosis bajas, es que la dosis efectiva colectiva se convierte en un indicador del daño colectivo. Con ese concepto, matemáticamente da lo mismo si en una comunidad de 50 000 personas cada una recibe una dosis efectiva de 2 mSv o en una de 20 000 personas, cada individuo recibe 5 mSv: la dosis colectiva en cada comunidad es 100 Sv hombre y el costo colectivo en cada una de ellas puede ser

cinco fallecidos por cáncer y un defecto hereditario grave en las generaciones siguientes. No obstante, individualmente los miembros de la comunidad más pequeña corren un mayor riesgo de cáncer fatal. Sin embargo, los cálculos de dosis colectiva no deberían llevarse demasiado lejos: el producto de un número infinito de personas y una dosis infinitesimal muy probablemente no tiene sentido.

Irradiación durante el embarazo

Merece una mención especial el riesgo para los niños irradiados en el útero. Si un embrión o feto es expuesto a la radiación en el momento de formación de los órganos, la exposición puede causar defectos en el desarrollo, tales como la reducción del diámetro de la cabeza o retraso mental. Los estudios de quienes fueron expuestos antes del nacimiento, en los bombardeos atómicos, han demostrado que el retraso mental es principalmente consecuencia de la exposición durante el período entre la 8ª y 15ª semanas después de la concepción. La relación dosis-respuesta y la existencia de un umbral, por debajo del cual

no hay efecto, ha sido tema de debate. Para la exposición durante el período más sensible, desde la 8ª a la 15ª semana, sin embargo, la ICRP supone que la disminución en el coeficiente intelectual depende directamente de la dosis, sin umbral, con una pérdida de 30 puntos del coeficiente intelectual por Sv. Así, por ejemplo, una dosis de 5 mSv al feto durante esta fase del embarazo produciría una disminución en el coeficiente intelectual de 0,15 puntos, lo cual es indetectable.

Dosis grandes al embrión o feto pueden causar la muerte o una malformación masiva. El umbral para estos efectos está entre 0,1 Sv y 1 Sv o más, dependiendo del lapso transcurrido desde la concepción. Los riesgos genéticos en fetos se estiman iguales a los de una población plenamente reproductiva, a saber $2,4 \times 10^{-2}$ por Sv o 1 en 40 por Sv. La irradiación antes del nacimiento también puede llevar a aumentar el riesgo de tumores malignos en la niñez. El riesgo de cáncer mortal hasta la edad de 15 años se estima en alrededor de $3,0 \times 10^{-2}$ por Sv o 1 en 30 por Sv, y el riesgo total de cáncer alrededor de dos veces ese valor.

Por todas esas razones, lo mejor es evitar la radiografía del abdomen de las mujeres embarazadas, a menos que la postergación de dichos estudios hasta el fin de la gestación entrañe peligro. De hecho, para toda mujer en edad de gestar, cuando razonablemente no se puede excluir el embarazo, es prudente realizar los procedimientos de diagnóstico que imparten grandes dosis en la zona pélvica, solamente durante la etapa inicial del ciclo menstrual, cuando es menor la probabilidad de gravidez. Se aplican limitaciones especiales a la dosis que las mujeres embarazadas pueden recibir si trabajan con fuentes de radiación, ya que el feto debería tener igual nivel de protección que la población en general.

**SI ES POSIBLE QUE USTED
ESTÉ EMBARAZADA, DÍGASELO
AL MÉDICO O AL TÉCNICO,
ANTES DE QUE SE REALICE
EL ESTUDIO CON RAYOS X O
SE LE ADMINISTRE MATERIAL
RADIATIVO**

Texto de la advertencia que debería colocarse en distintos lugares, particularmente en las áreas de recepción de los departamentos de imagenología de los centros médicos

Circunstancias de la exposición	Consecuencias para la salud	Fuentes de información
Efectos agudos		
Dosis y tasa de dosis alta: a la mayor parte del cuerpo a un área de la piel a testículos y ovarios	Muerte Eritema Esterilidad	Datos de varias fuentes
Efectos tardíos		
Cualquier dosis o tasa de dosis El riesgo depende de la dosis Aparece años más tarde	Diversos tipos de cáncer	Factores para seres humanos estimados por extrapolación de datos para dosis y tasas de altas
Cualquier dosis o tasa de dosis El riesgo depende de la dosis Aparece en la descendencia	Defectos hereditarios	Los factores de riesgo de defectos hereditarios para seres humanos inferidos de los datos en animales y en ausencia de evidencia en humanos
Dosis alta a cualquier tasa Tiempos variables para que aparezca	Daño funcional	Datos de varias fuentes
Dosis en el útero Aparece en el niño	Retraso mental	Datos limitados

El enfoque de la protección radiológica es ampliamente coherente en todo el mundo. Esto se debe especialmente a la existencia de un marco de referencia bien reconocido y aceptado internacionalmente.

El UNSCEAR examina regularmente las fuentes naturales y artificiales de radiación, a las cuales las personas están expuestas, la exposición debida a esas fuentes y los riesgos asociados a dicha exposición. Informa en forma permanente sus resultados a la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas.

La ICRP es una organización científica, no gubernamental, fundada en 1928, que publica regularmente recomendaciones sobre la protección de la radiación ionizante. Su autoridad deriva del nivel científico de sus miembros y del mérito de sus recomendaciones. Basa sus estimaciones de la probabilidad de cáncer fatal, principalmente en los estudios de los sobrevivientes japoneses de las

bombas atómicas y en la evaluación de dichos estudios, por organismos como el UNSCEAR.

El OIEA tiene dentro de sus funciones legales establecer normas de seguridad, cuando es pertinente en colaboración con otros organismos internacionales. Para cumplir con su cometido, confía ampliamente en el trabajo del UNSCEAR y de la ICRP. También tiene la responsabilidad de proveer asistencia para la aplicación de las normas, a requerimiento de un Estado miembro, y la lleva a cabo a través de diversos mecanismos, incluyendo la provisión de servicios y de capacitación.

Principios generales

Para toda actividad humana, o práctica, que aumenta la exposición a la radiación, la ICRP recomienda un sistema de protección radiológica basado en tres requisitos principales. Cada uno de ellos involucra consideraciones sociales –de

1. Justificación de la práctica

Ninguna práctica que implique exposición a la radiación debería adoptarse a menos que produzca suficiente beneficio a los individuos expuestos o a la sociedad, para compensar el detrimento que la radiación causa.

2. Optimización de la protección

Respecto a cualquier fuente de radiación específica dentro de una práctica, la dosis de esa fuente a cualquier individuo debería estar por debajo de una restricción de dosis apropiada y deben tomarse todos los pasos razonables para ajustar la protección para que las exposiciones sean “tan bajas como sea razonablemente alcanzable”, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales.

3. Aplicación de límites a las dosis individuales

Debe aplicarse un límite a la dosis recibida por cualquier individuo como resultado de todas las prácticas (excepto el diagnóstico o tratamiento médico) a que esté expuesto.

manera explícita en los dos primeros e implícitamente en el tercero— por lo tanto, existe una enorme necesidad de ser criterioso.

En algunos casos como, por ejemplo, después de un accidente que libera material radiactivo al medio ambiente o cuando existen elevados niveles de radón en el interior de los edificios, puede

ser necesario intervenir para reducir la exposición de la gente. En tales circunstancias, la ICRP recomienda un sistema de protección radiológica de intervención basado en otros dos principios, que esencialmente difieren de los primeros, porque omiten los límites de dosis a los individuos. Especificar límites, no obstante, podría requerir medidas des-

1. Justificación de la intervención

La intervención propuesta debería implicar más beneficios que perjuicios, es decir, los beneficios que resulten de la reducción en la dosis deben ser suficientes para justificar el daño y el costo, incluyendo los costos sociales, de la intervención.

2. Optimización de la intervención

Deberían escogerse la forma, la escala y la duración de la intervención para que el beneficio neto de la reducción de dosis, es decir, el beneficio de la reducción en la dosis menos los costos de la intervención, sea lo más grande que se pueda alcanzar razonablemente.

proporcionadas al beneficio probable y podrían, por consiguiente, entrar en conflicto con el primer principio. La aplicación de este sistema requiere otra vez el ejercicio de buen discernimiento.

Ambos sistemas de protección radiológica están garantizados por las “Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación” o NBS, patrocinadas conjuntamente por el OIEA y otros cinco organismos internacionales.

El sistema de la ICRP ha sido incorporado ampliamente en las regulaciones de los distintos países. En este

capítulo, nos concentraremos principalmente en el sistema de protección para las prácticas; en capítulos posteriores, analizaremos las circunstancias en las cuales puede ser necesaria la intervención.

Alcance de la aplicación

Prácticas son las actividades humanas que incluyen la utilización deliberada de radiación. Dichas prácticas están claramente definidas y pueden regularse. Aunque generalmente no podemos hacer nada para reducir los niveles normales de la dosis debida a la radiación natural, es oportuno intervenir cuando las personas



están expuestas a niveles elevados de radón, ya sea en sus viviendas o en los lugares de trabajo. Para los trabajadores, también es necesario ejercer algún control sobre la exposición a la radiación de los minerales y otros materiales, como por ejemplo, de las incrustaciones calcáreas con concentraciones elevadas de radionucleidos naturales en las plataformas de extracción de petróleo o gas natural.

El uso de la radiación en medicina es principalmente una cuestión de criterio clínico, dado que la exposición médica tiene como propósito beneficiar al paciente. No sería sensato establecer límites a la dosis a los pacientes, ya que también podrían limitar los beneficios. Sin embargo, los principios de justificación y

optimización, analizados a continuación, deberían aplicarse totalmente, especialmente porque existe la posibilidad de reducir las dosis individuales, aunque la dosis colectiva de los procedimientos médicos sea elevada.

Justificación de la práctica

El primer requisito en el sistema de protección radiológica para una práctica da énfasis a la necesidad obvia de considerar el costo de los daños a la luz de los beneficios. En la mayoría de los casos, los efectos de la radiación son simplemente algunas de las posibles consecuencias perjudiciales que representan una parte del total de los costos sociales y económicos. Si hay otros modos de lograr el mismo fin, con o sin radiación, es importante analizar los costos y beneficios de cada opción antes de tomar la decisión definitiva en favor de alguna.

Las cuestiones originadas en el proceso de la justificación exceden el ámbito de la protección radiológica y pueden verse en las controversias sobre la *generación nucleoelectrica*. Las consecuencias radiológicas de un programa de generación nucleoelectrica incluyen tanto la emisión de

sustancias radiactivas al ambiente como las dosis recibidas por los trabajadores en dicha industria. Además, un análisis completo debería tratar la posibilidad de accidentes en las *centrales nucleares*, así como la producción de *desechos radiactivos*. También se deberían tener en cuenta los accidentes y las dosis a los mineros del uranio (quienes a menudo se encuentran en países distintos a los que utilizan el uranio).

Debería hacerse entonces una evaluación de las consecuencias de vivir sin la energía eléctrica producida por las centrales nucleares o de utilizar otros métodos para producirla —con carbón, por ejemplo. La energía eléctrica generada con carbón crea enormes volúmenes de desechos y de gases que agravan el efecto invernadero. Las usinas eléctricas que queman carbón liberan al medio ambiente sustancias tóxicas y también materiales radiactivos naturales. Los mineros del carbón sufren enfermedades ocupacionales y están sometidos al riesgo de potenciales accidentes durante el trabajo en las minas. Un análisis completo también debería considerar varios factores estratégicos y económicos: la diversidad, seguridad, disponibilidad y las reservas de los diversos combustibles, los costos de la construcción y operación de los varios tipos de centrales



eléctricas, la demanda esperada de energía eléctrica y el interés de la gente en trabajar en una determinada industria.

Asimismo, se requiere una justificación apropiada para la utilización de la radiación en el diagnóstico médico. Pocos cuestionaríamos la práctica: los beneficios son ciertos, aunque las dosis individuales en algunos exámenes y gene-

ralmente las dosis colectivas son elevadas. No obstante, cada procedimiento necesita ser calificado por sus méritos propios. Un programa masivo de *screening*¹ de cáncer, utilizando radiografías que podría ocasionar más casos de cáncer que los que probablemente detecte sería claramente inaceptable. Por esta razón, es muy improbable que exista la justificación clínica para el *screening* rutinario del personal, excepto en circunstancias especiales como en la prevención de la tuberculosis. La irradiación médica durante el embarazo, en particular, requiere una justificación clara y técnicas cuidadosas. Los exámenes radiológicos por motivos legales o de seguros de vida habitualmente no están justificados dado que no benefician a la salud de la persona expuesta.

De vez en cuando, se proponen prácticas que no satisfacen el análisis de la justificación: entre ellas están la producción de juguetes y joyas que contengan material radiactivo y también otros dispositivos, como aparatos para disuadir el hurto en comercios.

.....
1 Estudio de un grupo de personas no sintomático para determinar quiénes sufren de una determinada enfermedad.

Optimización de la protección

Dado que se supone que ninguna dosis de radiación está completamente libre de riesgo, es importante prestar atención a todas las dosis y reducirlas siempre que sea razonablemente posible. Eventualmente, se podría llegar al punto en el que una mayor reducción en la dosis se torna irrazonable, cuando los costos económicos y sociales llegan a superar el valor de la reducción. Por otro lado, los riesgos y beneficios asociados con una práctica en particular, a menudo, no se distribuyen uniformemente en la sociedad, esa es la razón por la que el segundo requisito –la optimización de la protección, recomendada por la ICRP– también incluye una restricción en el procedimiento, en la forma de restricción de la dosis o del riesgo a la gente para prevenir una injusta exposición a la radiación.

En la fase de planificación de una práctica que involucre exposición a la radiación, se imponen restricciones. El valor de la restricción de la dosis para los trabajadores, debería ser elegida de manera que refleje el valor de la dosis anual que puede alcanzarse razonablemente en

la industria en cuestión o en esa práctica en particular; también podría ser una fracción pequeña del límite de dosis anual. En la planificación de una nueva fuente de exposición a la radiación, como ser una instalación de producción que implique emisión de material radiactivo al ambiente, suele utilizarse para los miembros del público una restricción típica, de 0,3 mSv por año.

Durante las dos últimas décadas ha aumentado la influencia de la optimización de la protección en el mundo y en la mayoría de los países la dosis anual promedio de los trabajadores ocupacionalmente expuestos a la radiación está muy por debajo (un décimo o menos) de los 20 mSv al año que recomienda la ICRP. Algunos grupos de trabajadores reciben una dosis dos o tres veces superior a ese promedio, mientras que unos pocos trabajadores, una fracción muy pequeña del total, reciben más de 20 mSv/a. El análisis del UNSCEAR muestra que la dosis anual promedio a los trabajadores ocupacionalmente expuestos a las fuentes artificiales es 0,6 mSv, mientras que la dosis anual promedio a los trabajadores expuestos a fuentes naturales cuya concentración de radionucleidos ha au-



Protección del trabajador: celda blindada con telemanipuladores

mentado como consecuencia de su procesamiento industrial (por ejemplo en la minería) es superior a 1,8 mSv.

En la mayoría de los países, las dosis anuales a miembros individuales del público debido a prácticas que producen exposición han sido llevadas por debajo de 0,3 mSv por año –valor recomendado por la ICRP para la restricción primaria de la dosis al público. Incluso los grupos

Parámetros	Trabajadores	Público
Dosis efectiva		
Límite primario	20 ^a	1
Restricciones	— ^b	0,3 ^c
Dosis equivalente		
Cristalino	150 ^a	15
Piel ^d	500 ^a	50
Extremidades ^e	500 ^a	50

a: Para estudiantes y aprendices, tres décimos de estos valores.

b: No existen valores internacionales convenidos; las restricciones deben establecerse según la circunstancia (por ejemplo, tipo de industria u operación).

c: El valor probable para una sola nueva fuente de exposición.

d: Promediado para cualquier cm² de piel sin tener en cuenta el área expuesta.

e: Antebrazos, tobillos, manos y pies.

Límites internacionales de dosis y restricciones (mSv/a)

de personas más expuestas a las emisiones radiactivas de instalaciones nucleares, ya sea porque viven en la cercanía o porque tienen algún hábito alimentario especial, normalmente reciben dosis anuales que son una fracción de dicha restricción.

Las restricciones en la dosis o los niveles de orientación también son adecuados para la exposición médica de

pacientes; el objetivo es recortar las dosis de una manera sensata. Algunos procedimientos médicos rutinarios pueden impartir dosis sustanciales (varios mSv) mientras dichos valores pueden variar enormemente de un centro médico a otro. Esto último es de una importancia considerable. El uso de niveles orientadores proporciona un medio práctico para reducir la dosis a los pacientes sin una disminución en la información diagnóstica para el médico.

Limitación de la dosis

El tercer requisito en las prácticas es la obligación de no exponer a los individuos y a su descendencia a un nivel inaceptable de riesgo. Esto se satisface imponiendo límites estrictos de dosis y aplicando el principio de optimización de la protección. La NBS especifica como límite de dosis para trabajadores 20 mSv por año (promediado durante un período quinquenal, sin que sobrepase los 50 mSv durante cualquier año) y para los miembros del público de 1 mSv por año.

Estos límites primarios, expresados en términos de dosis efectiva, tienen como propósito controlar la incidencia

de consecuencias serias como el cáncer y el daño hereditario, que implican un factor probabilista. Otro grupo de límites, expresados en términos de dosis equivalente, son para proteger los ojos, la piel y las extremidades contra otras formas de daño.

Existen comúnmente dos conceptos erróneos sobre el límite de dosis. El primero es que los límites de dosis definen un cambio abrupto en el riesgo biológico, una línea de demarcación entre lo seguro y lo inseguro. De la discusión sobre dosis y riesgo, debería haber quedado claro que eso no es así. También debería ser evidente porque hay límites de dosis diferentes para trabajadores y para miembros del público. Estos límites difieren porque se considera aceptable mayor riesgo para los trabajadores, que reciben el beneficio del salario, que para la población en general, que sufre el riesgo involuntariamente. El segundo concepto erróneo es considerar que mantener la dosis por debajo del límite es el único requisito importante en protección radiológica. Por el contrario, el requisito máximo es mantener las dosis tan bajas como sea razonablemente alcanzable. Esto se refleja en el creciente énfasis puesto en los niveles de investigación,

los cuales, por supuesto, se establecen por debajo de los límites de dosis.

Normas básicas internacionales de seguridad

Las NBS, publicadas en 1996, están basadas principalmente en el sistema, descrito anteriormente, de protección radiológica de la ICRP. Estas normas establecen requisitos detallados para las exposiciones ocupacionales, médicas y del público, además de especificar límites de dosis y exenciones. También detallan los requisitos para certificar la seguridad de las fuentes radiactivas y para enfrentar las emergencias nucleares. Las Guías de Seguridad del OIEA dan una orientación más detallada de cómo deberían satisfacerse los requisitos en determinadas situaciones. La mayoría de los países utilizan estas normas en su legislación y en los requisitos de los reguladores.

