

Para entender las **RADIACIONES**

Energía Nuclear
Medicina
Industria



Gabriel González Sprinberg

Carolina Rabin Lema

AUTORES



Dr. Gabriel González Sprinberg. Profesor titular del Instituto de Física de la Facultad de Ciencias (Universidad de la República, Uruguay). Cursó sus estudios de licenciatura y doctorado en física nuclear y de partículas en el Centro Atómico Bariloche (Argentina), y continuó sus investigaciones en la Universidad de Valencia (España). Ha publicado numerosos trabajos en revistas internacionales relacionados con la física en grandes aceleradores.
E-mail: gabrielg@fisica.edu.uy



Lic. Carolina Rabin Lema. Docente del Instituto de Física de la Facultad de Ciencias (Universidad de la República, Uruguay), donde obtuvo su título de licenciada en Física. Actualmente realiza una maestría en temas de física médica.
E-mail: crabin@fisica.edu.uy

OTROS INTEGRANTES DEL PROYECTO

Dr. Sergio Ribeiro. Ingeniero nuclear, realizó sus estudios en el Centro Atómico Bariloche, donde es investigador. Ha publicado numerosos trabajos de investigación sobre aplicaciones de técnicas nucleares en temas ambientales.

M.Sc. Ignacio Di Biase. Ingeniero electrónico por la Universidad Católica del Uruguay, máster en Física Médica por el Centro Atómico Bariloche. Ha trabajado en la empresa Tomo Teraphy comisionando equipos de última generación para radioterapia en Europa. Actualmente ejerce como físico médico en el Royal Marsden Hospital (Sutton, Inglaterra).

© 2011 DIRAC – Facultad de Ciencias

Edición de texto:

Diseño de tapa:

www.oficina6.com.uy

Ilustraciones: Lic. Ariadna Santini.



Publicado por DIRAC – Facultad de Ciencias – Universidad de la República.

Calle Iguá 4225 casi Matajojo – Montevideo 11400 – Uruguay

Tel.: (598) 2525.1711 – Fax: (598) 2525.8617

E-mail: dirac@fcien.edu.uy

Este libro ha sido financiado con el programa Fondo Universitario para Contribuir a la Comprensión Pública de Temas de Interés General, de la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República. El título del proyecto es *Fenómenos nucleares y sus aplicaciones: energía, medicina, industria*.

Los conceptos vertidos en los libros editados por la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República son de responsabilidad de sus autores. Su publicación no implica que sean compartidos por las mencionadas instituciones.

ISBN: 978-9974-0-0720-8



Para entender las radiaciones

Energía nuclear, medicina, industria

**Gabriel González Sprinberg
Carolina Rabin Lema**



Facultad de Ciencias
Universidad de la República

Índice

<i>Prefacio</i>	9
<i>¿Cómo usar este libro?</i>	11
<i>Introducción</i>	13
<i>¿Qué son las radiaciones ionizantes?</i>	15
<i>¿Qué ocurre en la naturaleza?</i>	21
<i>¿Qué es la radiación artificial?</i>	24
<i>¿Qué sucede cuando la radiación y la materia se encuentran?</i>	25
<i>¿Cómo se mide la radiación?</i>	27
<i>Radiaciones ionizantes y salud</i>	30
<i>Radiación y cáncer</i>	32
<i>Radiación y embarazo</i>	36
<i>¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?</i>	38
<i>Medicina</i>	38
<i>Industria</i>	50
<i>Otros</i>	54
<i>Centrales nucleares y energía</i>	57
<i>Armas nucleares</i>	68
<i>Desechos radioactivos</i>	73
<i>Radioprotección</i>	76
<i>¿Quién controla el uso de las radiaciones?</i>	80
<i>¿Sabías que...?</i>	81
<i>Glosario</i>	85
<i>Para saber más</i>	91

Prefacio

Este libro pretende ser una primera aproximación a las radiaciones nucleares, y más en general, a las radiaciones ionizantes. El tema está presente en la opinión pública, en los medios de comunicación y frecuentemente es motivo de conversación y de preocupación para los ciudadanos. Ha sido nuestra intención brindar información accesible, sin abusar de términos técnicos, basada en el conocimiento científico y en lo posible desapegada de las opiniones personales de los autores.

Hemos trabajado en este libro como parte de un proyecto de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) destinado justamente a fomentar la comprensión de temas de interés para la opinión pública. El grupo multidisciplinario que ha integrado este proyecto estuvo formado por dos físicos, un ingeniero nuclear y un físico médico. Contamos también con la ayuda de una especialista en producción de materiales audiovisuales y su equipo.