Infraestructura reguladora

Las NBS especifican los requisitos técnicos, científicos y administrativos para el uso seguro de la radiación. Sin embargo, estos requisitos presuponen

Organizaciones que patrocinaron las Normas básicas internacionales de seguridad

Organización para la Agricultura y la Alimentación*

Organismo Internacional de Energía Atómica *

Organización Internacional del Trabajo*

Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos

Organización Panamericana de la Salud

Organización Mundial de la Salud*

* Indica una agencia de las Naciones Unidas



que ciertos programas básicos estén en vigencia para controlar la utilización de la radiación. Dichos programas básicos son referidos como “la infraestructura para la seguridad”, e incluyen leyes y regulaciones sobre el uso de la radiación y de los materiales radiactivos, además de un organismo regulador responsable de garantizar que las mismas se cumplen. Normalmente, esa infraestructura está desarrollada en los países con programas de centrales nucleares. Sin embargo, esta infraestructura es necesaria, no sólo para

la generación nucleoelectrónica sino, en una escala menor, para cualquier uso de la radiación. Casi todos los países hacen algún uso de la radiación en medicina o en la industria. Cuando las NBS fueron publicadas, el OIEA se dio cuenta de que muchos países sin programas de centrales nucleares no contaban con una infraestructura de seguridad apropiada, por lo que se inició un importante proyecto para ayudar a mejorar su capacidad para administrar con seguridad los usos de la radiación.

La radiación ionizante de origen natural está diseminada en todo el ambiente. Los rayos cósmicos llegan a la Tierra desde el espacio exterior y la Tierra misma es radiactiva. Los materiales radiactivos naturales están presentes en los alimentos, en la bebida y en el aire. Todos estamos expuestos, en mayor o menor medida, a la radiación natural, la fuente principal de exposición para la mayoría de las personas. Sin embargo, los seres humanos, los animales y las plantas han evolucionado en ese fondo de radiación natural y en general se considera que significa un riesgo intrascendente para la salud –aunque hay excepciones.

Radiación cósmica

Los rayos cósmicos son esencialmente protones –de un origen incierto en el espacio– de energías muy elevadas, que alcanzan nuestra atmósfera en cantidades relativamente constantes. Se sabe, sin em-

bargo, que algunos protones de energías más bajas proceden del Sol y son emitidos en ráfagas durante las deflagraciones solares. Los protones son partículas cargadas, por eso el conjunto que ingresa en la atmósfera es afectado por el campo magnético terrestre –arriban muchísimos más cerca de los polos que en el ecuador– de allí que la tasa de dosis aumente con la latitud. A medida que penetran en la atmósfera, inician complejas reacciones nucleares y como son absorbidos la tasa de dosis se reduce gradualmente cuando disminuye la altura. La radiación cósmica es una mezcla de muchas clases diferentes de radiación: protones, partículas alfa, electrones y diversas partículas de alta energía. A nivel del suelo, la radiación cósmica está constituida principalmente por muones, neutrones, electrones, positrones y fotones mientras la mayor parte de la dosis se debe a muones y electrones. El UNSCEAR ha calculado que la dosis efectiva anual de los rayos cósmicos al ni-



Proyecto Pierre Auger,
estudio de la radiación
cósmica, Malargüe,
Mendoza

vel del mar está, en promedio, alrededor de 0,4 mSv, teniendo en cuenta las variaciones en elevación y latitud.

La mayoría de la gente vive en áreas localizadas a baja altura y, por ende, reciben dosis anuales similares, debidas a la radiación cósmica (con algunas fluctuaciones por la latitud). Sin embargo, existen algunos importantes centros urbanos a considerables alturas (por ejemplo, Quito y La Paz, en los Andes, Denver, en las Montañas Rocallosas, Lasa, en el Himalaya), donde los residentes pueden recibir dosis anuales varias veces mayores que las que reciben las personas que viven a nivel del

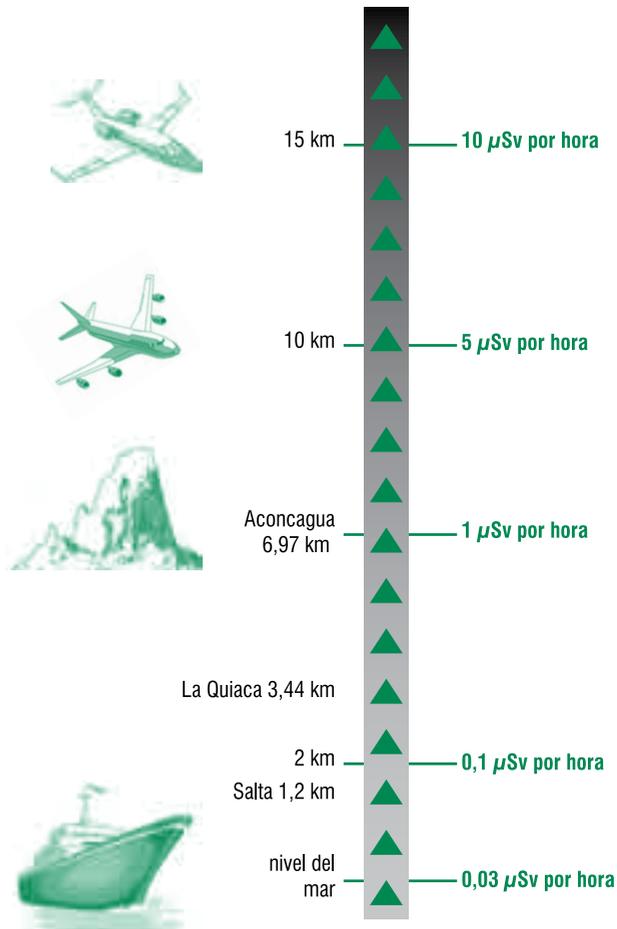
mar. Como ejemplo, el valor anual para La Paz es cinco veces el promedio general. También el tipo de construcción que una persona habita puede afectar levemente la dosis debida a los rayos cósmicos. A la altura de vuelo de las aeronaves comerciales la intensidad de los rayos cósmicos es mucho mayor que en el suelo. A la altitud de crucero en un vuelo intercontinental, la tasa de dosis puede alcanzar 100 veces el valor en el suelo. Los viajes aéreos en general dan lugar a una dosis anual extra de 0,01 mSv, en promedio, a algunos grupos (las dosis a los individuos “viajeros frecuentes” será muy superior a ese promedio), pero ello no afecta el promedio mundial de 0,4 mSv.

Radiación gamma terrestre

Todos los materiales de la corteza terrestre incluyen nucleidos radiactivos. La energía liberada por la actividad de los radionucleidos naturales en las profundidades es la que contribuye a dar forma a la corteza y al mantenimiento de la temperatura interna de la Tierra. La energía proviene esencialmente del decaimiento de los isótopos radiactivos del uranio, del torio y del potasio.

El uranio está disperso en rocas y suelos de la corteza terrestre en baja concentración, de unas pocas partes por millón (ppm)¹. Cuando excede las 1000 ppm en un mineral puede resultar económico extraerlo para usarlo en las centrales nucleares. El uranio 238 es el progenitor de una larga familia o serie de radionucleidos de diversos elementos, que decaen en sucesión hasta alcanzar el nucleido estable plomo 206. Entre los productos de decaimiento está un isótopo del gas radiactivo radón, el radón 222, el cual, percolando en el terreno, puede llegar a la atmósfera, donde continuará emitiendo radiación. El torio, también en forma similar, está disperso en el suelo. El torio 232 es, a su vez, progenitor de otra familia o serie radiactiva que da lugar, entre otros, al radón 220, otro isótopo del gas radón, a veces llamado torón. El potasio, mucho más común que el uranio o el torio, representa el 2,4 por ciento en peso de la corteza de la Tierra. El radionucleido potasio 40, sin embargo, representa sólo 120 ppm del potasio estable.

.....
1 Sin embargo, su concentración es más alta que la de otros elementos conocidos desde la antigüedad, como por ejemplo el oro y el mercurio.



Los radionucleidos en el terreno, al emitir la penetrante radiación gamma, irradian a la gente más o menos uniformemente. Dado que la mayoría de los materiales de construcción se extraen de la Tierra, también son levemente radiac-

Dosis efectivas anuales de la radiación natural

Basado en la Tabla 1 del informe 2000 del UNSCEAR 2000 a la Asamblea General de la ONU

Fuente	Promedio mundial Dosis (mSv)	Rango típico Dosis (mSv)
Radiación cósmica	0,4	0,3-1,0
Radiación gamma	0,5	0,3-0,6
Inhalación de radón	1,2	0,2-10
Irradiación interna	0,3	0,2-0,8
Total (redondeado)	2,4	1,0-10

Dosis efectivas anuales de la radiación natural

Basado en la Tabla 1 del informe 2000 del UNSCEAR 2000 a la Asamblea General de la ONU

tivos, razón por la cual las personas son irradiadas tanto dentro como fuera de sus hogares. Las dosis que reciben están influidas tanto por la geología de la zona donde viven como por la estructura de los edificios que habitan, siendo el promedio de la dosis efectiva de radiación gamma natural de alrededor de 0,5 mSv por año. Los valores reales varían marcadamente. Algunos individuos pueden recibir dosis varias veces superiores o inferiores al promedio. En las pocas localidades donde naturalmente el suelo tiene concentraciones relativamente elevadas de radionucleidos, como en Kerala (India) partes de Francia y Brasil, la dosis puede llegar a ser hasta 20 veces el promedio mundial. Aunque en general poco es lo que puede hacerse para influir sobre dicha dosis, sería sensato, cuando es posible, evitar la construcción en esas zonas o la edificación

con materiales con una concentración de radionucleidos excepcionalmente alta.

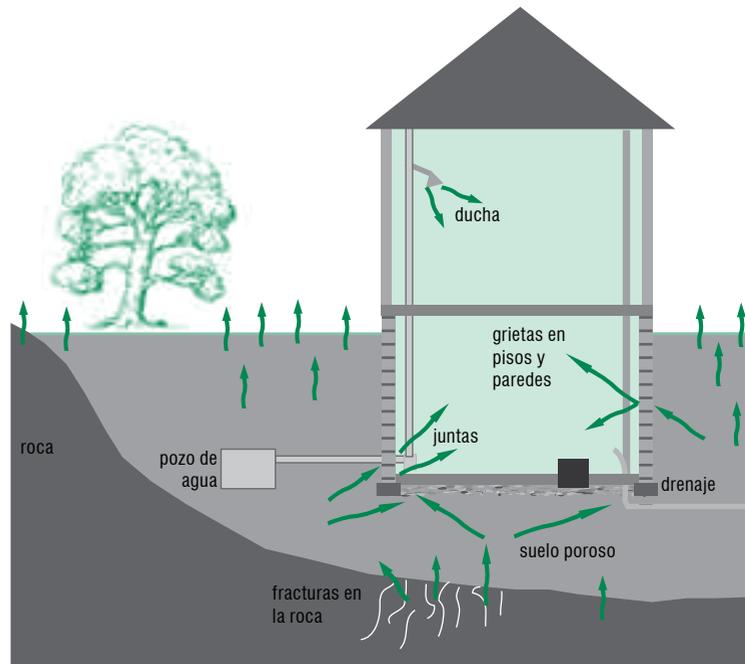
Inhalación del radón

El gas radón es una fuente importante en la exposición a la radiación natural. Esto es debido a que los productos inmediatos del decaimiento del gas radón 222 son radionucleidos sólidos, de periodos cortos, que se adhieren a partículas suspendidas en el aire, las que al ser inhaladas irradian los tejidos del pulmón con partículas alfa e incrementan el riesgo de cáncer pulmonar. Lo mismo es cierto para el radón 220 (torón), pero en este caso el grado de exposición del pulmón es mucho menor. Cuando el gas radón emerge del terreno, se dispersa en el aire, por lo tanto su concentración puertas afuera es baja. Cuando el gas penetra en un edificio, predominantemente a través del piso desde el suelo, la concentración de actividad aumenta dentro del espacio cerrado.

Si las viviendas están bien ventiladas, no se acumula el radón. Sin embargo, en muchos países –habitualmente en los más fríos– los edificios se construyen poniendo mayor énfasis en la retención del calor y la prevención de las corrientes de aire. Por

consiguiente, están con frecuencia pobremente ventilados y la concentración de radón en su interior puede ser considerablemente superior a la que hay al aire libre. Las concentraciones de radón en los edificios también dependen de la estructura geológica regional y pueden variar enormemente entre zonas diferentes de un país e incluso de un edificio a otro en la misma área.

La dosis efectiva anual promedio de los productos de decaimiento del radón, en todo el mundo, se estimó en alrededor de 1,2 mSv. Existen, no obstante, pronunciadas variaciones de dicho valor. En algunos países (por ejemplo Finlandia), el promedio nacional es varias veces superior y, en muchos de ellos, algunos ocupantes de viviendas particulares han recibido dosis efectivas del orden de centenares de mSv por año. Teniendo esto en cuenta, tanto la ICRP como el OIEA han recomendado la aplicación de niveles de acción (expresados en Bq por metro cúbico) por encima de los cuales se aconseja a los dueños de casa que atenúen el nivel del radón en las viviendas. Típicamente estos niveles de acción deberían estar entre 200-600 Bq por metro cúbico, lo cual es cerca de diez veces el valor promedio de la concentración del radón en las casas.



Como ingresa el radón en una vivienda

Cualquiera que detecte niveles altos de radón en su hogar puede reducirlos, impidiendo que el gas proveniente del terreno ingrese en el inmueble. La manera más eficaz para hacerlo es reducir la presión atmosférica debajo la vivienda con un pequeño extractor. Dicha acción es un ejemplo de intervención con el fin de reducir la exposición humana a la radiación ionizante, según la definición de la ICRP, como se mencionó en el capítulo 5.

Irradiación interna

Otros radionucleidos de las series del uranio y del torio, en particular el plomo 210 y el polonio 210, están presentes en el aire, los alimentos y el agua y, por lo tanto, irradian internamente. También el potasio 40 se incorpora al organismo humano con la dieta normal. Ésta es la principal fuente de irradiación interna, aparte de los productos de decaimiento del radón. Asimismo, la interacción de los rayos cósmicos con los componentes de la atmósfera origina diversos radionucleidos, entre ellos el carbono 14, que también contribuye a la irradiación interna.

La dosis efectiva de estas fuentes de irradiación interna se estima en 0,3 mSv por año, la mitad es tributada por el potasio 40. La información de cómo el total varía de una persona a otra es limitada, aunque se conoce que el contenido de potasio en el organismo humano está controlado por procesos biológicos. La cantidad de potasio y, por ende, de potasio 40, varía con la masa muscular de las personas y es casi dos veces mayor en los hombres jóvenes que en las mujeres mayores. Muy poco se puede hacer para influir la irradiación interna debida

a otros radionucleidos, excepto evitar el consumo de comida y agua con un alto contenido de materiales radiactivos.

Dosis total

La dosis efectiva total promedio debida a la radiación natural es poco más o menos 2,4 mSv por año, aunque puede variar considerablemente. Algunos promedios nacionales exceden los 10 mSv al año, mientras que, en algunas regiones, las dosis individuales pueden rebasar los 100 mSv en el año, por lo general debido a niveles particularmente altos de radón y sus productos de decaimiento en las viviendas.

Para comparar la importancia para la salud de las fuentes de radiación naturales y artificiales, las dosis promedio son datos útiles, pero pueden necesitar ser complementadas con informes adicionales cuando hay grandes variaciones del promedio, como pasa con el radón dentro de las viviendas. El paso más útil podría ser describir la frecuencia con las cuales las dosis de cierto valor se producen en determinadas circunstancias.

CAPÍTULO 8 USO DE LA RADIACIÓN EN MEDICINA

En medicina se utiliza la radiación ionizante con dos fines muy diferentes: diagnóstico y terapia. Ambos tienen como propósito beneficiar a los pacientes y, como en todo uso de la radiación, el beneficio debe superar con creces el riesgo. En el capítulo 6 se mencionó ese tema al tratar la justificación de las prácticas.

La mayoría de las personas, en algún momento de sus vidas, es examinada radiológicamente para ayudar al médico a diagnosticar una enfermedad o lesión en el organismo. Otro procedimiento

de diagnóstico, marcadamente menos frecuente, incluye la administración de radionucleidos a los pacientes, de modo que utilizando detectores externos se puede observar cómo están funcionando sus órganos. Los médicos utilizan cualquiera de dichos procedimientos cuando no pueden hacer un buen diagnóstico sin ellos. Las dosis de radiación son generalmente bajas, aunque pueden llegar a ser considerables en ciertos procedimientos.

Para tratar tumores malignos o una anomalía en el funcionamiento de



Primera radiografía de una mano (de la señora Roentgen)

Habitantes por médico	Exámenes por año cada 1000 personas	Dosis efectiva promedio anual, mSv
<1000	920	1,2
1000-3000	150	0,14
3000-10 000	20	0,02
> 10 000	<20	0,02
Promedio mundial	330	0,4

Exposiciones a la radiación debidas a procedimientos médicos de diagnóstico (UNSCEAR)

Datos extraídos de la Tabla 2 del informe 2000 del UNSCEAR a la Asamblea General de la ONU

un órgano, se necesitan dosis muy superiores, a veces en combinación con otras formas de tratamiento. Se puede utilizar un haz de radiación para tratar la parte afectada del cuerpo humano o administrar una actividad bastante elevada de un radionucleido al paciente.

La *radiología diagnóstica* es el uso de rayos x para examinar a los pacientes, en tanto que la administración de fármacos marcados con radionucleidos para diagnóstico o terapia es la base de la *medicina nuclear*. Cuando se utilizan haces de radiación para tratar a los pacientes, el procedimiento se denomina *radioterapia*.

Radiología

En un examen radiográfico convencional, la radiación, que es producida por el equipo, atraviesa el paciente. Los rayos x penetran los músculos y los huesos en diferente grado, produciendo imágenes de las estructuras internas del cuerpo humano en una película fotográfica. En algunos casos, las imágenes se capturan y procesan electrónicamente. El valor diagnóstico de esas imágenes explica por qué los médicos en los países desarrollados practican por lo menos una radiografía por persona al año.

Dosis típicas a los pacientes, de exámenes radiográficos convencionales y de tomografía computada

Derivado de los datos en el informe 2000 del UNSCEAR, Vol. 1, Anexo D, Tablas 15 y 19

Estudio	Dosis radiografía convencional (mSv)	Dosis tomografía computada (mSv)
Abdomen	0,5	10
Cabeza	0,07	2
Colon	6	–
Columna lumbar	2	5
Dientes	<0,1	–
Miembros y articulaciones	0,06	–
Pelvis	0,8	10
Tórax	0,1	10

Las partes del cuerpo más frecuentemente examinados son el tórax, los miembros superiores e inferiores y los dientes; cada una de estas partes contabiliza alrededor del 25% del total de exámenes. Las dosis son bastante bajas, por ejemplo, aproximadamente 0,1 mSv en un estudio del tórax. Las dosis efectivas de otros estudios, como la radiografía de la columna lumbar, son más elevadas, porque se exponen órganos y tejidos que son más sensibles a la radiación. Los exámenes del colon utilizando enema de bario ocasionan una dosis efectiva sustancial de aproximadamente 6 mSv, aunque los estudios de dicho tipo son sólo el 1 por ciento del total.

En años recientes, ha aumentado considerablemente la utilización de la tomografía computada (TC) al punto que, en los países desarrollados, cerca del 5 por ciento de todos los procedimientos de diagnóstico radiológico son exámenes de TC. En esta técnica, un haz de rayos x en forma de abanico gira alrededor del paciente y es registrado en el lado opuesto por una hilera de detectores. La imagen de una rodaja o sección transversal del paciente entonces es reconstruida (matemáticamente)

por una computadora, produciendo una información diagnóstica superior. Lamentablemente, las dosis de TC pueden llegar a ser un orden de magnitud o más que en los estudios radiográficos convencionales.

Los exámenes con tomografía computada son el contribuyente más importante a la dosis colectiva por diagnóstico médico y en algunos países aportan más del 40 por ciento del total. Los estudios del colon participan con cerca del 10 por ciento de la dosis colectiva total, mientras que los exámenes de tórax con alrededor del uno por ciento. Resulta claro de estas cifras que procedimientos poco frecuentes pueden originar una dosis considerablemente mayor a la población que otros más comunes. Ésta es la razón por la que no se recurre a la tomografía computada cuando basta una simple radiografía.