Queremos agradecer a quienes han hecho posible este libro: CSIC-UDELAR y en particular el Instituto de Física de la Facultad de Ciencias.

Creemos que el conocimiento puede ayudar a disminuir el temor por las radiaciones y proceder en la forma más adecuada en situaciones y decisiones que las involucren. También pensamos que contribuir a generar en nuestra sociedad una cultura en este tema de gran importancia le permitirá madurar las decisiones que deba tomar al respecto en el futuro.

Gabriel González Sprinberg
Carolina Rabin Lema

Instituto de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de la República, Uruguay

¿Cómo usar este libro?

Hoy en día la gran cantidad de información disponible por diferentes medios también es causa de dificultades para informarse adecuadamente. Internet, por ejemplo, constituye una fuente inagotable, pero también frecuentemente contiene errores que son difíciles de discernir para lectores no especialistas. Por otra parte, muchas veces es imposible encontrar en la maraña de datos y páginas la respuesta que nos interesa, escrita en un lenguaje accesible y sin vicios evidentes —como puede ser una fuerte parcialidad de quien la brinda.

Este libro le permitirá acceder fácilmente a información y datos precisos acerca de las radiaciones ionizantes, sus efectos en la salud y sus usos más importantes y frecuentes. Hemos usado un mínimo de vocabulario técnico que le permita al lector profundizar en estos temas, si ese es su deseo, y entender los datos y las polémicas que publican corrientemente los medios de información.

Para facilitar la presentación a un mayor número de lectores hemos optado por definir solamente algunas magnitudes de dosis y sus unidades. Esto impone ciertas limitaciones en la precisión del texto, pero a cambio ganamos en comprensión para la mayoría de las personas.

Este libro, así como otros datos y material audiovisual, se encuentran disponibles en la página web <<http://divnuclear.fisica.edu.uy>>. Se pueden plantear dudas escribiendo a la dirección <divnuclear@fisica.edu.uy>.

En las siguientes páginas, diversos recuadros contienen información adicional que enriquecen el contenido, sea ampliándolo o con datos útiles al respecto.

En la sección “¿Sabías que...?” se incluyen datos curiosos e interesantes acerca de las radiaciones y sus efectos.

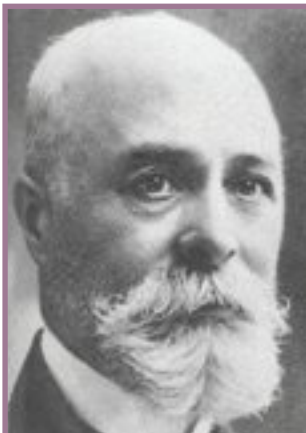
Finalmente, las definiciones de los términos empleados en el libro se encuentran reunidas en el “Glosario”.

Introducción

Al hablar de radiaciones en general no se tiene un concepto claro, pero se las asocia a algo negativo. No es un hecho conocido, y es positivo enterarse de que vivimos en un mundo naturalmente radioactivo y que probablemente gracias a ello la vida sea tal y como la conocemos.

Así es; la mayor parte de la radiación recibida por la población mundial proviene de fuentes naturales y es inevitable exponerse a la mayoría de ellas. Pero además, en los últimos cien años aproximadamente, desde el descubrimiento de los rayos X, hemos producido artificialmente elementos radioactivos y diferentes tipos de radiaciones, y hemos aprendido a utilizar la energía nuclear con diferentes propósitos: médicos, bélicos, industriales y para la generación de energía eléctrica.

Todas estas prácticas, sumadas a la radiación liberada en forma accidental (Chernobyl) o intencional (bombas atómicas), han aumentado la cantidad de radiación recibida por los seres humanos. Si bien este incremento ha sido mucho menor que la radiación natural, sus efectos, positivos y negativos, son muy importantes.



Henri Becquerel
(1852-1908). Descubridor de la radioactividad. Premio Nobel de Física 1903



Wilhelm Roentgen
(1845-1923). Descubridor de los rayos X. Primer Premio Nobel de Física 1901



Marie Curie
(1867-1934). Pionera en el estudio de la radioactividad. Premio Nobel de Física 1903 y Química 1911

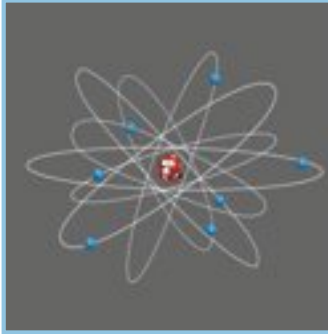
La opinión pública ha mostrado gran preocupación por la potencialidad que poseen las radiaciones para causar daños a corto y largo plazo, tanto ecológicos como sobre la salud de las personas. Las radiaciones no se ven, en bajas dosis tampoco se sienten y sin embargo pueden tener efectos importantes.

¿Cuánto sabemos acerca de las radiaciones? ¿En qué sentido son seguras? No hay actividad humana sin un riesgo potencial y cada persona debe decidir si los riesgos que corre son compensados por los beneficios que recibe. Únicamente la información permitirá tomar las decisiones más adecuadas.

Son estas preguntas las que nos motivaron a realizar este libro acerca de las radiaciones y sus usos, para contribuir a separar mitos y realidad y proporcionar los elementos mínimos que ayuden a reflexionar al respecto.

¿Qué son las radiaciones ionizantes?

La radiación es el transporte o la propagación de energía en forma de partículas u ondas. Si la radiación es debida a fuerzas eléctricas o magnéticas se llama radiación electromagnética. Pero la materia también puede emitir otras formas de radiación que explicaremos a continuación.



La materia está constituida por átomos y agrupaciones de ellos que son las moléculas. Los átomos a su vez consisten en un pequeño núcleo formado por protones —partículas que poseen carga eléctrica positiva— y neutrones —partículas similares a los protones pero que no poseen carga eléctrica—. Orbitando en torno al núcleo se encuentran los electrones —que poseen carga eléctrica negativa—. Cuando la cantidad de electrones iguala en número a los protones, entonces el átomo es neutro y su carga eléctrica total es cero. Si esto no es así, el átomo tiene carga eléctrica y se llama *ion*.

En la naturaleza, la gran mayoría de los núcleos atómicos son estables y se mantienen inalterados en el tiempo. Existen, sin embargo, algunos núcleos atómicos que son inestables, en el sentido de que pueden emitir espontáneamente partículas cargadas o radiación electromagnética (fotones), o aun romperse en varios núcleos más pequeños, modificando su identidad. A estos núcleos inestables se los llama *radionucleidos* o *radioisótopos* y son perfectamente conocidos.

El proceso de emisión se llama *decaimiento*, *desintegración radioactiva* o *radioactividad*. Si los productos de las desintegraciones interaccionan

La *carga eléctrica* de las partículas es la responsable de las fuerzas eléctricas y magnéticas.

Molécula = combinación de átomos.

Átomo = núcleo + electrones.

Núcleo = protones + neutrones.

El núcleo atómico tiene miles de veces más masa que todos los electrones del átomo.

El diámetro del núcleo atómico es 10.000 veces más pequeño que el del átomo.

¿Qué son las radiaciones ionizantes?

La energía típica de las radiaciones emitidas en desintegraciones nucleares es cientos o varios miles de veces mayor que la necesaria para ionizar un átomo o una molécula.

La radiación electromagnética está formada por partículas llamadas *fotones*. De acuerdo a su energía recibe diferentes nombres: *luz visible*, *rayos X*, *rayos gamma*, *luz ultravioleta*, *microondas* y otros.

Las *radiaciones ionizantes* son fotones o partículas emitidas por elementos radioactivos o en procesos atómicos que poseen energía suficiente como para ionizar átomos o moléculas.

con un átomo o molécula y liberan un electrón, se dice que ocurrió una *ionización*. Todas las partículas o fotones que tienen suficiente energía como para producir una ionización se llaman *radiaciones ionizantes*. Las radiaciones ionizantes pueden llegar a ionizar o romper ligaduras en átomos o moléculas millones de veces antes de perder toda su energía. Esta es la razón central por la que pueden tener importantes efectos biológicos y sobre la salud.

La desintegración radioactiva es un fenómeno físico que tiene propiedades muy particulares, relacionadas con la *mecánica cuántica*. Esta es la teoría que describe los procesos microscópicos en la naturaleza. La radioactividad es un proceso al azar o probabilístico, y la física únicamente puede predecir la frecuencia o el ritmo en que sucede. Esto significa que no podemos estar seguros del momento en que ocurre, sino tan solo conocer ¡la probabilidad de que se produzca en un cierto intervalo de tiempo! Más aún, esta probabilidad es independiente del momento en que un núcleo radioactivo es creado, lo que significa que los núcleos ¡no envejecen!