Equipo de tomografía computada, en operación

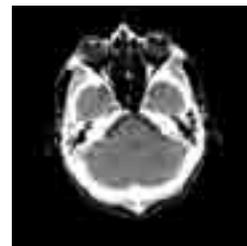


Imagen de tomografía computada



Tarea de calibración de un equipo de tomografía por emisión de positrones (PET)

Sin embargo, el procedimiento que imparte las dosis más altas es la radiología intervencionista. Esto es cuando el cirujano, para realizar un procedimiento dentro del cuerpo del paciente, utiliza una sucesión de disparos de rayos x para “ver” en tiempo real dentro del organismo. Ello permite que la intervención en un órgano pueda ser realizada sin una cirugía mayor, que de otra manera sería necesaria para tener acceso a la zona afectada. Sin embargo, los procedimientos mencionados pueden ocasionar a los pacientes dosis de entre 10-100 mSv y, si no se tiene cuidado, puede derivar en dosis análogamente elevadas al médico intervencionista. En algunos casos, las dosis debidas a dichos procedimientos han sido suficientemente grandes como para causar efectos deterministas en pacientes y médicos cirujanos.

Medicina nuclear

En un procedimiento diagnóstico en medicina nuclear se administra al paciente un radionucleido emisor de radiación gamma en una sustancia portadora, que puede ser un fármaco que tienda a ser capturado preferentemente por el órgano o tejido bajo estudio. La administración puede ser por inyección, ingestión, o inhalación.

La mayoría de los procedimientos de diagnóstico hacen uso del tecnecio 99^m . Dicho radionucleido tiene un periodo (de semidesintegración) de 6 horas, emite rayos gamma con una energía de 0,14 MeV, puede prepararse convenientemente en el centro médico y se incorpora fácilmente a una multiplicidad de sustancias portadoras. Para observar cómo los órganos o tejidos se comportan, o la velocidad de eliminación del radionucleido, se utiliza un detector especial denominado cámara gamma.

Las dosis individuales por los estudios con tecnecio son comparables a las de los estudios radiológicos. Sin embargo, la dosis colectiva debida a la medicina nuclear es alrededor de un

orden de magnitud menor, ya que el número de procedimientos es considerablemente inferior.

Cuando se utilizan radionucleidos para tratamiento, en lugar de diagnóstico, se administran actividades mucho más grandes al paciente y dosis muy elevadas al órgano o tejido blanco. El tratamiento de una glándula tiroidea hiperactiva –hipertiroidismo– utilizando el radionucleido yodo 131, es probablemente el procedimiento terapéutico más común.

Aunque los radionucleidos utilizados para estos procedimientos tienen periodos cortos, el personal médico deberá tener en cuenta que después del procedimiento la actividad permanecerá durante algún tiempo en el cuerpo del paciente al que se le administró. Esto debería ser considerado, sobre todo después de un procedimiento terapéutico, al decidir cuándo el paciente puede ser dado de alta. También algunas veces la familia y amistades del paciente pueden ser aconsejadas por el servicio médico sobre cómo tomar las precauciones adecuadas a una exposición inadvertida a la actividad remanente.

Órgano examinado	Dosis efectiva (mSv)
Cerebro	7
Huesos	4
Tiroides	1
Pulmón	1
Hígado	1
Riñón	1

Dosis típicas a los pacientes en los estudios comunes de órganos, en medicina nuclear

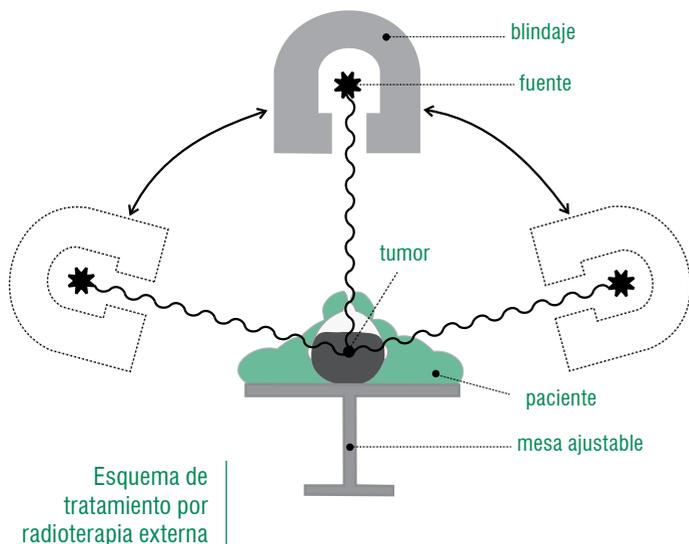
Valores, redondeados, derivados de los datos en el informe 2000 del UNSCEAR, Vol.1, Anexo D, Tabla 42

Radioterapia

Esta técnica se utiliza para curar o, al menos, para aliviar los síntomas más dolorosos de un cáncer, destruyendo las células malignas. Un haz de rayos x de alta energía, rayos gamma o electrones, es dirigido hacia el tejido enfermo para impartirle una dosis elevada mientras se procura no dañar el tejido sano circundante. Si el tumor está profundo en el

Generador de tecnecio 99^m

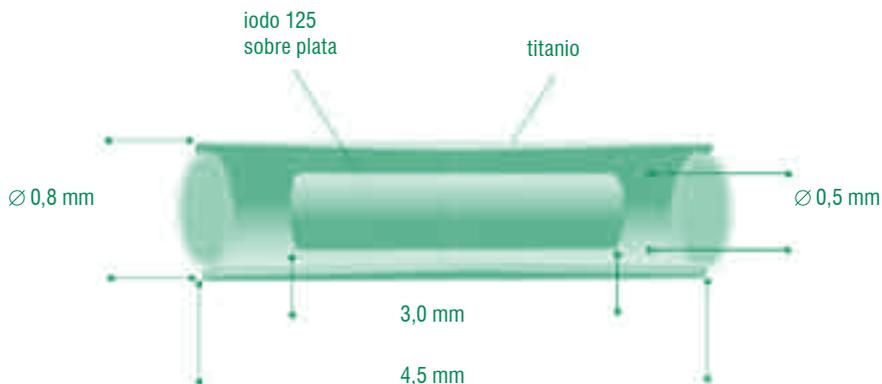




cuerpo, para reducir daños secundarios el haz se apunta desde varias direcciones. En otra forma de tratamiento, denominada *braquiterapia* y utilizada con algunos tipos de cáncer, una fuente radiactiva se coloca en o sobre el cuerpo por un lapso corto. Como las dosis en radioterapia son intensas, dicho tratamiento sólo se utiliza cuando la perspectiva de cura o de alivio es buena y otros métodos de tratamiento serían menos eficaces.

Aunque la radioterapia puede curar el cáncer original, puede originar un tumor maligno en otros tejidos o causar efectos hereditarios adversos en las generaciones

Esquema de "semilla" cargada con yodo 125, para braquiterapia intersticial. Se implantan en forma permanente en tumores con baja o moderada radiosensibilidad, como los de próstata



venideras. Sin embargo, mucha de la gente tratada con radioterapia, ha dejado atrás la edad de procrear y está demasiado entrada en años como para que aparezca un cáncer tardío. Por ende, el objetivo de la radioterapia es aumentar al máximo la eficacia del tratamiento, mientras se reducen al mínimo los efectos colaterales adversos.

Aniquilar eficazmente las células cancerosas de un tumor demanda una dosis absorbida de decenas de gray. Las dosis prescritas al tejido tumoral van desde los 20 hasta los 60 Gy. Es necesario un considerable cuidado para impartir la dosis exacta: dosis demasiado pequeñas o grandes pueden resultar en un tratamiento incompleto o en efectos colaterales inaceptables. Además, son necesarios rigurosos procedimientos de garantía de calidad para asegurar que el equipamiento está correctamente ajustado y mantenido. Si no se procede así, las consecuencias pueden ser graves: en 1996 una haz de radioterapia mal calibrado en Costa Rica determinó que más de 100 pacientes recibieran dosis mayores que las planificadas, conduciendo en numerosos casos a lesiones graves o la muerte. En 2001, se detectó en Panamá que problemas en la introducción de datos en el sistema computarizado de plani-

ficación del tratamiento habían producido una sobreexposición a 28 pacientes; a consecuencia de ello, varios fallecieron.

Niveles de orientación para la exposición médica

Ya que la radiología diagnóstica es utilizada tan ampliamente y la dosis colectiva es tan grande, es importante evitar exposiciones innecesarias y mantener las exposiciones esenciales tan bajas como sea posible. La decisión de prescribir un examen radiológico es una cuestión de criterio médico, realizada para el máximo beneficio del paciente. La dosis al paciente debería ser la menor posible compatible con un diagnóstico preciso. Los médicos precisan tener el cuidado especial de reducir al mínimo las dosis en los exámenes pediátricos.

Los métodos para minimizar dosis incluyen el uso de un equipamiento de calidad, bien mantenido, ajustado adecuadamente y operado con destreza, así como la aplicación de un programa de garantía de calidad en el departamento de radiología. La dosis derivada de exámenes radiológicos idénticos puede variar de paciente en

Niveles orientativos de dosis de la OIEA para radiografía de diagnóstico para un paciente adulto típico

Fuente: Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación (1996) Adenda III, página 279

Examen	Dosis superficie de entrada por radiografía mGy)
Columna lumbar AP	10
Tórax PA	0,4
Cráneo PA	5

Nota: PA = proyección posterior-anterior; AP = anterior-posterior.

paciente, debido a diferencias en el tamaño y la contextura de ellos, pero generalmente deberían estar por debajo de un valor establecido. Esto, como fue mencionado en el capítulo 6, se denomina *dosis de referencia o dosis orientadora* y la NBS incluye niveles de dosis, de la tasa de dosis y de la actividad de orientación para las exposiciones en las aplicaciones médicas.

vido a todos los procedimientos de diagnóstico. Sin embargo, la realidad es que a las personas jóvenes no se les prescriben demasiadas radiografías y que la probabilidad de necesitar un examen aumenta con la edad. En general, esto implica, por consiguiente, una probabilidad menor de que llegue a manifestarse un cáncer.

Dosis total

Dado el gran número de procedimientos radiográficos de diagnóstico llevados a cabo, particularmente en los países desarrollados, la dosis colectiva derivada de esta práctica es realmente alta. El UNSCEAR ha estimado una dosis colectiva de 2500 millones de Sv hombre de-

Son varias las actividades laborales en las que los trabajadores están sometidos a la exposición a la radiación ionizante. Esto ocurre en las centrales nucleares y también en diversas industrias manufactureras y empresas de servicios, en las áreas de defensa, en universidades e institutos de investigación, donde se utilizan fuentes artificiales de radiación. Por otra parte, como hemos visto en el capítulo 8, las fuentes artificiales de radiación son ampliamente utilizadas en medicina.

Contador Geiger-Müller



Algunos trabajadores también están expuestos a fuentes naturales de radiación, en situaciones tales que requieren una cierta supervisión y protección. Esto es particularmente evidente en minas y en lugares de trabajo en zonas donde los niveles de radón son altos. Debido a que a la altura de crucero de las aeronaves comerciales la intensidad de los rayos cósmicos causan tasas de dosis relativamente altas, algunos consideran que también es necesaria la supervisión de las tripulaciones aéreas, aunque está poco claro hasta qué punto pueden reducirse razonablemente las exposiciones.

Muchas de las personas que en su trabajo están expuestas a la radiación portan dispositivos individuales de vigilancia radiológica (o dosímetros), tales como una pequeña película fotográfica



Dosímetro personal

Fuente	Dosis (mSv)
Fuentes artificiales	
Industria nuclear	
Minería del uranio	4,5
Tratamiento del mineral	3,3
Enriquecimiento	0,1
Fabricación del combustible	1,0
Reactores nucleares	1,4
Reprocesamiento	1,5
Usos en medicina	
Radiología	0,5
Odontología	0,06
Medicina nuclear	0,8
Radioterapia	0,6
Fuentes industriales	
Irradiación	0,1
Radiografía	1,6
Producción de radioisótopos	1,9
Explotación petrolíferas	0,4
Aceleradores	0,8
Iluminación isotópica	0,4
Fuentes naturales	
Fuentes de radón	
Minas de carbón	0,7
Minas de metales	2,7
Lugares de trabajo a nivel del suelo (radón)	4,8
Fuentes cósmicas	
Tripulación de aviones comerciales	3,0

o un material termoluminiscente montados sobre un soporte especial. Para dicho propósito, también se está incrementando el uso de dispositivos electrónicos. Éstos registran la radiación de fuentes externas incidente sobre el cuerpo, dando una estimación directa de la dosis absorbida por el usuario.

La forma más adecuada de determinar la cantidad de material radiactivo, ya sea de origen artificial o natural, que hay en el aire en los lugares de trabajo, es medir la actividad en muestras de ese aire. En algunos casos, puede ser posible medir la actividad en excretas de los trabajadores e inferir la dosis recibida o medir la actividad directamente en el cuerpo con dispositivos diseñados a tal efecto. El objetivo siempre es conseguir la mejor estimación de la dosis que sea posible.

Dosis efectivas anuales promedio en ocupaciones diferentes (UNSCEAR), datos para 1990-1994

Fuente: UNSCEAR, Informe 2000, Vol. 1, Anexo E, Tablas 12, 16, 22 y 43



Medición de la radiación emitida por una fuente radioisotópica de energía eléctrica

Usos corrientes de la radiación en la industria

Radiografía de juntas y soldaduras

Inspección por seguridad de bolsas y paquetes

Determinación del nivel de contenido de recipientes

Esterilización de algunos suministros médicos

Eliminación de la electricidad estática en la producción del papel

Análisis de especímenes para el control de la calidad

Fuentes artificiales

Los trabajadores ocupacionalmente expuestos en la industria nuclear mundial son alrededor de 800 000 y en las instalaciones médicas, más de 2 millones. El UNSCEAR ha compilado los datos de las dosis recibidas por dichos trabajadores y por otros, como los radiólogos industriales. La dosis colectiva de los trabajadores de la industria nuclear está en alrededor de 1400 Sv hombre, mientras que para los que se desem-

peñan en el ámbito de la medicina es alrededor de 800 Sv hombre. Como el número de personas que trabaja en las aplicaciones industriales de la radiación es menor, la dosis colectiva también es menor, alrededor de 400 Sv hombre. Sin embargo, en algunos países, dichos trabajadores son los que reciben las dosis individuales más elevadas. La dosis promedio en conjunto para trabajadores expuestos a fuentes artificiales de radiación es menor de 1 mSv por año. El promedio en la industria nu-

Lugar de muestreo		Número de muestras	Valor promedio en Bq/m ³
Argentina		975	33
Provincia	Ciudad		
Corrientes	Corrientes	124	48,5
San Luis	San Luis	100	23,3
Mendoza	General Alvear	100	44,9
Mendoza	Malargüe	83	44,6
Mendoza	San Rafael	257	37,1
Buenos Aires	Capital Federal y Gran Buenos Aires	102	33,6
Córdoba	Córdoba	94	16
Santiago del Estero	Río Hondo y Frías	66	30,2
Río Negro	Bariloche	18	35,5
Chubut	Esquel y Gastre	31	16

Mediciones de gas radón en el interior de edificios de la República Argentina

clear tiende a estar por encima de ese valor, mientras que el promedio para el personal en el área de la medicina es levemente menor. Las dosis han disminuido en forma brusca, principalmente en la última década, debido a la amplia aceptación de las recomendaciones de la ICRP y de las NBS.

Exceptuando a la minería, las dosis promedio de la mayoría de los trabajadores expuestos ocupacionalmente a las

fuentes artificiales, incluyendo los de la industria nuclear, están ahora por debajo de alrededor de 2 mSv por año.

Las dosis a los profesionales de la salud –en medicina, odontología y veterinaria– generalmente son muy bajas, aunque son todavía tema de preocupación. Algunos procedimientos para el diagnóstico radiológico exigen al personal médico estar cerca del paciente, con el riesgo de una exposición considerable. En la práctica

veterinaria tanto el equipamiento de rayos x como los procedimientos son con frecuencia inadecuados.

Fuentes naturales

La exposición ocupacional “incrementada”, causada por fuentes naturales de radiación sucede principalmente en minas, edificios y aeronaves. Se supervisa la exposición a la radiación a los casi 4 millones de trabajadores en las minas de carbón. También se supervisan rutinariamente las dosis recibidas por alrededor de un millón en todo el mundo que trabajan en minas de otros materiales y en el procesamiento de minerales con niveles de actividad natural sensiblemente por encima del promedio.

Los niveles de radón –y las dosis– en las minas de carbón son bajos, porque habitualmente la ventilación es buena. Muy pocos mineros exceden los 15 mSv por año. En cambio, no siempre es satisfactoria la calidad de la ventilación en las minas de otros minerales, por lo cual la dosis promedio es muy superior y una fracción de la fuerza laboral excede dicha dosis.

Alrededor de un quinto de las personas consideradas expuestas ocupacionalmente a la radiación natural “incrementada” trabaja en negocios, oficinas, escuelas, y otros ambientes en zonas propensas al radón. Dentro de estas áreas, la dosis promedio es apreciable. La dosis promedio para dichos trabajadores es casi 5 mSv al año

–mayor que la de otros grupos de trabajadores ocupacionalmente expuestos. Sin embargo, debe recordarse que este grupo tiene características especiales, porque sus miembros se identifican por recibir dosis elevadas, no porque tienen la misma ocupación.

Los niveles de radón varían notablemente día a día debido al modo como se ventila y se calefaccionan los inmuebles,



Determinación de la contaminación interna, con un contador de todo el cuerpo

Ciudades		Dosis efectiva (mSv)
Vancouver	----> Honolulu	14,2
Francfort	----> Dakar	16,0
Madrid	----> Johannesburgo	17,7
Madrid	----> Santiago de Chile	27,5
Copenhague	----> Bangkok	30,2
Montreal	----> Londres	47,8
Helsinki	----> Nueva York (JFK)	49,7
Francfort	----> Fairbanks, Alaska	50,8
Londres	----> Tokio	67,0
París	----> San Francisco	84,9

Dosis efectiva durante el viaje aéreo

Fuente: Exposición de las tripulaciones aéreas a la radiación cósmica. Informe del Grupo de trabajo 5 de EURADOS al Grupo de Expertos establecido en el Artículo 31 del Tratado de EURATOM. Comisión Europea

de allí que mediciones de radón en aire durante periodos cortos pueden llevar a conclusiones falsas. El mejor remedio para niveles de radón elevados en los lugares de trabajo es el mismo que en las viviendas: reducir la presión del aire bajo el piso.

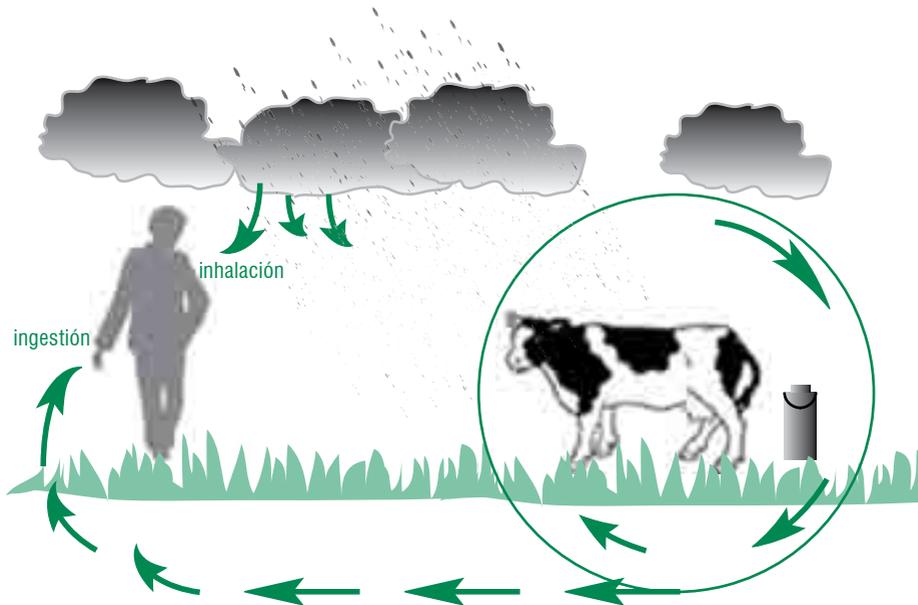
Las dosis a las tripulaciones aéreas, debidas a los rayos cósmicos, dependen de las rutas y de la cantidad de horas de vuelo. En promedio, la dosis anual está alrededor de los 3 mSv, pero podría llegar a duplicarse para vuelos largos a grandes alturas. Por la naturaleza de la radiación y de la actividad comercial, tales dosis son inevitables.

Dosis total

La dosis efectiva colectiva mundial debida a la exposición ocupacional es de alrededor de 14 000 Sv hombre por año, aunque en algunas industrias los trabajadores pueden recibir sólo pocos mSv al año. Un poco más del 80 por ciento de dicha dosis colectiva es debida a las fuentes naturales “incrementadas”; menos del 20 por ciento se debe a las fuentes artificiales. La dosis promedio mundial para los trabajadores que se ocupan de fuentes artificiales es de 0,6 mSv y para los trabajadores expuestos a las fuentes naturales es de 1,8 mSv. Combinando estas cantidades, la dosis promedio mundial para un trabajador es 1,3 mSv por año. Sin embargo, repartida entre la población entera, esto implica una dosis anual de alrededor de 0,002 mSv, una contribución relativamente menor al valor total de 2,8 mSv de todas las fuentes.

Como hemos visto en el capítulo 7, los radionucleidos naturales están diseminados en el ambiente. Este capítulo trata sobre los radionucleidos artificiales dispersados considerablemente por sucesos tales como los ensayos de armas nucleares en la atmósfera, el accidente de

Chernóbil y por la emisión deliberada de desechos radiactivos, tanto de las instalaciones nucleares como de otras. Tales radionucleidos migran desde el aire y el agua hacia el terreno y los alimentos y así, de diversos modos, imparten dosis de radiación a los seres humanos.



Vías de exposición humana a la radiación de la emisión de radionucleidos al ambiente

La lluvia arrastra los materiales radiactivos suspendidos en el aire

Irradiación externa directa de la nube

Dosis externa directa de materiales radiactivos depositados en el terreno

Dosis interna de ingerir materiales radiactivos incorporados en los alimentos.

Dosis interna del consumo de agua

Ensayos de armas nucleares

Cuando se hicieron ensayos en la atmósfera, la explosión de los dispositivos nucleares expulsó hacia las capas superiores una gran diversidad de radionucleidos, desde hidrógeno 3 (tritio) hasta

plutonio 241. Desde allí, los radionucleidos se desplazaron lentamente a las capas inferiores y posteriormente a la superficie de la Tierra. Antes de la promulgación del “Tratado de prohibición parcial de ensayos”, en 1963, se llevaron a cabo alrededor de 500 explosiones at-

Lugar, país (lugar donde se llevó a cabo el ensayo y país responsable)	Tipo(s) de ensayo(s) de armas	Dosis más elevada a los habitantes del lugar en el momento de los ensayos (mSv)	Dosis colectiva (Sv hombre)
Nevada, EE.UU.	Atmosféricos y subterráneos	60-90	470
Bikini y Enewetak, Islas Marshall (EE.UU.)	Atmosféricos	1100-6000	160
Semipalatinsk, Kazajstán (URSS)	Atmosféricos y subterráneos	2000-4000	4600-11 000
Novaya Zemlya, Federación Rusa (URSS)	Atmosféricos y subterráneos	baja	baja
Maralinga y Emeu, Australia (Reino Unido)	Atmosféricos	1	700
Isla Christmas, Australia (Reino Unido)	Atmosféricos	baja	baja
Reganne, Argelia (Francia)	Atmosféricos	desconocida	desconocida
Lop Nor, China	Atmosféricos	0,1	desconocida
Mururoa y Fangataufa, Polinesia francesa (Francia)	Atmosféricos y subterráneos	1-5	70

mosféricas; hasta 1980 se realizaron algunas más. En la actualidad, la concentración de radionucleidos en el aire, en el agua pluvial y en la dieta humana es considerablemente menor que los valores máximos alcanzados en los primeros años de la década de 1960.

Actualmente, en todo el mundo los radionucleidos más importantes para la exposición humana debida a los ensayos, son el carbono 14, el estroncio 90 y el cesio 37. Cantidades diminutas de ellos son ingeridas con la comida y bebida. También la actividad de radionucleidos emisores gamma depositado en el terreno produce un leve grado de exposición. La irradiación interna y externa contribuye igualmente al promedio mundial de la dosis efectiva, con un 0,005 mSv por año (valor que deberíamos comparar con un pico de más de 0,1 mSv en 1963). Se han identificado algunos grupos de personas que reciben de la precipitación radiactiva mundial una dosis considerablemente más elevada que el promedio. Por ejemplo, en los años sesenta, se encontró que los pastores de renos y caribús en el norte de Europa y Canadá absorbieron dosis considerablemente más elevadas que otra gente, ya que comen la

carne de esos animales que se alimentan de líquen, el cual es un recolector muy eficaz del cesio que se encuentra en el aire. La dosis colectiva mundial anual debida a la precipitación radiactiva de los ensayos de armas está ahora cerca de 30 000 Sv hombre, calculada sobre una población mundial de 6000 millones de personas.

Además de las evaluaciones realizadas durante muchos años de las dosis debidas a la dispersión de radionucleidos derivados de los mencionados ensayos atmosféricos, el OIEA ha llevado a cabo estudios sobre los efectos locales a largo plazo de los ensayos de armas nucleares, tanto atmosféricos como subterráneos. En la tabla se resumen los resultados de dichos estudios y las estimaciones realizadas de las dosis máximas anuales que la gente recibiría si viviera en la actualidad en



Castle Bravo. Explosión de una bomba de hidrógeno



Ensayo subacuático de un artefacto nuclear

dichos emplazamientos. En los atolones actualmente deshabitados de Mururoa y Fangataufa, en el Pacífico sur, donde la mayoría de los ensayos fueron subterráneos, si estuvieran habitados, la dosis que recibiría la gente no sería más de 0,25 mSv.

En la isla Bikini, también en el Pacífico, las dosis posibles podrían haber llegado hasta 15 mSv, aunque allí se están aplicando medidas reparadoras para reducir en el 90 por ciento dichos valores, antes de permitir que los isleños regresen.

Una evaluación preliminar en Semipalatinsk (Kazajstán), donde se llevaron a cabo aproximadamente cien ensayos atmosféricos, mostró que si la gente llegase a vivir en las áreas más fuertemente

contaminadas la dosis máxima anual podría llegar a valores tan altos como 140 mSv. En la actualidad nadie vive allí, pero dado el potencial de altas dosis existe la necesidad de eliminar la contaminación o asegurar que las personas no permanezcan un tiempo significativo en las áreas más contaminadas.

Hay un proyecto internacional, que comprende a varias organizaciones de la ONU, para mejorar las condiciones en el área de Semipalatinsk. La contaminación radiactiva proveniente de los ensayos es sólo uno de los problemas que necesitarán ser abordados.

El accidente de Chernóbil

Una explosión¹ y un posterior incendio en uno de los reactores de la central nuclear de Chernóbil, ocurridos el 26 de abril de 1986, originó la emisión de enormes cantidades de radionucleidos durante un lapso de diez días. El material radiactivo transportado por los vientos fue

.....
1 Explosión de vapor provocada por un aumento incontrolado de la potencia del reactor, que, según se determinó posteriormente, tuvo su causa en errores cometidos por el personal de operación de la Central Nuclear.

dispersado por toda Europa, desde el emplazamiento en Ucrania. A medida que el aire contaminado se iba propagando por toda Europa y aún más lejos, fueron las condiciones climáticas, principalmente las locales, las que determinaron dónde se iban precipitando los radionucleidos, por ejemplo, la lluvia provocó un depósito mayor en algunas áreas que en otras.

El accidente tuvo un efecto local catastrófico y ocasionó una elevada exposición a la radiación del personal de los servicios de emergencia, que llevó a la muerte a 31 personas, entre ellas 28 bomberos. Los bomberos recibieron dosis externas de entre 3 y 16 Sv, agravadas por las quemaduras que sufrieron en su piel, debidas a los radionucleidos emisores beta, que se depositaron en su ropa. Otras 209 personas fueron hospitalizadas, de las cuales, según el diagnóstico, 105 sufrían síndrome agudo de radiación. Afortunadamente, todas ellas se recuperaron y pudieron dejar el hospital, algunos en pocas semanas y otros, meses después.

Las personas que estaban en la zona circundante al sitio del accidente recibieron dosis considerables debidas a los radionucleidos liberados, principalmente yodo 131, cesio 134 y cesio 137. Casi



toda la dosis fue causada por la irradiación externa debida a los radionucleidos depositados sobre el terreno, por la inhalación del yodo 131 –que dio lugar a dosis en la tiroides– y por la irradiación interna debida a radionucleidos en los alimentos.

Después del accidente, más de 100 000 personas fueron desalojadas de sus hogares en el territorio de las actuales Bielorrusia, Ucrania y la Federación Rusa y varias zonas se transformaron en “prohibidas”, debido a los niveles de contaminación en el terreno. En el propio emplazamiento de Chernóbil fue desplegada una amplia

Unidad 4 de la Central Nuclear Chernóbil, accidentada en 1986. Vista del “sarcófago” que cubre el reactor

Mapa de Europa mostrando el depósito total de cesio 137 (pruebas de armas nucleares, Chernóbil, etc.)



operación de limpieza que involucró a más de 750 000 personas. Algunos de los individuos que realizaban el trabajo de descontaminación, que empezaron a ser conocidos como “liquidadores”, recibieron una dosis por encima del límite de los 50 mSv recomendados por la ICRP. Similares exposiciones pueden

llegar a justificarse en situaciones accidentales, aunque la ICRP recomienda que en dichas circunstancias la exposición nunca debería exceder los 500 mSv. Esto asegura que los trabajadores no experimenten los efectos deterministas de la exposición a la radiación. Los datos publicados de las brigadas de vigilancia

radiológica muestran que las dosis promedio durante el primer año posterior al accidente fueron mantenidas por debajo de 165 mSv; en los años siguientes, fueron gradualmente reducidas a menos de 50 mSv.

Se han realizado exhaustivos estudios de la población, tanto de la cercanía de Chernóbil como en otros sitios, buscando posibles consecuencias a la salud, derivadas del accidente. La única secuela importante de la irradiación, comprobada hasta ahora, en regiones de Bielorrusia y Ucrania, es un aumento de la incidencia de cáncer tiroideo en los niños y adolescentes, debido a la incorporación de yodo 131, principalmente por beber leche contaminada. El yodo 131 es un radionucleido de periodo corto (8 días), que se sabe es concentrado por la tiroides. Usando datos de la vigilancia radiológica, entre otros, ha sido posible estimar los factores de riesgo para dicho efecto en la salud de los niños. En 2000, el UNSCEAR publicó una revisión de las consecuencias del accidente de Chernóbil. Sus evaluaciones indicaron que hubo alrededor de 1800 casos de cáncer tiroideo en niños expuestos en el momento del

accidente. Aunque en la gran mayoría de los casos es una enfermedad seria, afortunadamente, en general, no es una dolencia mortal.

El UNSCEAR, hasta la fecha, no encontró evidencia científica alguna de aumento en la incidencia de cualquier otro efecto sobre la salud relacionado con la exposición a la radiación. Esto no significa que no habrá otras consecuencias—los individuos más expuestos tienen en el futuro un riesgo mayor de sufrir secuelas asociadas con la radiación— pero el UNSCEAR concluyó que no es probable que la gran mayoría de la población experimente problemas de salud graves atribuibles a la irradiación producida por el accidente.

Otro efecto serio sobre la salud, observado en las poblaciones vecinas, parece ser causa de la tensión y ansiedad provocadas por el accidente, incluyendo el miedo a la radiación. Aunque dichos efectos son de naturaleza diferente a las afecciones tiroideas arriba mencionados, no son menos reales y aparecieron extensamente en toda Europa, en las regiones afectadas por la precipitación radiactiva. Por ejemplo, en Escandinavia, donde durante las primeras



Diagrama del ciclo del combustible nuclear mostrando la fabricación del combustible, la operación del reactor, el reprocesamiento del combustible y la gestión de los desechos

semanas después del accidente la gente sólo recibió en promedio una dosis de alrededor de 0,1 mSv, muchas personas notificaron a sus médicos sensaciones de náusea, dolores de cabeza, diarrea y hasta erupciones cutáneas. Luego de un siglo de estudios científicos sobre los efectos de la radiación, se puede concluir que no es posible que tales dosis bajas puedan conducir directamente a los síntomas informados. Sin embargo, el miedo intenso a la radiación es muy real para la gente y ésta es otra de las lecciones del accidente de Chernóbil .

Emisiones radiactivas

La industria nucleoelectrónica, establecimientos militares, institutos de investigación, hospitales y otras instalaciones industriales emiten al medio ambiente radionucleidos de origen artificial. Las emisiones de cierta importancia deberían estar sujetas al control legal; deben estar autorizadas y bajo vigilancia radiológica. Los dueños u operadores de las instalaciones emisoras de radionucleidos y, además, algunos organismos de control, llevan a cabo programas de vigilancia radiológica.

La industria de generación nucleoelectrónica es la que emite la mayor parte de los materiales radiactivos. En cada fase del ciclo del combustible nuclear, una diversidad de radionucleidos es liberada en forma líquida, gaseosa o de partículas sólidas. La naturaleza del desecho depende de la operación o del proceso en particular.

El 16 por ciento de la energía eléctrica generada anualmente en el mundo² proviene de las centrales nucleares. Durante la operación normal de las

.....
 2 Datos de fines de diciembre de 2006.

instalaciones nucleares, las emisiones de radionucleidos son pequeñas y la exposición tiene que ser estimada habitualmente a partir de modelos de transferencia al medio ambiente. Para todas las operaciones del ciclo del combustible nuclear –que incluye tanto la minería como el tratamiento del mineral, la fabricación del combustible, la operación de la central nuclear y el reprocesamiento del combustible– el UNSCEAR ha estimado que las exposiciones para la vecindad y la región están en alrededor de 0,9 Sv hombre por gigawatt año (GW a). La generación nucleoelectrónica mundial actual está por arriba de los 270 GW anuales, lo que significa una dosis colectiva total de alrededor de 230 Sv hombre debida a esa fuente. Generalmente las dosis individuales son bajas, por debajo de 1 μ Sv en un año.

En el caso de accidentes donde ha habido una contaminación local considerable, las dosis pueden ser mayores que la restricción de dosis. Cuando corresponde, se toman medidas para reducir las dosis a las personas, como se hizo en Chernóbil, donde se confinaron áreas en los alrededores de la Central. Tales

Fase del ciclo	Tipo de emisión	Personas más expuestas (mSv)	Dosis colectiva (Sv hombre)
Fabricación de combustible	Aerotransportada Líquida	0,01 0,01	350
Operación del reactor	Aerotransportada Líquida	0,001 0,004	380
Reprocesamiento del combustible	Aerotransportada Líquida	0,05 0,14	4500

medidas pueden reducir sustancialmente tanto las dosis individuales como las colectivas.

Las emisiones de las instalaciones de reprocesamiento de combustible ocasionan dosis anuales de hasta 0,14 mSv a las personas más expuestas –esto es, a los que consumen mariscos del lugar, principalmente debido a los actínidos³. Las emisiones al aire de estroncio 90 y otros radionucleidos producen dosis individuales anuales inferiores a 0,05 mSv, debido a que estos se incorporan a la leche y verduras de la zona. La dosis colectiva anual por las emisiones al aire, principal-

Dosis anuales debido a emisiones del ciclo del combustible nuclear

³ Las únicas plantas de reprocesamiento comerciales que hay actualmente se encuentran en Francia y UK –emplazadas en zonas costeras– y descargan desechos en el mar.



Medición en el laboratorio de muestras ambientales

mente del carbono 14 que luego se incorpora a los alimentos, es de alrededor de 500 Sv hombre. Por la emisión de líquidos al ambiente, es alrededor de

4000 Sv hombre, debido principalmente al cesio 137 incorporado en el pescado.

Aunque en la actualidad en la mayoría de los países se controlan estrictamente las emisiones radiactivas al ambiente, en el pasado no siempre fue así. En especial, algunas instalaciones militares que funcionaban durante la Guerra Fría adoptaron métodos de gestión de los desechos que serían inaceptables para una instalación nuclear civil moderna. Como ocurrió, por ejemplo, en la instalación de Mayak, cerca de Cheliabinsk en la Federación Rusa, donde se puede ver que, como resultado de su funcionamiento, las áreas alrededor de la planta y aguas abajo en el Río Techa tienen niveles de contaminación muy altos y algunos habitantes de la región pueden haber recibido dosis elevadísimas (hasta 1 sievert o más) durante sus vidas.

Uranio empobrecido

Durante los años noventa en la Guerra del Golfo y en los conflictos originados en la disolución de la ex Yugoslavia, fue usada munición fabricada con uranio empobrecido (DU por las siglas de su nombre en inglés). El riesgo de daño al personal militar en un campo de batalla debería ser puesto en el contexto de otros riesgos evidentes, pero el uso de munición de uranio empobrecido ha creado preocupación respecto a los efectos que tienen sobre la salud, tanto del personal militar como de la población, posteriormente al conflicto.

Como ya se ha descrito, el uranio existe naturalmente en el medio ambiente. Está disperso ampliamente en la corteza terrestre, en el agua dulce y del mar. Como consecuencia, todos estamos expuestos a los isótopos del uranio y sus productos de decaimiento, aunque, dependiendo de las circunstancias, existen enormes variaciones en las dosis recibidas. El uranio empobrecido es un subproducto del ciclo de combustible, donde el uranio natural es enriquecido para proveer el combustible conveniente para la mayoría de las centrales nucleo-

eléctricas. Se llama uranio empobrecido porque se ha extraído del uranio natural algo del isótopo uranio 235. Una fracción muy grande de los isótopos productos del decaimiento del uranio es eliminada durante ese proceso.

El uranio empobrecido se encuentra en forma metálica en la munición y preocupa que en el medio ambiente haya niveles elevados, debido a su uso. También existe intranquilidad por las personas que tienen que manipular el uranio empobrecido metálico. Evaluaciones de la dosis a personal militar que ingresó en un tanque poco después de que éste fuera impactado por un proyectil de DU, indican dosis posibles de decenas de mSv, debidas a la inhalación de vapores y polvo. En contraste, las dosis debidas a la resuspensión de polvos en el mismo ambiente, para personas expuestas tiempo después del impacto, es probable que sean mil veces menor, de unas decenas de μ Sv. Las dosis en contacto, cuando se manipula el uranio empobrecido metálico con las manos desnudas, son alrededor de 2,5 mSv/h, principalmente de radiación beta, la que, como no es penetrante, sólo afecta a la piel. Aun así, debería desaconsejarse la recolección de

munición de uranio empobrecido con las manos desnudas y si fuera posible debería ser evitada completamente.

Por consiguiente, las dosis debidas al uranio empobrecido son reales y, en algunas circunstancias, podrían ser significativas para el personal militar. Es probable que en la fase posconflicto las dosis a las personas sean considerablemente más bajas y relativamente fáciles de evitar.

Gestión de áreas contaminadas

Como hemos visto (otros ejemplos se desarrollarán en capítulos posteriores), regiones de los rincones más dispares del mundo han sido contaminadas con radionucleidos, como resultado de diversas actividades humanas. En los casos donde el nivel de contaminación es alto, podrían necesitarse medidas para certificar la seguridad de que el área puede ser habitada o utilizada para otros propósitos. En zonas pequeñas, podría ser posible hacerlo removiendo tanto la tierra contaminada como otros materiales, pero en áreas extensas la cantidad de material sería demasiado grande.

Otros modos de proteger a las personas incluyen, por ejemplo, prohibir el acceso a determinadas áreas e impedir la construcción de viviendas en zonas afectadas por desechos de minería que podrían producir niveles del radón altos. También pueden utilizarse tratamientos químicos para reducir la cantidad de material radiactivo que los alimentos pueden absorber del suelo. Ejemplos de ellos son la administración de “Azul de Prusia” (un compuesto químico que incrementa la tasa de excreción del cesio por las vacas, para que no se incorpore a la leche y a la carne) al ganado bovino que pastorea en suelos contaminados –como se hizo en la región de Chernóbil– y el tratamiento del terreno con potasio, para detener la absorción del cesio por los árboles –como se aplicó en la isla Bikini.

Dosis total

Excepto algunas instalaciones militares y las recién mencionadas, ninguna otra instalación que emite radionucleidos artificiales al medio ambiente causa a las personas más expuestas una dosis mayor de 0,02 mSv al año ni contribuye significativamente a la dosis colecti-

va. Por consiguiente, salvando algunas instalaciones militares, en promedio la dosis efectiva máxima de la emisión de radionucleidos artificiales está cerca de 0,14 mSv al año y la dosis efectiva colectiva en alrededor de 5000 Sv hombre en un año o 0,001 mSv cuando se la promedia por toda la población mundial.

Los reactores nucleares como fuente de calor para generar electricidad se utilizan desde la década del 50, en el siglo pasado. A fines de diciembre de 2006, según la información suministrada por el Organismo Internacional de Energía Atómica, había en operación 442¹ centrales nucleares, en 30 países, con una capacidad instalada total de casi 370 GW (e).

Centrales nucleares

Para funcionar, los reactores nucleares dependen de la reacción entre los neutrones y los núcleos de los átomos del combustible. El uranio, el combustible para casi todos los reactores, está compuesto esencialmente por dos isótopos, uranio 235 y uranio 238, que se encuentran en el elemento natural, en una pro-



Central Nuclear Atucha I, vista desde el río Paraná

porción de 0,7% y 99,3% respectivamente. Para los primeros diseños de reactores, el único combustible que había disponible era el uranio natural², pero la mayoría de los reactores que están actualmente en

¹ El dato no incluye las 6 centrales nucleares en operación en Taiwán.

² De los 90 elementos presentes en la naturaleza, el uranio es el más pesado.

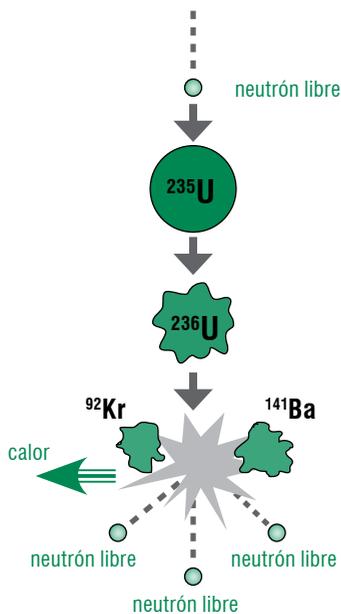


Diagrama esquemático de la fisión del uranio 235

Para inducir más fisiones en el uranio 235 [y así mantener la reacción en cadena] los neutrones tienen que ser frenados dentro del reactor. En cambio, cuando el núcleo de uranio 238 absorbe un neutrón rápido, se transforma en uranio 239, que decae rápidamente produciendo finalmente plutonio 239. Éste también puede fisiónar o bien capturar neutrones para crear isótopos de otros actínidos más pesados, como el americio o el curio. En la actualidad, se

operación usa *uranio enriquecido*, que tiene aproximadamente 2,5 por ciento de uranio 235.

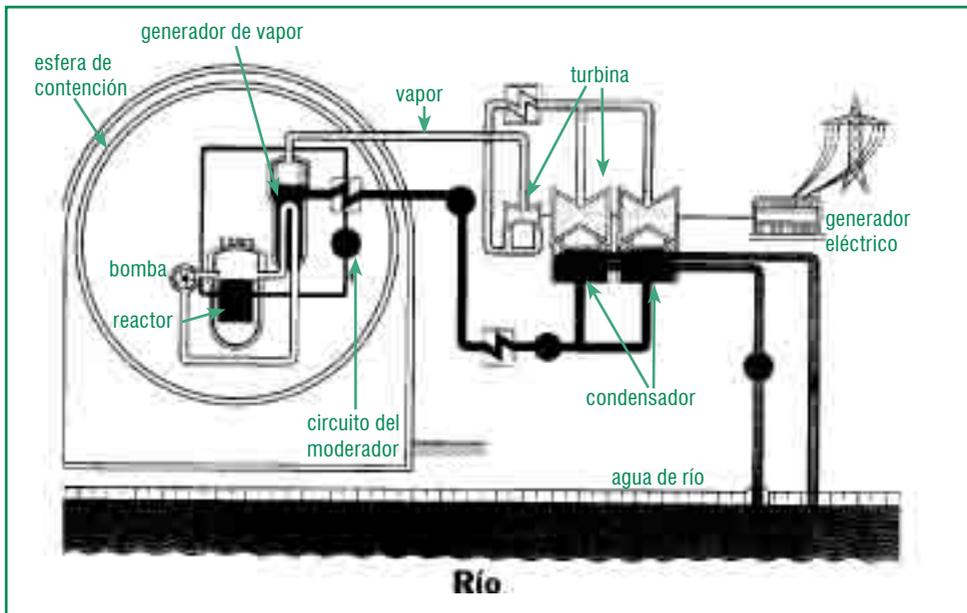
Cuando el uranio 235 absorbe un neutrón y se fisiona, se libera energía, porque el núcleo del átomo de uranio 235 se parte en dos fragmentos, llamados *productos de fisión*, que salen despedidos a gran velocidad acompañados por neutrones con alta energía y de

está tendiendo a utilizar en algunos reactores un combustible de óxidos mixtos (conocido como *MOX*), el cual incluye uranio enriquecido mezclado con el plutonio recuperado del reprocesamiento del combustible gastado. Ésta es una manera de reciclar el combustible y controlar las existencias de plutonio.

El combustible de un reactor nuclear es ensamblado en una estructura denominada *núcleo*, que también contiene el *moderador*, que puede ser agua [común o pesada] o grafito, para frenar o *termalizar* a los neutrones³. El refrigerante, por lo general agua [que también puede ser común o pesada] o un gas [dióxido de carbono o helio], transporta el calor generado dentro del combustible, hasta los intercambiadores de calor, donde se produce el vapor. Finalmente, el vapor propulsa el turbogenerador, haciéndolo girar para producir electricidad.⁴

.....
³ Moderar o termalizar los neutrones significa reducir su velocidad hasta alcanzar la velocidad que tienen normalmente las moléculas a la temperatura de operación.

⁴ La generación de energía eléctrica se lleva a cabo mediante diversas tecnologías, pero en todos los casos se trata de un proceso de conversión de energía cinética a energía eléctrica. Esa conversión se lleva a cabo mediante una turbina, que es un componente común



Esquema simplificado del funcionamiento de la Central Nuclear Atucha I

El combustible [en forma de pastillas cerámicas de óxido de uranio] se encapsula en recipientes metálicos [vainas de paredes delgadas de una aleación de circonio] y el núcleo del reactor es confinado en una vasija o recipiente de presión de acero, con paredes de 20 cm de espe-

sor (en algunos diseños, los elementos combustibles están contenidos en cientos de tubos de presión independientes). Un blindaje de hormigón macizo cumple la función de absorber la intensa radiación gamma que emite el núcleo durante la operación y aún después de extinguida la reacción de fisión. En la mayoría de las centrales nucleares también existe, adicionalmente, un edificio de contención que confina al reactor y al denominado *sistema primario de transporte de calor*.

El combustible sin uso sólo es levemente radiactivo y se puede manipular sin

en todos los tipos de centrales eléctricas. La turbina puede ser movida por agua, en las centrales hidroeléctricas, por aire, en el caso de los generados eólicos, o vapor de agua, en las usinas térmicas. Estas últimas necesitan calor para producir el vapor de agua y lo generan quemando carbón, fuel oil o gas natural, o bien usan el calor generado en la fisión de los átomos de uranio, en las centrales nucleares.



Elementos combustible para las centrales nucleares CANDU, fabricados en Argentina. Cada elemento está compuesto por 37 varillas de Zircaloy, que contienen óxido de uranio natural, en forma de pastilla

blindajes. Sin embargo, una vez cargado en el reactor, la radiactividad aumenta enormemente, debido a la gran cantidad de radionucleidos producidos por la fisión del uranio; esto significa que un accidente en el reactor podría dispersar en el medio ambiente grandes cantidades de material radiactivo. Una vez que se retira del reactor, el combustible gastado permanece caliente⁵, por lo tanto debe almacenarse en piletas con agua para evitar que se funda y para reducir la exposición a la radiación.

.....
⁵ El combustible usado continúa generando calor debido a la desintegración radiactiva de los productos de fisión remanentes en él.

Aunque la seguridad es una cuestión crucial en todas las centrales nucleares, desde el accidente de Chernóbil y la disolución de la URSS existe un enfoque especial sobre la seguridad de los reactores WWER y RBMK. En tal sentido, se logró un enorme progreso gracias a los esfuerzos de los especialistas de Europa Oriental y de la ex Unión Soviética, apoyados por muchos proyectos de cooperación internacional.

Revisión final de la fabricación de elementos combustible para la Central Nuclear Atucha I, en la que originalmente se utilizaba uranio natural y en la actualidad se usa uranio levemente enriquecido



Los principales tipos de centrales nucleares tienen:

Reactores de agua presurizada (PWRs), reactores de agua en ebullición (BWRs) y reactores WWER (un diseño de central nuclear soviético similar a un PWR) todos los cuales utilizan agua común como moderador y refrigerante.

Reactores de agua pesada, tales como los de las centrales CANDU de diseño canadiense, que usan agua pesada (agua donde los átomos de hidrógeno han sido reemplazados con deuterio, un isótopo del hidrógeno) como moderador y refrigerante.

Reactores enfriados con gas que usan dióxido de carbono gaseoso como refrigerante y normalmente grafito como moderador.

Reactores enfriados por agua en ebullición, moderados con grafito, del diseño RBMK (desarrollado únicamente en la ex URSS).



Central Nuclear Embalse, diseño CANDU

Producción de
nucleoelectricidad
en el mundo
– 2005-2007
(actualizado a
enero de 2007)

Fuente de los datos:
World Nuclear
Association.

	Generación nucleoeléctrica 2005		Reactores en operación enero 2007		Reactores en construcción enero 2007		Reactores planificados enero 2007		Reactores propuestos enero 2007	
	Millardo* kWh	% e	Nº	MWe	Nº	MWe	Nº	MWe	Nº	MWe
Alemania	154,6	31	17	20.303	0	0	0	0	0	0
Argentina	6,4	6,9	2	935	1	692	0	0	1	700
Armenia	2,5	43	1	376	0	0	0	0	1	1.000
Bélgica	45,3	56	7	5.728	0	0	0	0	0	0
Brasil	9,9	2,5	2	1.901	0	0	1	1.245	4	4.000
Bulgaria	17,3	44	2	1.906	0	0	2	1.900	0	0
Canadá	86,8	15	18	12.595	2	1.540	2	2.000	0	0
China	50,3	2,0	10	7.587	5	4.170	13	12.920	50	35.880
EE.UU.	780,5	19	103	98.254	1	1.200	2	2.716	21	24.000
Egipto	0	0	0	0	0	0	0	0	1	600
Eslovaquia	16,3	56	5	2.064	0	0	2	840	0	0
Eslovenia	5,6	42	1	696	0	0	0	0	1	1.000
España	54,7	20	8	7.442	0	0	0	0	0	0
Finlandia	22,3	33	4	2.696	1	1.600	0	0	0	0
Francia	430,9	79	59	63.473	0	0	1	1.630	1	1.600
Hungría	13,0	37	4	1.773	0	0	0	0	0	0
India	15,7	2,8	16	3.577	7	3.178	4	2.800	15	11.100
Indonesia	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4.000
Irán	0	0	0	0	1	915	2	1.900	3	2.850
Israel	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.200
Japón	280,7	29	55	47.700	2	2.285	11	1.4945	1	1.100
Kazajstán	0	0	0	0	0	0	0	0	1	300
Lituania	10,3	70	1	1.185	0	0	0	0	1	1.000
México	10,8	5,0	2	1.310	0	0	0	0	2	2.000
Países Bajos	3,8	3,9	1	485	0	0	0	0	0	0
Pakistán	1,9	2,8	2	400	1	300	2	600	2	2.000
Reino Unido	75,2	20	19	10.982	0	0	0	0	0	0
República Checa	23,3	31	6	3.472	0	0	0	0	2	1.900
República de Corea	139,3	45	20	17.533	1	950	7	8.250	0	0
Rumania	5,1	8,6	1	655	1	655	0	0	3	1.995
Rusia	137,3	16	31	21.743	3	2.650	8	9.600	18	21.600
Sudáfrica	12,2	5,5	2	1.842	0	0	1	165	24	4.000
Suecia	69,5	45	10	8.975	0	0	0	0	0	0
Suiza	22,1	32	5	3.220	0	0	0	0	0	0
Turquía	0	0	0	0	0	0	3	4.500	0	0
Ucrania	83,3	49	15	13.168	0	0	2	1.900	0	0
Vietnam	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2.000
Total	2.626	16	435	368.860	28	22.735	64	68.861	158	124.225

* Un millardo = mil
millones

En el capítulo 10, se describieron las emisiones de desechos radiactivos provenientes de las instalaciones del ciclo del combustible nuclear, pero también los hay de origen diferente. No sólo se producen desechos en las distintas fases del ciclo –que incluye la minería, concentración y purificación del uranio y el desmantelamiento de instalaciones nucleares en desuso– sino también en tareas que implican la utilización de sustancias radiactivas, en el campo médico, industrial y de la investigación.

Los desechos exentos

tienen una concentración muy baja de actividad y no precisan ser diferenciados de los desechos comunes.

Los desechos de nivel bajo/intermedio

son artículos como papeles, ropa y equipamiento de laboratorio utilizados en áreas donde se manipulan sustancias radiactivas, también son desechos de este tipo los suelos contaminados y materiales de construcción, junto con elementos que han sido usados para tratar las emisiones líquidas y gaseosas antes de liberarlas al ambiente y de lodos acumulados en los depósitos enfriados donde se almacena el combustible gastado.

Los desechos de periodo corto

abarcan principalmente materiales contaminados con radionucleidos de periodos de semi-desintegración relativamente cortos (menos de 30 años) y que sólo tienen concentraciones muy bajas de radionucleidos de periodo largo.



Pilas de fosfoyeso, desecho levemente radiactivo, provenientes de la producción de fosfatos para fertilizantes, Florida, EE.UU. El fosfoyeso solía utilizarse como material de construcción de viviendas

Los desechos NORM (material radiactivo de origen natural, NORM de las siglas en inglés)

son desechos con una concentración bastante baja de radionucleidos naturales (aunque a menudo superiores a las concentraciones que se encuentran en la naturaleza) y con frecuencia producidos en cantidades enormes. Este tipo de desechos se genera tanto en la minería como en el procesamiento del uranio y de otros minerales, por ejemplo, los fosfatos utilizados como fertilizantes.

Los desechos alfa (o desechos transuránicos)

engloban radionucleidos emisores alfa como isótopos del plutonio –en algunos países se los trata como una categoría separada.

Los desechos de alta

sólo se refieren al combustible irradiado en un reactor (en los países donde se lo considera como un desecho) o a los líquidos fuertemente radiactivos producidos cuando se reprocesa el combustible “gastado”. El volumen de este tipo de desechos es muy pequeño, pero su concentración de materiales radiactivos es tan elevada que genera una considerable cantidad de calor.

El objetivo de la *gestión de los desechos* es por una parte procesarlos adecuadamente para su almacenamiento/disposición final y por otra, efectuar dicho almacenamiento/disposición final para que no exista algún riesgo inaceptable para las generaciones presentes o futuras. Aquí *disposición final* simplemente significa que no existe intención alguna de recuperación, pero no implica que sea imposible hacerlo.

En muchos países, los desechos de periodo corto son eliminados en repositorios cerca de la superficie, comúnmente trincheras de paredes impermeabilizadas de varios metros de profundidad o bóvedas de hormigón armado construidas sobre o a ras del suelo. Los desechos eliminados se cubren con unos metros de tierra y, con frecuencia, con una capa de arcilla para aislarlos del agua. Un método de disposición similar se utiliza en deter-

Clase de desecho	Fuentes típicas	Características	Disposición final
Desechos exentos	Cantidades muy limitadas de radionucleidos	Se tratan como los desechos normales	Instalaciones de eliminación de desechos municipales
Desechos de la minería	Colas de extracción	Grandes volúmenes	Represas de colas de extracción. Almacenamiento subterráneo de las colas de extracción concentradas
Desechos NORM	Desechos de incrustaciones en cañerías o equipamiento del procesamiento de minerales	Niveles “aumentados” de radionucleidos naturales	Como colas de extracción los de bajo nivel. Almacenamiento en superficie para niveles superiores
Desechos de nivel bajo/intermedio	Papel, vestimentas, equipamiento de laboratorios, suelos y materiales de construcción contaminados Materiales de intercambio iónico del tratamiento de lodos de estanques de enfriamiento	Limitada generación de calor	Instalaciones de eliminación a poca profundidad para periodos cortos o en cavernas cavadas a profundidad intermedia (de alrededor de 60 a 100 m de profundidad) Desechos de periodos largos: pendientes del desarrollo de instalaciones para la eliminación a mayor profundidad
Desechos alfa	Igual a desechos de nivel bajo/intermedio, pero contaminados con emisores alfa (sobre todo plutonio)	Considerados una categoría especial en algunos países	Eliminación geológica Se está estudiando el almacenamiento a profundidad intermedia (decenas de metros)
Desechos de alta	Elementos combustibles gastados (cuando son considerados desechos) Líquidos muy activos del procesamiento	Necesita gruesos blindajes y refrigeración	Eliminación geológica (unos pocos cientos de metros de profundidad en las formaciones geológicas estables)



Almacenamiento
temporario, bajo agua,
de los elementos combustibles
gastados, de las centrales nucleares
suecas

minados países para grandes cantidades de desechos NORM, como las denominadas *colas de extracción* de la minería y concentración del uranio. Por ejemplo, Suecia tiene en funcionamiento en Forsmark, debajo del lecho del Mar Báltico, un repositorio para sus desechos de nivel bajo/intermedio (aunque básicamente de periodo corto).

Muchos desechos de nivel bajo/intermedio que no se encuentran en la forma más adecuada para su disposición, tienen que ser mezclados con un material inerte como hormigón, bitumen o resina. En el pasado, algunos países eliminaban esos desechos en el mar, pero dado que dicho

procedimiento fue prohibido por la Convención de Londres; ahora habitualmente quedan almacenados en espera de una decisión sobre el método de disposición final. Entre las opciones más probables está la de los repositorios a gran profundidad en un subsuelo de condiciones geológicas adecuadas. Aunque muchos países tienen planes para repositorios geológicos de ese tipo, en la actualidad sólo hay operando uno, en el estado de Nuevo México, EE.UU.: la “Planta piloto para el aislamiento de los desechos” (WIPP, por sus siglas en inglés), destinada a los desechos que contienen actínidos.

Cuando la intención es la disposición directa del combustible gastado, en lugar

Vista aérea del depósito provisorio de
elementos combustibles gastados,
llamado CLAB, Suecia



de su reprocesamiento, se lo almacena ya sea dentro del emplazamiento de la central nuclear o en instalaciones especialmente dedicadas. Eso es en parte para permitir que el combustible se enfríe, aunque es obvio que permanecerá allí hasta que se disponga de una instalación para la disposición final. Los desechos líquidos de actividad alta del reprocesamiento se almacenan corrientemente en tanques especiales refrigerados, pero se están construyendo instalaciones para solidificarlos incorporándolos a un material vítreo. Los bloques de vidrio se almacenarán durante décadas para permitir el enfriamiento y luego se procederá a la disposición final, probablemente bien profundo en el subsuelo.

Clausura

Clausura es el proceso que tiene lugar al final de la vida útil de una instalación nuclear (o de un sector de ella) o de cualquier otro lugar donde se utilizaron materiales radiactivos, para lograr una solución segura en el largo plazo. Puede incluir descontaminación del equipamiento o de edificios, desmantelamiento de instalaciones o estructuras, y remo-

ción o inmovilización de los materiales radiactivos remanentes. En muchos casos, el objetivo final es limpiar el terreno de todo desecho radiactivo importante, aunque no siempre es posible o necesario hacerlo.

Hasta ahora, son relativamente pocas las instalaciones a escala comercial que han sido clausuradas completamente. No obstante, se ha ganado mucha experiencia en la clausura de una variedad de instalaciones, entre las que se incluyen unas cuantas centrales nucleares, diversos reactores de investigación y prototipo y numerosos laboratorios, talleres, etc. El hecho que muchos reactores nucleares en el mundo están acercándose al final de su vida útil ha orientado la atención hacia los problemas asociados con la clausura.

La clausura exige un control estricto de las operaciones para optimizar la protección de los trabajadores y del público. Para ocuparse de las partes más radiactivas de una instalación, en especial del núcleo del reactor, se han desarrollado técnicas de manipulación remota. El desmantelamiento de grandes instalaciones también genera grandes volúmenes de “desechos”. Algunos serán desechos radiactivos de nivel bajo/intermedio que necesitarán



Reemplazo de generadores de vapor de una central nuclear. Los componentes retirados son tratados como desechos radiactivos

ser tratados adecuadamente. No obstante, también habrá grandes cantidades de materiales estructurales –como acero y hormigón– no perceptiblemente radiactivos. Serán necesarios entonces procedimientos especiales para “autorizar” dichos materiales como exentos, es decir, que no deberán ser tratados como desechos radiactivos.

Crterios para la disposicin final

Se han llevado a cabo extensos debates sobre los criterios para juzgar la aceptabilidad de los mtodos de disposicin de los desechos, tanto desde el punto de vista de la proteccion radiolgica como de una perspectiva social ms amplia. La opinin consensuada es considerar que las generaciones futuras deberan contar con el mismo grado de proteccion que en la actualidad tiene la poblacin en general. Sin embargo, es difcil de traducir este requisito en normas prcticas de proteccion radiolgica. Por ejemplo,

el material radiactivo podra aflorar de un repositorio profundo slo despus de muchos miles de aos y no tenemos idea alguna sobre los hbitos o estilos de vida que tendrn nuestros descendientes en un futuro tan lejano.

Un segundo requisito es aplicar el principio que *todas las exposiciones deberan ser tan bajas como sea razonablemente alcanzable, teniendo en cuenta los factores econmicos y sociales*. Esto significa que las distintas opciones para gestionar una clase especial de desecho –incluyendo tratamiento, inmovilizacin, embalaje y disposicin– deberan compararse sobre la base de los riesgos asociados, costos y otros factores menos cuantificables, aunque no menos importantes. Alguna de estas comparaciones estarn comprendidas dentro de la proteccion radiolgica, pero eventuales decisiones podran ser determinadas por otras influencias.

Para la sociedad, la cuestin difcil sobre la disposicin de desechos es qu peso debera darse en la actualidad a la probabilidad matemtica de los efectos nocivos en el futuro distante. Este problema no es exclusivo para la disposicin de desechos ni para la proteccion radiolgica, aunque

es particularmente significativo aquí. La respuesta más ética puede ser: suponer que las condiciones actuales persisten y que el perjuicio a las generaciones futuras tiene la misma importancia que el perjuicio a la generación actual. Dicha argumentación debe flexibilizarse, por supuesto, por la incertidumbre en la predicción de efectos posibles que tendrán lugar dentro de siglos y milenios.

Otras prácticas de gestión de desechos

En el pasado, por diversas razones, algunas prácticas de gestión de desechos no fueron realizadas como debería haber sido y ello ha dado como resultado algunos casos de contaminación del ambiente a largo plazo.

De nuevo, un ejemplo proviene de operaciones militares. Submarinos nucleares de la flota del norte de la ex Unión Soviética han estado fuera de servicio durante años. En la actualidad, muchas de dichas naves están en puerto, esperando una gestión adecuada, pero tiempo atrás, en algunos casos, la entonces Unión Soviética arrojó al mar –especialmente al mar de Kara y al de Barents, en el Océa-



Vista aérea de las instalaciones del repositorio de media actividad, en Suecia. Los recintos de almacenamiento fueron construidos perforando el granito bajo el mar Báltico

no Ártico– desechos de reactores nucleares de submarinos e incluso combustible nuclear. Entre 1993 y 1997, el “Proyecto internacional de evaluación de los mares del Ártico”, coordinado por el OIEA, revisó la situación y concluyó que, debido a la liberación lenta de los desechos sólidos de sustancias radiactivas y la dilución proporcionada por el mar, las dosis a los miembros del público serían muy bajas (menos de 0,001 mSv por año). El personal militar acantonado en el área podría recibir dosis considerablemente mayores, aunque equivalentes a las dosis recibidas de las fuentes naturales (hasta unos pocos mSv por año).

Diversas áreas alrededor del mundo están arruinadas por la acumulación de enormes cantidades de desechos de la extracción y el procesamiento de minerales radiactivos. Esto es lo común en la extracción del uranio, pero en algunas zonas la presencia de radionucleidos naturales es tan abundante que desperdicios de otros tipos de minería (algunos tan antiguos que datan de la Edad Media) significan un riesgo radiológico considerable. Diversas industrias, como las de producción de fertilizantes y las de extracción de petróleo y gas natural, también originan desechos de naturaleza equivalente. Los radionucleidos implicados son todos de origen natural y sólo recientemente han sido reconocidos como problema radiológico. Los niveles de radionucleidos en los minerales eran normalmente superiores a los valores promedio y muchas veces la cantidad de material radiactivo aumentó como consecuencia del tratamiento físico o químico aplicado, de manera que los niveles de actividad son significativamente mayores a los niveles corrientes en la naturaleza (aunque, comparando con los desechos nucleares, su concentración de actividad no sea tan elevada). No sólo los radionucleidos tienen periodos suma-

mente largos, sino que, con frecuencia, las cantidades de desechos son colosales. Estos desechos pueden disponerse de manera segura, por ejemplo, construyendo diques impermeabilizados con arcilla, método ya adoptado por países como Canadá, EE.UU., Alemania y Australia. Sin embargo, es posible que algunos países en vías de desarrollo, por ejemplo de África central y ciertas repúblicas del Asia central que anteriormente constituían la Unión Soviética, no tengan los recursos para tratar de esa manera enormes cantidades de material. El OIEA, entre otros, está ayudando a dichos países a encontrar soluciones seguras.

A pesar de todas las medidas de seguridad que se adoptan pueden ocurrir accidentes cuando se utiliza radiación y sustancias radiactivas.

En una instalación nuclear, puede originarse una emergencia y conducir a la emisión accidental de material radiactivo que se disperse más allá del límite del emplazamiento y a la necesidad de aplicar medidas perentorias para proteger al público. En ciertas circunstancias, la emisión puede ser breve, en otras, prolongada. Han acaecido accidentes de envergadura en Windscale (en el Reino Unido) y en Kyshtym (en la entonces URSS), en 1957, en Three Mile Island (EE.UU), en 1979 y en Chernóbil (en la actual Ucrania), en 1986. Aunque tales accidentes pueden ser raros, es prudente estar preparado.

Más frecuentes son las emergencias que implican fuentes de radiación de uso médico, industrial, para investigación o aplicaciones militares. Durante los años



recientes, el OIEA ha sido notificado tres o cuatro veces por año, en promedio, de urgencias por casos de personas expuestas a grandes dosis debidas a fuentes de radiación mal manejadas, extraviadas, sustraídas o abandonadas. Desde el accidente de 1987, en Goiania, Brasil, donde una fuente de irradiación médica hallada en un edificio abandonado causó la muerte

Remoción de material contaminado con cesio 137, en un depósito de chatarra, donde se desmanteló el cabezal de un equipo de radioterapia y se perforó el recipiente de la fuente radiactiva. Accidente ocurrido en Goiania, Brasil, en 1987

a cuatro personas por exposición a la radiación, en el mundo se han producido más de una docena de accidentes fatales implicando fuentes radiactivas.

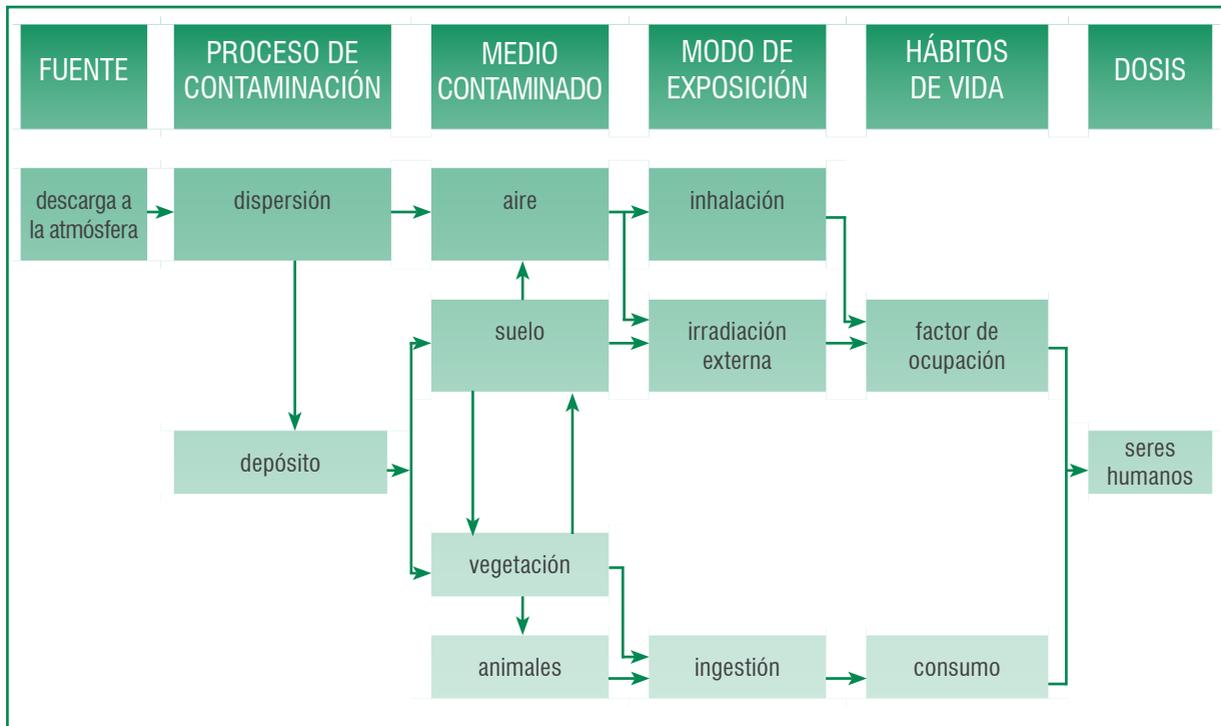
Un accidente en 1999, en Tokaimura (Japón), fue excepcional, ya que implicó una reacción nuclear autosostenida, iniciada inadvertidamente en el procesamiento químico de uranio enriquecido. La única emisión de material radiactivo fue una pequeñísima cantidad de radionucleidos de periodo muy corto. En ese accidente, el riesgo radiológico fue la irradiación directa –sobre todo de neutrones– procedente del recipiente en el cual la reacción estaba teniendo lugar. Ya que no estaba previsto que semejante reacción pudiera suceder, el edificio no tenía el blindaje de protección que habitualmente tiene una central nuclear y por lo tanto la radiación ocasionó dosis importantes fuera del edificio.

Dado que algunas clases de emergencia pueden tener consecuencias fuera del país donde el accidente tiene lugar, existen acuerdos internacionales de acatamiento obligatorio relacionados con emergencias. Todos los países con centrales nucleares en operación (y otros 50 adicionales) son signatarios de la “*Convención*

sobre la pronta notificación de accidentes nucleares”, la cual exige que se informe a los países vecinos si ha habido un accidente que pudiera afectarlos. También debe notificarse al OIEA, que ayudará entonces a difundir la información sobre la situación generada. Asimismo, más de 80 países son parte de la “*Convención sobre asistencia, en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica*”, en la cual se comprometen a proporcionar ayuda en tales emergencias si cualquier país lo solicita. El OIEA, también en este caso, tiene un papel importante definido por la Convención, que consiste en difundir la información y coordinar la ayuda.

Emergencias nucleares

Para asegurar una protección adecuada contra los accidentes, las autoridades nacionales de licenciamiento nuclear exigen un detallado análisis de seguridad de las instalaciones de importancia, como las centrales nucleares. Dichos estudios identifican las posibles secuencias accidentales que podrían acarrear una emisión de radionucleidos. Los planes de emergencia están basados en la consideración de la secuencia que causa la libera-



ción más grande que razonablemente se puede prever, pero permiten ser reforzados y extendidos en el caso, improbable, de un accidente más grave.

Por ejemplo, si llegara a producirse un accidente en una central nuclear, podrían ser expelidos a la atmósfera diferentes radionucleidos gaseosos, volátiles o en forma de partículas. Posteriormente, el penacho radiactivo sería arrastrado le-

jos por los vientos, dispersado y diluido. Algunos radionucleidos precipitarían a tierra, especialmente si lloviera. A su vez, la concentración de radionucleidos en el aire disminuiría rápidamente desde la localización de la instalación en la dirección del viento, al igual que el riesgo relacionado. Aun así, podrían depositarse en el suelo cantidades sustanciales de radionucleidos a distancias considerables.

Esquema del penacho de dispersión y el depósito de los materiales radiactivos liberados

Tableta de yodo estable, preparada para distribuir a la población afectada en caso de un accidente en una central nuclear

Contra medidas

Para reducir la dosis de radiación a las personas que viven cerca de la zona de un accidente, puede llegar a ser necesario tomar acciones, llamadas *contra medidas*. Éstas podrían abordarse en conjunto o individualmente. Algunas de dichas acciones –las urgentes– para que sean eficaces, exigen ser iniciadas antes de que haya una emisión

de material radiactivo. Esto significa que las decisiones deben tomarse en base a lo que está ocurriendo en la planta en cuestión y en las predicciones del análisis de seguridad acerca de lo que podría ocurrir, en lugar de aguardar hasta que una emisión sea detectada. Tal manera de proceder podría implicar que como precaución se adopten contra medidas que sean innecesarias, pero es preferible esto, a actuar demasiado tarde.

Puede aconsejarse a la gente que permanezca dentro de las viviendas o incluso que abandone las mismas, hasta que

amaine el penacho o se haya conseguido poner fin a la emisión. Asimismo, Se le podría suministrar a todas las personas pastillas de un compuesto de yodo para impedir la incorporación del yodo radiactivo por la glándula tiroidea. También, podría surgir la necesidad de restringir temporalmente la comercialización de leche, verduras y otros alimentos producidos localmente. Después de que el penacho haya pasado, podrían tomarse otras contra medidas simples, como regar caminos y senderos o cortar y quitar el césped de los jardines para eliminar la contaminación superficial.

Equipo transportable para medición de todo el cuerpo, para determinar la incorporación de radionucleidos



Contramedida	Órgano	Dosis evitadas
Resguardo	Cuerpo entero (efectiva)	10 mSv en 2 días
Evacuación	Cuerpo entero (efectiva)	50 mSv en 1 semana
Administración de yodo	Tiroides	100 mGy

Niveles de intervención internacionales para las contramedidas

Radionucleidos importantes	Leche, alimentos para bebés y agua potable (Bq/kg)	Otros alimentos (Bq/kg)
Estroncio 90		100
Yodo 131	100	
Plutonio 239	1	10
Cesio 137	1000	1000

Niveles de acción para algunos alimentos y para el agua (Bq/kg)

Fuente: Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, Adenda V, Cuadro V-I

Luego de transcurrida la emergencia, podría ser necesario, durante un período de recuperación prolongado, introducir otras contramedidas, para proteger a la población de la actividad remanente.

En los países con instalaciones nucleares y en muchos otros que podrían ser perjudicados por un accidente ocurrido en un país vecino, existen planes detallados y convenientemente ensayados para hacer frente a las emergencias nucleares. Cada instalación nuclear debe tener un plan de emergencia y darlo a conocer a los habitantes de la zona. En el plan participa el personal de operación [de

la instalación nuclear], las autoridades municipales y los servicios de emergencia. Ministerios y organismos nacionales también pueden estar involucrados; cada uno desplegará su especialización y recursos radiológicos.

Un plan de emergencia típico debería prever la siguiente sucesión de hechos: en la fase temprana de un accidente, el operador [de la instalación] aconsejará a la policía local sobre medidas de protección del público. Rápidamente, se establecerá, fuera del emplazamiento, un centro de coordinación donde individuos, con responsabilidades definidas, y los aseso-

Contramedidas en una emergencia

Cobijarse dentro de las viviendas

Evacuación temporal de las viviendas

Administración de pastillas con yodo estable

Prohibición del consumo de alimentos contaminados

res técnicos decidirán las acciones para proteger al público. Éstas incluirán la vigilancia radiológica ambiental, así como también las contramedidas apropiadas. Asimismo se harán los preparativos para informar adecuadamente a los medios de comunicación.

La necesidad de planificar para la emergencia no se circunscribe a las instalaciones nucleares. Dondequiera que se utilicen fuentes de radiación debería haber planes de contingencia apropiados para hacer frente a las emergencias que pudieran suceder. No es necesario que éstos sean de la amplitud requerida para una central nuclear, pero deben tener en cuenta cualquier accidente concebible.

Crterios para la intervención

Adoptar contramedidas a continuación de un accidente es otro ejemplo del procedimiento que la ICRP denomina *intervención*. En el capítulo 5 se vio que una intervención debe justificarse y optimizarse. Sólo es necesario agregar que las contramedidas deben adoptarse para evitar dosis suficientemente elevadas como para ocasionar lesiones obvias en cual-

quier persona expuesta –pero sobre todo en los niños.

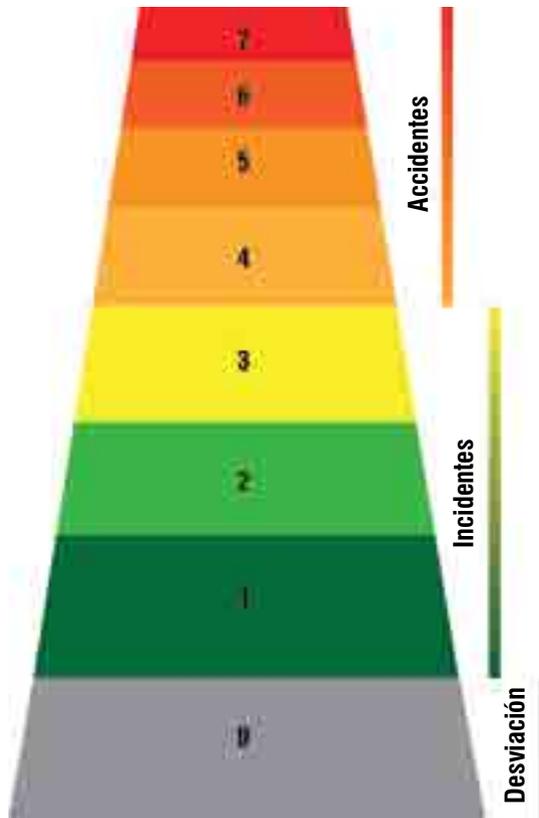
Para proteger al público introduciendo contramedidas, las Normas Básicas de Seguridad del OIEA especifican niveles de dosis en intervenciones. Éstos se usan para identificar qué acciones serían las más convenientes en circunstancias concretas.

Una consecuencia del accidente de Chernóbil fue que la “*Comisión del Codex Alimentarius de la Organización para la Agricultura y los Alimentos*” (FAO) y la “*Organización Mundial de la Salud*” introdujeron niveles de acción para la contaminación radiactiva de alimentos. Dichos niveles de acción, fijados para el primer año posterior a un accidente, tienen como propósito el comercio internacional pero también proveen una orientación útil a las autoridades nacionales con respecto al consumo de productos alimentarios de producción local.

Información al público

En la generalidad de los casos, cuando algo se rompe o deteriora en una instalación nuclear, los diferentes niveles de los sistemas de seguridad garantizan que

- 7
Accidente grave
- 6
Accidente importante
- 5
Accidente con riesgo fuera del emplazamiento
- 4
Accidente sin riesgo significativo fuera del emplazamiento
- 3
Incidente importante
- 2
Incidente
- 1
Anomalia
- 0
sin significación para la seguridad



la situación permanezca controlada y no se transforme en un accidente. Sólo en circunstancias muy improbables, cuando fallan varios sistemas de seguridad puede producirse una situación accidental. Para proveer una indicación simple a los medios de comunicación y al público de

la gravedad de un evento, el OIEA y la AEN/OCDE¹ han creado la “Escala internacional de sucesos nucleares” (INES, por sus siglas en inglés). Los eventos están

Escala internacional de sucesos nucleares (INES), para comunicar de manera inmediata la importancia que un suceso tiene para la seguridad

.....
1 Agencia de la Energía Nuclear de la Organización para el Comercio y el Desarrollo Económico

clasificados en una escala que va de cero a siete: la clasificación cero significa que hubo un problema pero que los sistemas de seguridad funcionaron debidamente y lo corrigieron antes de que existiera riesgo alguno para los trabajadores o para el público, mientras que la clasificación siete significa un desastre nuclear de gran envergadura, como el accidente de 1986, en Chernóbil.

Otras emergencias radiológicas

Al igual que en los accidentes nucleares, hay que considerar dos aspectos para tratar las emergencias que impliquen fuentes radiactivas: hacer todo lo posible para prevenir accidentes, pero también estar preparado para responder en caso de necesidad.

Los accidentes que impliquen fuentes radiactivas pueden prevenirse garantizando que sólo personas adecuadamente calificadas y capacitadas utilicen las fuentes y estén a cargo de ellas. Deberían seguirse procedimientos establecidos para asegurar que la fuente sea usada correctamente y no sea extraviada, dañada o sustraída, o quede de algún modo fuera del con-

trol del usuario responsable. Esto obliga a las autoridades nacionales a tener en vigor un sistema confiable y apropiado para el seguimiento de las fuentes y de sus responsables. Durante los últimos años, el OIEA, a través de su programa de Cooperación Técnica, ha realizado considerables esfuerzos para ayudar a los países² a desarrollar, en sus respectivas jurisdicciones, sistemas de control de las fuentes radiactivas. A pesar del progreso alcanzado, los accidentes persisten, demostrando que todavía queda mucho por hacer.

Cuando sobrevienen accidentes, se pueden necesitar medidas para recuperar el control y custodiar la fuente involucrada, tratar a las personas expuestas como resultado del accidente e investigar cómo sucedió y así aprender cómo evitar situaciones similares en el futuro. En muchos de los casos recientes, los países implicados han pedido la asistencia del OIEA para llevar a cabo una o más de dichas medidas, invocando la *Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica*.

.....
² Estados Miembros del Organismo.

Normalmente, las fuentes de radiación y sus aplicaciones son utilizadas por profesionales en instituciones bien administradas y correctamente reguladas. Como se ha descrito previamente, fuente de radiación puede ser un dispositivo generador de radiación, como los equipos de rayos x o los aceleradores de partículas que se utilizan en medicina. Pero también, fuentes de radiación son los materiales radiactivos confinados dentro de un recinto o cápsula de seguridad. Igualmente lo son algunas sustancias radiactivas contenidas en recipientes abiertos, particularmente usadas en medicina nuclear e investigación. Pueden surgir problemas cuando ocurre un accidente que involucra una fuente de radiación y ésta queda dañada o se extravía.

Accidentes con fuentes de radiación

Las fuentes de radiación son ampliamente utilizadas en la industria y los ac-

cidentes pueden ocurrir debido a un mal procedimiento o en ocasiones por imprudencia.

Durante el último medio siglo se han denunciado gran cantidad de accidentes que involucraron fuentes de radiación o materiales radiactivos. Ha habido muertes a causa de la exposición excesiva a la radiación y mucha más gente ha sufrido lesiones serias, a veces discapacitantes. En ocasiones, el daño ocasionado al medio ambiente ha sido considerable y su reparación ha resultado financieramente costosa. La violación a los requisitos de seguridad o de protección física es el denominador común en los accidentes importantes. Otro factor común es que la mayor parte de ellos podría haberse evitado poniendo en práctica las normas de seguridad internacionales desarrolladas y publicadas para ese propósito.

Entre 1945 y 1999 se denunciaron unos 140 accidentes serios que implicaron exposición excesiva a la radiación, en

Accidentes fatales por irradiación, ocurridos entre 1987 y 2001, en instalaciones industriales nucleares y no nucleares y en centros de investigación y medicina

Año	Localidad	Clase de fuente	Víctimas fatales causadas por la exposición a la radiación		
			Trabajadores	Público	Pacientes
1987	Goiania, Brasil	Fuente de teleterapia removida del equipo		4	
1989	San Salvador, El Salvador	Irradiador industrial	1		
1990	Zaragoza, España	Acelerador para terapia			varios*
1990	Soreq, Israel	Irradiador industrial	1		
1991	Nesvizh, Belarus	Irradiador industrial	1		
1992	China	Fuente de cobalto 60 extraviada		3	
1992	EE.UU.	Braquiterapia			1
1994	Tammiku, Estonia	Fuente sustraída de un depósito de desechos		1	
1996	San José, Costa Rica	Radioterapia			varios*
1997	Sarov, Federación Rusa	Conjunto crítico	1		
1999	Tokaimura, Japón	Accidente de criticidad	2		
2000	Tailandia	Fuente de cobalto 60 extraviada		3	
2000	Egipto	Fuente de iridio 192 extraviada		2	
2001	Panamá	Sobreexposición en radioterapia			varios*

(*) Los individuos afectados, en este caso, eran pacientes con cáncer que estaban recibiendo radioterapia, por lo tanto, no se conoce el número de muertos atribuibles a la sobreexposición. El número de pacientes sobreexpuestos fue: 26 en Zaragoza, 115 en San José y 28 en Panamá. En todos los casos, se considera que la sobreexposición ha sido una causa directa o importante de varias muertes.

la industria nuclear, instalaciones militares, hospitales, laboratorios de investigación y en la industria en general. La situación más frecuente (alrededor de la mitad de los casos denunciados) se debió al trato incorrecto o al uso inapropiado de fuentes selladas para radiografía industrial y para radioterapia en centros médicos. Los casos que tuvieron las consecuencias más graves para la salud se debieron a que personas que desconocían el peligro que implicaba su proceder manipularon fuentes de radioterapia de equipos médicos abandonados. Lamentablemente, en la práctica médica también existen casos en que los pacientes fueron involuntariamente sobreexpuestos a fuentes radiactivas, en general por error humano o por procedimientos de calibración desacertados.

La tabla de la página anterior presenta la información sobre los accidentes más graves con consecuencias fatales denunciados entre 1987 y 2001.

Contaminación causada por fuentes extraviadas

Muchas fuentes de radiación son dispositivos sellados o encapsulados, con el material radiactivo sólido, herméticamente

te confinado dentro de una cápsula o recipiente adecuado; otras fuentes son simplemente materiales radiactivos sueltos o en solución. Las fuentes selladas deberían significar únicamente riesgo de exposición a la radiación externa; sin embargo, cuando las fuentes encapsuladas están deterioradas pueden conducir, al igual que las sustancias radiactivas en recipientes abiertos, a la contaminación radiactiva del medio ambiente y a la incorporación de radionucleidos al organismo humano.

Preocupa especialmente la posibilidad de que fuentes radiactivas extraviadas o desechadas impropriamente se mezclen con chatarra destinada a fundición para ser reciclada. La tabla en la página siguiente da una estimación de las situaciones de contaminación más importantes que involucraron fuentes radiactivas en la industria del reciclado.

Cada una de estas situaciones tuvo un impacto económico importante en la industria afectada y a veces consecuencias imprevisibles para el medio ambiente y la salud. Además de los enumerados, hubo incontables casos en que los equipos de vigilancia radiológica que suelen estar instalados en los accesos a las plantas de reciclado de metales detectaron fuentes

Tipo de fuente extraviada	Casos informados (1983-1998)	Industrias que reciclan chatarra afectadas
cobalto 60	15	acero (14), cobre
cesio 137	30	acero (27), aluminio (2), plomo
iridio 192	1	acero
radio 226	3	aluminio (2), acero
torio 232	3	aluminio (2), acero
americio 241	3	aluminio, cobre, oro
otros	4	aluminio, cobre, cinc, plomo
Total	59	

Casos importantes de contaminación por fuentes extraviadas

radiactivas. En muchos países, la instalación de detectores de radiación en las instalaciones de reciclado se ha vuelto práctica común y, por consiguiente, es de esperar que disminuya el número de situaciones serias de contaminación.

Dispersión intencional de material radiactivo

Si bien algunos de los sucesos antes descritos implicaron la sustracción de fuentes por personas que desconocían el riesgo que ello implicaba, también preocupa la posibilidad de que ocurran intentos deliberados de utilizar fuentes radiactivas como arma terrorista. Se ha especulado muchísimo, desde los ataques terroristas del 11 de

septiembre de 2001, en los EE.UU, sobre la posibilidad de que los terroristas utilicen un dispositivo de dispersión radiactivo o “bomba sucia”, empleando una fuente radiactiva junto con explosivos convencionales. Tal bomba no causaría una explosión nuclear, aunque sí dispersaría el material radiactivo sobre un área de aproximadamente un kilómetro cuadrado. Aunque esto podría, como en los accidentes previamente descritos, ocasionar un cierto número de víctimas mortales, los efectos totales de la radiación serían limitados. Cuanto más grande sea el área de dispersión del material mayor será su dilución y menor la dosis que la gente recibiría, sin embargo, un hecho de esta naturaleza suscitaría una grave conmoción social. La construcción de semejante dispositivo probablemente implicaría dosis de radiación peligrosamente grandes para los terroristas, pero es posible que eso no llegara a importarle, ya que antes deberían haberse preocupado de su propia seguridad para apoderarse del material radiactivo. Dicha posibilidad refuerza la necesidad de tomar medidas eficaces para garantizar que las fuentes radiactivas estén siempre bajo un control riguroso hasta el momento de ser descartadas permanentemente.

CAPÍTULO 15 TRANSPORTE DE MATERIALES RADIATIVOS

Los materiales radiactivos son transportados rutinariamente a través de todo el mundo por aire, mar y tierra (carretera o ferrocarril). El material transportado comprende no sólo el asociado con el ciclo del combustible nuclear –los minerales de uranio, el combustible gastado y los desechos radiactivos– sino también radionucleidos para medicina nuclear e investigación y fuentes radiactivas para la industria y radioterapia. Aunque la seguridad de dichos transportes es excelente históricamente, a veces generan intranquilidad en las regiones que atraviesan. Por ejemplo, diversos países han expresado especial preocupación sobre el transporte de desechos radiactivos en embarcaciones que surcan o bordean sus aguas territoriales.

Las regulaciones, por consiguiente, no sólo son necesarias para garantizar que son nimias las posibilidades de un accidente que podría dispersar material



radiactivo en el ambiente, sino también para certificar que los trabajadores involucrados en el transporte –los encargados de la carga y descarga de los embarques y los choferes y pilotos– están protegidos. Debido a que una parte considerable de ese tráfico es internacional, la seguridad en el transporte es el área donde el OIEA desarrolló primero estándares

Transporte carretero de desechos radiactivos, en EE.UU.



Blindaje para transportar internacionalmente fuentes industriales de cobalto 60

de seguridad. El primer *Reglamento del OIEA para el transporte seguro de materiales radiactivos* fue publicado en 1961 y desde entonces es periódicamente revisado.

El Reglamento contempla el embalaje necesario, los blindajes, el etiquetado y toda otra precaución que se debe tomar al transportar las diversas clases de material radiactivo, incluyendo los ensayos a que deben someterse los bultos para demostrar su resistencia a posibles accidentes. Los requisitos se clasifican según el nivel de actividad del material a transportar. En general, los materiales radiactivos más peligrosos necesitan un

embalaje más grande y robusto, además de controles administrativos y de calidad más estrictos.

El “*Reglamento del transporte*” del OIEA es aceptado ampliamente como el estándar mundial para el transporte de materiales radiactivos. En algunos casos, el Reglamento del Organismo está incorporado a regulaciones y leyes nacionales. Algunos países dictan sus propias regulaciones para el transporte de materiales radiactivos, pero cuidan que éstas sean coherentes con el Reglamento del OIEA. Otra forma de aplicación de los requisitos del Organismo es mediante las normas internacionales sobre el transporte de mercancías peligrosas. Las regulaciones para los diferentes modos de transporte son adoptadas por distintas organizaciones, particularmente la *Organización internacional de aviación civil* (ICAO, por las siglas de su nombre en inglés) para el transporte por aire, la *Organización marítima internacional* (IMO, por su nombre en inglés) para el transporte por mar y organizaciones regionales como el *Comité de transporte interior de la Comisión Económica para Europa*, de la ONU, para el transporte por tierra y

cursos de agua interiores. Las regulaciones de las organizaciones mencionadas cubren toda clase de material peligroso y los capítulos que tratan de materiales radiactivos están basados en el “*Reglamento del transporte*” del OIEA.

Generalmente, se acepta que el acatamiento del “*Reglamento para el transporte*” del OIEA (tanto directamente como por intermedio de otras regulaciones) garantiza la seguridad tanto de los trabajadores como de la población en general. Sin embargo, con frecuencia surgen dudas acerca del cumplimiento de dicho Reglamento en determinados embarques. Sondeos del OIEA indican que éste se aplica ampliamente. Para demostrar su acatamiento, cualquier Estado Miembro puede pedir al Organismo que evalúe cómo se está aplicando dicho Reglamento en su pro-



pio territorio. Un equipo examinador internacional de expertos visita el país solicitante, estudia las organizaciones de aplicación y luego informa sus conclusiones y recomendaciones.

Embarcación diseñada especialmente para transportar los elementos combustibles gastados y los desechos de media actividad, desde las centrales nucleares a las instalaciones de almacenamiento interino de combustible (CLAB) y al repositorio de media actividad, en Forsmark, Suecia

Actínidos. Grupo de 15 elementos con número atómico que va desde el actinio (89) al lawrencio (103) inclusive. Todos son radiactivos. El grupo incluye el uranio, el plutonio, el americio y el curio.

Actividad. Tasa de las transformaciones nucleares en un *material radiactivo*. Se usa como medida de la cantidad presente de un *radionucleido*. La unidad es el *becquerel*, el símbolo **Bq**. 1 Bq = 1 transformación por segundo.

ADN. Ácido desoxirribonucleico. Compuesto que controla la estructura y función de las células y es el principal componente del material genético.

Átomo. Unidad de materia compuesta por un solo núcleo rodeado por una cantidad de *electrones* igual al número de *protones* existente en el núcleo. Es la fracción más pequeña de un elemento que se puede combinar químicamente con otros átomos.

Becquerel. Ver *actividad*.

Braquiterapia. Aplicación, en o sobre el cuerpo, de fuentes radiactivas selladas para tratar ciertas clases de cáncer.

Ciclo del combustible nuclear. Todas las operaciones asociadas con la producción de energía nucleoelectrónica, que incluyen: minería, concentración, procesamiento y enriquecimiento del uranio, la fabricación del combustible nuclear, la operación de las *centrales nucleares*, el reprocesamiento del combustible nuclear, cualquier investigación y desarrollo relacionado y las actividades humanas relacionadas con la *gestión de los desechos* (incluyendo la *clausura*).

Clausura. Acciones administrativas y técnicas encaradas para cancelar el control regulador de una instalación. La *clausura* incluye, normalmente pero no necesariamente, el desmantelamiento de la instalación.

Contador de centelleo. Dispositivo basado en un material que emite destellos de luz cuando es expuesto a la *radiación ionizante*. Los destellos se convierten a pulsos eléctricos que son computados. El número de pulsos está relacionado con la *dosis*.

Cromosomas. Cuerpos en forma de cayado localizados en el *núcleo de las células*. Contienen los *genes*, o componentes hereditarios. Los seres humanos poseen 23 pares.

Decaimiento. Proceso de transformación espontánea de un *radionucleido*. Disminución de la actividad de una sustancia *radiactiva*, como resultado de ese proceso.

Desechos radiactivos. Para propósitos legales y reguladores, material para el cual no se prevé nuevo uso y que contiene o está contaminado con *radionucleidos* en concentraciones o *actividades* mayores que los niveles fijados por el *organismo regulador*.

Detrimento por la radiación. Daño total que eventualmente podría ser experimentado por una persona o un grupo expuesto y sus descendientes, como consecuencia de su *exposición* a la *radiación*.

Diodo de silicio. Dispositivo hecho de un compuesto de silicio, en el cual fluye la corriente eléctrica cuando es expuesto a la *radiación ionizante*. La corriente se convierte a pulsos eléctricos que son contabilizados. El número de pulsos está relacionado con la dosis.

Dosis absorbida. Energía impartida por la *radiación ionizante* a un volumen adecuadamente pequeño de materia, dividido por la masa de ese volumen. Unidad: *gray*, símbolo: **Gy**. $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule por kilogramo}$.

Dosis colectiva. Dosis de radiación total contraída por una población. Frecuentemente usado para la dosis efectiva colectiva.

Dosis efectiva colectiva. Magnitud obtenida sumando las *dosis efectivas* recibidas por todas las personas en una población definida (a menudo todas las personas expuestas a la *radiación* de determinada fuente). Unidad: *sievert hombre*, símbolo: **Sv hombre**. Frecuentemente abreviada como *dosis colectiva*.

Dosis efectiva. Magnitud concebida para reflejar la cantidad del probable perjuicio a la salud como consecuencia de la *dosis* de radiación. Se la obtiene multiplicando la *dosis equivalente* a cada tejido u órgano por un factor de ponderación apropiado para ese tejido u órgano y sumando los productos. Unidad: *sievert*, símbolo: **Sv**. Los factores de ponderación de los tejidos están tabulados en el capítulo 2.

Dosis equivalente. Magnitud de la dosis a un órgano o tejido, concebida para reflejar la cantidad del daño causada al mismo. Es obtenida multiplicando la *dosis absorbida* por un factor de ponderación de la radiación, que tiene en cuenta la eficacia de las diferentes clases de *radiación* para causar daño al tejido. Unidad: *sievert*, símbolo: **Sv**. Los factores de ponderación de la radiación se dan en el capítulo 2.

Dosis. Término general para la cantidad de energía depositada por la *radiación* en un “blanco”. Frecuentemente usado para la dosis efectiva. Vea los términos más específicos: *dosis absorbida*, *dosis equivalente*, *dosis efectiva* y *dosis efectiva colectiva*.

Electrón volt. Unidad de energía empleada en física de la radiación. Es igual a la energía ganada por un electrón cuando es sometido a una diferencia de potencial de 1 volt. Símbolo: **eV**. $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ joule, aproximadamente.

Electrón. Partícula elemental estable que tiene una carga eléctrica negativa de $1,6 \times 10^{-19}$ C y una masa de $9,1 \times 10^{-31}$ kg.

Elemento. Sustancia donde todos los *átomos* tienen el mismo *número atómico*.

Eritema. Enrojecimiento de la piel causado por la dilatación de los vasos sanguíneos. Puede sobrevenir como consecuencia de una *dosis* de *radiación* alta.

Excitación. Proceso por el cual la radiación imparte energía a un *átomo* o *molécula* sin causar *ionización*. La energía puede ser absorbida por el *núcleo* o los *electrones* y puede liberarse en forma de *radiación* cuando el *átomo*, o la *molécula*, se “relaja”.

Factor de riesgo. *Riesgo en toda la vida*, o detrimento por la *radiación*, supuesto como resultante de la *exposición* por unidad de *dosis equivalente* o *dosis efectiva*. Unidad Sv^{-1} .

Fisión. Fisión nuclear. División de un núcleo pesado en dos partes (o raramente en más partes) con masas de igual orden de magnitud, comúnmente acompañada por la emisión de *neutrones* y *radiación gamma*.

Fotón. Cuanto de *radiación electromagnética*.

Fusión. Fusión termonuclear. Unión de dos *núcleos* livianos, que implica liberación de energía más la producción de por lo menos una especie nuclear más pesada que cualquiera de los *núcleos* iniciales.

Genes. Unidades biológicas de herencia de los seres vivos. Están ordenados a todo lo largo de los *cromosomas*.

Gestión de los desechos. Todas las actividades administrativas y las operacionales involucradas en la *manipulación*, el *tratamiento*, *acondicionamiento*, *transporte*, *almacenamiento* y la *disposición* de los *desechos radiactivos*.

Gray. Ver *dosis absorbida*.

Interacción eléctrica. Fuerza de repulsión, que actúa entre cargas eléctricas de igual signo, o de atracción, que actúa entre cargas eléctricas de signo contrario.

Ion. *Átomo, molécula* o fragmento de una *molécula* que ha adquirido una carga eléctrica por pérdida o captura de *electrones*.

Ionización. Proceso de producción de *iones*, por el que un *átomo* o una *molécula* adquiere o pierde una carga eléctrica.

Irradiación. Acto de exposición a la *radiación*. Puede ser intencional, por ejemplo, en la irradiación industrial o para esterilizar equipamiento médico, o accidental, por ejemplo, por proximidad a una fuente que emite *radiación*. La irradiación comúnmente no produce contaminación radiactiva, pero puede dar lugar a daño, dependiendo de la *dosis* recibida.

Isótopo. *Nucleido* con el mismo número de *protones* pero diferente número de *neutrones*.

Longitud de onda. Distancia entre las crestas sucesivas de una *onda electromagnética*.

Masa atómica. Masa de un *isótopo* de un *elemento*, expresada en unidades de masa atómica. Esta unidad está definida como *un doceavo de la masa de un átomo de carbono 12*. La masa atómica 1 es equivalente a $1,66 \times 10^{-27}$ kg.

Material termoluminiscente. Material que cuando es calentado libera luz visible en forma proporcional a la cantidad de *radiación ionizante* a la cual ha sido expuesto.

Medicina nuclear. Uso de *radionucleidos* para diagnosticar o tratar una enfermedad.

Moderador. Material usado en los *reactores térmicos* para reducir la energía y la velocidad de los *neutrones rápidos* emitidos en la fisión, transformándolos en *neutrones térmicos* adecuados para producir más *fisiones*.

Molécula. Grupo de *átomos* unidos químicamente entre sí. La fracción más pequeña de una sustancia que puede existir sola y retener las propiedades de la sustancia.

Mutación. Cambio químico en el *ADN* del *núcleo de una célula*. Las mutaciones en los espermatozoides u óvulos o en sus precursores pueden llevar a efectos hereditarios en los descendientes. Las mutaciones en las células somáticas pueden llevar a efectos en el individuo.

Neutrón. Partícula elemental que no tiene carga eléctrica, tiene una masa de aproximadamente $1,67 \times 10^{-27}$ kg y un *periodo de semidesintegración* de unos 1000 segundos.

Neutrones rápidos. *Neutrones* de alta energía (es decir que se mueven con gran velocidad), como los producidos por la *fisión nuclear*. En física de reactores, convencionalmente se los define como los neutrones con energías cinéticas mayores que 0,1 MeV. La velocidad correspondiente es de alrededor de 4×10^6 m/s.

Neutrones térmicos. *Neutrones* en equilibrio térmico con el medio en el cual existen, es decir, tienen la misma energía térmica que los *átomos* o *moléculas* circundantes. La energía promedio de los *neutrones*, a la temperatura ambiente, es aproximadamente 0,025 eV, correspondiendo a una velocidad media de $2,2 \times 10^3$ m/s.

Nucleido. Especie de *átomo* caracterizada por el número de *protones* y *neutrones* y el estado energético del *núcleo*.

Núcleo (de un átomo). Porción central de un *átomo*, cargada positivamente. Incluye a los *protones* y *neutrones*.

Núcleo (de una célula). Centro de una célula humana que controla su funcionamiento. Contiene importante material genético: el *ADN*.

Número atómico. Número de *protones* en el *núcleo* de un *átomo*. Símbolo: **Z**.

Número de masa. Número de *protones* más *neutrones* en el *núcleo* de un *átomo*. Símbolo: **A**.

Orden de magnitud. Factor de diez veces, o el valor aproximado de una magnitud, expresado como la potencia de diez más cercana a su valor.

Organismo regulador. Organización creada por el gobierno para tener la autoridad legal de la regulación de la seguridad nuclear, radiológica, de los desechos radiactivos y del transporte (de material radiactivo).

Partícula alfa. Partícula emitida por un *radionucleido*, constituida por dos *protones* y dos *neutrones* (es decir, el *núcleo* de un *átomo* de helio).

Partícula beta. *Electrón* o *positrón* que ha sido emitido por un *núcleo* atómico o un *neutrón* en una transformación nuclear.

Periodo de semidesintegración. Tiempo requerido para que la actividad de un *radionucleido* disminuya, por el proceso del *decaimiento radiactivo*, a la mitad. Símbolo: $t_{1/2}$.

Positrón. Partícula elemental estable que tiene una carga eléctrica positiva de $1,6 \times 10^{-19}$ C y una masa de $9,1 \times 10^{-31}$ kg (es decir, igual carga que la de un *electrón*, pero de signo positivo).

Precipitación radiactiva. Depósito, sobre la superficie terrestre, del material radiactivo producto de los ensayos atmosféricos de armas nucleares o de accidentes nucleares, que es transportado por el aire.

Probabilidad. Posibilidad matemática de que un hecho dado ocurra.

Producto del decaimiento. *Nucleido* o *radionucleido* producidos por *decaimiento*. Pueden formarse directamente del *decaimiento* de un *radionucleido* o de una serie de varios *radionucleidos*. A veces, llamado *descendencia* o *hijas*.

Productos de consumo. Dispositivos, como los detectores de humo, esferas luminosas o tubos generadores de iones, que contienen una cantidad pequeña de *sustancias radiactivas*.

Productos de fisión. *Nucleidos* producidos en la *fisión nuclear* o en el *decaimiento* radiactivo del *nucleido* formado en la *fisión*.

Protección radiológica. Protección de las personas de los efectos de la exposición a la *radiación ionizante* y los medios para lograrla.

Protón. Partícula elemental estable que tiene una carga eléctrica positiva de $1,6 \times 10^{-19}$ C y una masa de $1,67 \times 10^{-27}$ kg.

PWR. *Reactor de agua presurizada.*

Radiación electromagnética. Radiación que consiste en campos eléctricos y magnéticos que oscilan en un ángulo recto entre ellos. Varía desde longitudes de onda muy largas (baja energía), como las ondas radiofónicas, a longitudes de onda intermedias, como la luz visible, a longitudes de onda muy cortas (energía alta), como los *rayos gamma*.

Radiación ionizante. A los propósitos de la protección radiológica, *radiación* capaz de producir pares de *iones* en material(es) biológico(s). Ejemplos: las *partículas alfa*, los *rayos gamma*, los *rayos x* y los *neutrones*.

Radiación no ionizante. *Radiación* que no tiene energía suficiente para *ionizar*. Los ejemplos son la *radiación ultravioleta*, la *luz visible*, la *radiación infrarroja* y la de *radiofrecuencia*.

Radiación. Energía en forma de ondas o partículas, que se propaga a través del espacio. Frecuentemente, en este texto se usa para la *radiación ionizante*, excepto cuando es necesario evitar la confusión con la *radiación no ionizante*.

Radiactividad. Radioactividad. Fenómeno en el cual los *átomos* sufren una desintegración aleatoria espontánea, comúnmente acompañada por la emisión de *radiación*.

Radiactividad. Exhibiendo radiactividad. Para propósitos legales y reguladores, el significado de *radiactivo* se circunscribe, a menudo, a los materiales detallados en la ley nacional o por un organismo regulador, que están sujetos al control regulador debido a su *radiactividad*.

Radical libre. *Átomo* no cargado o grupo de átomos que tienen uno o más *electrones* no apareados, que formaban parte de una ligadura química. Generalmente, muy reactivo en el sentido químico.

Radiobiología. Estudio de los efectos de la *radiación ionizante* en los seres vivos.

Radiología (diagnóstica). Uso de *radiación* (por ejemplo *rayos x*) o materiales *radiactivos* en medicina, para identificar una enfermedad o lesión en pacientes.

Radionucleido. *Nucleido radiactivo*.

Radioterapia. Uso de haces de *radiación* para tratar una enfermedad, comúnmente cáncer.

Rayos cósmicos. *Radiación ionizante* de alta energía procedente del espacio exterior. Tienen una composición compleja en la superficie de la Tierra.

Rayos gamma. *Radiación electromagnética* penetrante, emitida por un núcleo atómico durante el *decaimiento radiactivo*, y de longitud de onda mucho más corta que la de la luz visible.

Rayos x. *Radiación electromagnética* penetrante emitida por un átomo, cuando los electrones en el átomo pierden energía, y de longitud de onda mucho más corta que la de la luz visible.

Reactor de agua presurizada. *Reactor térmico* que usa agua como *moderador* y refrigerante. El agua se mantiene a presión para evitar la ebullición.

Reactor nuclear. Dispositivo en el cual se puede mantener y controlar una reacción en cadena de *fisión* nuclear autosostenida. (Un reactor que emplea las reacciones de *fusión* es un *reactor termonuclear*.)

Reactor rápido. *Reactor nuclear* en el que la *fisión* predominantemente es provocada por los *neutrones rápidos*.

Reactor térmico. *Reactor nuclear* en el cual la *fisión* es provocada predominantemente por *neutrones térmicos*.

Repositorio. Relacionado con los *desechos radiactivos*, emplazamiento de una instalación apropiada para tal fin, sin que haya intención de recuperación.

Riesgo. Probabilidad que tiene una persona o grupo de sufrir un efecto específico sobre la salud, como consecuencia de la *exposición* a la *radiación*.

Sievert hombre. Ver *dosis efectiva colectiva*.

Sievert. Ver *dosis efectiva* y *dosis equivalente*.

Tubo Geiger-Müller. Tubo metálico o de vidrio con un gas a baja presión y dos electrodos. La *radiación ionizante* produce descargas que son registradas como pulsos eléctricos en un contador. El número de pulsos está relacionado con la *dosis*.

Uranio empobrecido. Uranio que tiene uranio 235 en una proporción inferior al 0,7%. Derivado de la producción de uranio enriquecido.

Uranio enriquecido. Uranio que tiene uranio 235 en una proporción mayor al 0,7%.

Notación Científica

Dada la dimensión de los valores con los que se tropieza en protección radiológica, a menudo es más conveniente expresar los números en la notación científica en lugar de la decimal. Esto implica el uso de cifras significativas dentro de límites fijados, multiplicadas por diez elevadas al exponente apropiado. Se muestran ejemplos.

Decimal	Científica
1 230 000	$1,23 \times 10^6$
100 000	10^5
3 531	$3,53 \times 10^3$
15,6	$1,56 \times 10^1$
0,239	$2,4 \times 10^{-1}$
0,001	10^{-3}
0,000 087	$8,7 \times 10^{-5}$

Conversión de notación decimal a científica

Prefijos

Las potencias de diez tienen nombres y símbolos especiales. Estos pueden utilizarse como prefijos de las unidades de medida: así, *kilogramo*, símbolo: *kg*, por 10^3 gramo ($1\text{kg} = 10^3 \text{g}$); milímetro, símbolo: *mm*, por 10^{-3} metro ($1\text{mm} = 10^{-3} \text{m}$).

A continuación se listan los prefijos.

Prefijos de las unidades de medidas

Potencia	Prefijo	Símbolo	Potencia	Prefijo	Símbolo
10^1	deca	da	10^{-1}	deci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	mili	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y

Símbolos

En protección radiológica, los símbolos se usan enormemente. Los elementos, normalmente, se representan por símbolos, por ejemplo: *C* para el carbono, *Ba* para el bario y *Pb* para el plomo. Es usual indicar el número de masa y el número atómico de un nucleido particular por un exponente y subíndice. Por lo general, el número atómico se omite.

A continuación, se presenta una tabla de símbolos comunes. Cuando el símbolo para una unidad se muestra con un exponente de -1 a su derecha, significa que la cantidad está usándose en un contexto fraccionario o para representar la relación. Por ejemplo, pueden escribirse sievert *por* hora, como Sv h⁻¹ o Sv/h.

Masas y números atómicos:

carbono 14 por
 $^{14}_6\text{C}$

bario 140 por
 $^{140}_{56}\text{Ba}$

plomo 210 por
 $^{210}_{82}\text{Pb}$

Símbolo	Término	Símbolo	Término
α	partícula alfa	A	número de masa
β	partícula beta	eV	electrón volt
γ	rayos gamma	Bq	becquerel
e	electrón	Gy	gray
p	protón	Sv	sievert
n	neutrón	Sv h	sievert hombre
Z	número atómico	$t_{1/2}$	periodo

Tabla de símbolos comunes en protección radiológica

Unidades

Tiempo atrás, las unidades de las principales magnitudes de la radiación ionizante se cambiaron. En este texto, se utilizan las nuevas, pero los lectores pueden encontrarse con las antiguas unidades; la siguiente tabla muestra cómo realizar la conversión entre ellas.

Magnitud	Unidad antigua	Símbolo	Nueva unidad	Símbolo	Relación
Actividad	curie	Ci	becquerel	Bq	$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
Dosis absorbida	rad	rad	gray	Gy	$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$
Dosis equivalente	rem	rem	sievert	Sv	$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$

Relación entre las unidades de radiación ionizante viejas y nuevas

BIBLIOGRAFÍA

Publicaciones del OIEA

www.aiea.org

Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources (Safety Fundamentals), Safety Series N° 120, IAEA, Vienna (1996).

Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, Colección de Seguridad N° 115, OIEA, Viena (1997).

The Safety of Nuclear Installations (Safety Fundamentals), Safety Series N° 110, IAEA, Vienna (1995).

The Principles of Radioactive Waste Management (Safety Fundamentals, Safety Series N° 111-F), IAEA, Vienna (1995).

Low Doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control: Invited Papers and Discussions (Proceedings of a conference, Seville, Spain, 17-21 November 1997), *Proceedings Series*, IAEA, Vienna (1998).

Legal and Governmental Infrastructure for Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety (Safety Requirements, Safety Series N° GS-R-1), Vienna, (2003).

Preparedness and Response for a Nuclear Radiological Emergency (Safety Requirements) Safety Series N° GS-R-2, Vienna (2002).

www.icrp.org

Publicaciones de la ICRP

Recomendaciones 1990, Comisión Internacional de Protección Radiológica ICRP-60, Sociedad Española de Protección Radiológica, Madrid (1995).

www.unscear.org

Publicaciones del UNSCEAR

UNSCEAR 2000 Report on Sources and Effects of Ionizing Radiation to the General Assembly (2 Volumes), United Nations, Vienna (2000)

UNSCEAR 2001 Report on Hereditary Effects of Radiation to the General Assembly, United Nations, Vienna (2001).

www.nea.fr

AEN/OCDE

Comisión Europea

europa.eu.int/comm/energy/nuclear/radioprotection/publication_en.htm

europa.eu.int/comm/energy/nuclear/publications/installation_en.htm

Justicia ambiental

Hoy día la justicia social debe incluir la conciencia y el manejo racional del ambiente.

Aquellos principios que nos guiaron y nos guían incorporan en la actualidad complejas e imprescindibles dimensiones, tan difíciles de abordar como ineludibles.

El crecimiento económico salvaje, con descuido por el ambiente, representa una tentación para el espíritu ambicioso y una perspectiva nefasta para la sociedad.

Preocupada y ocupada por las nuevas y avanzadas formas de ciudadanía, la Universidad Nacional de Tres de Febrero ha decidido constituirse en un polo de pensamiento en la cuestión ambiental. Sus actividades de docencia, investigación y extensión así lo expresan. Carreras de grado, sondeos permanentes e informes de investigación, encuentros nacionales e internacionales de reflexión y debate académico son algunas de las actividades desarrolladas en este marco.

Este volumen sobre “La radiación, la gente y el ambiente” suma en difusión científica y aporta un abordaje racional a la generación de conciencia en un tema conflictivo y agrega una idea compartida como aspiración social que va más allá de lo académico: mejor calidad de vida para todos.

Anibal Y. Jozami
Rector



UN ENFOQUE GENERAL SOBRE LA RADIACIÓN IONIZANTE,
SUS APLICACIONES Y EFECTOS Y SOBRE LAS MEDIDAS
QUE SE DEBEN TOMAR PARA SU USO SEGURO.