La desintegración radioactiva no depende de las influencias del entorno —como presión, temperatura, reacciones químicas y otros—. Cada radionucleido está caracterizado por su *vida media*, que es el tiempo en el que la mitad de un conjunto de núcleos radioactivos se desintegra. Este tiempo puede tomar valores desde fracciones de segundos hasta billones de años.

Las radiaciones ionizantes también pueden producirse en procesos diferentes a las desintegraciones radioactivas. Por ejemplo, cuando

¿Qué son las radiaciones ionizantes?

se aceleran o frenan partículas con carga eléctrica, se emiten fotones capaces de ionizar. También es posible con dispositivos muy sofisticados (ciclotrón, acelerador lineal) acelerar partículas cargadas, como núcleos o electrones, hasta altas energías.

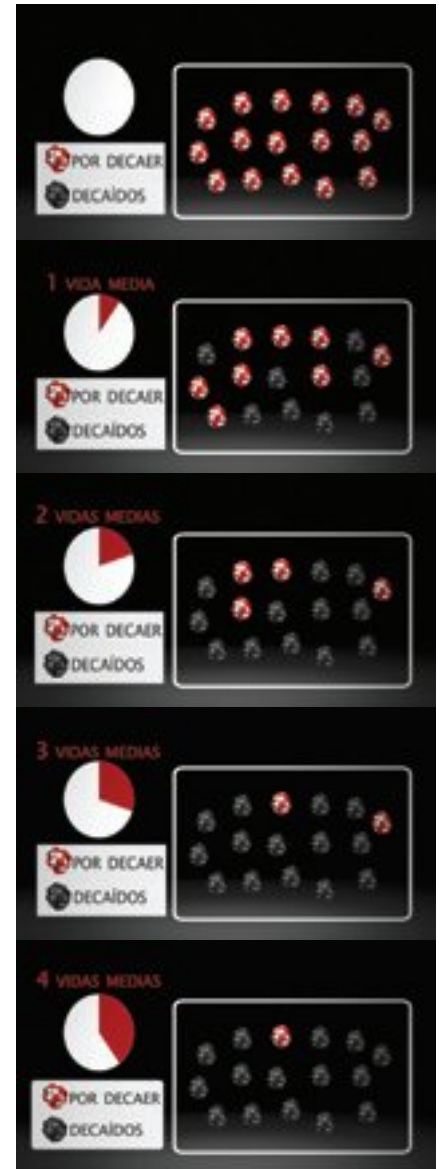
Vida media de algunos elementos

^{15}O (Oxígeno 15)	122 segundos
^{222}Rn (Radón 222)	3,8 días
^{131}I (Yodo 131)	8 días
^{90}Sr (Estroncio 90)	29,1 años
^{137}Cs (Cesio 137)	30 años
^{14}C (Carbono 14)	5730 años
^{41}Ca (Calcio 41)	103.000 años
^{40}K (Potasio 40)	1,3 millones de años
^{235}U (Uranio 235)	703,8 millones de años

La *actividad* de un material que contiene radionucleidos es el número de desintegraciones que ocurren por segundo en dicho material.

TIEMPO

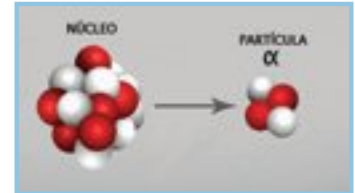
Vida media



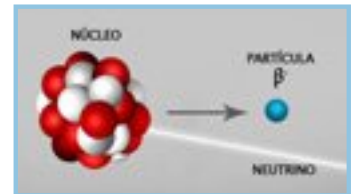
¿Qué son las radiaciones ionizantes?

Las radiaciones ionizantes se presentan en unas pocas variedades y se pueden clasificar de la siguiente manera:

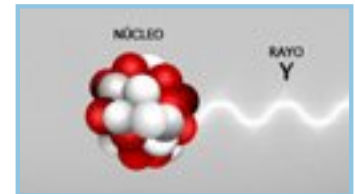
- *Radiación α (alfa)*: Un núcleo inestable emite un núcleo de helio (formado por dos protones y dos neutrones); el núcleo original se transforma en otro.



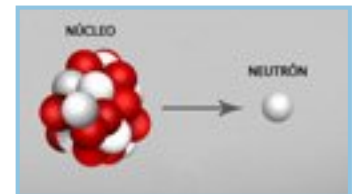
- *Radiación β (beta)*: Existen dos tipos de esta radiación: si un núcleo inestable emite un electrón, se llama *beta menos* (β^-), y si emite un *positrón* se llama *beta más* (β^+); el núcleo original se transforma en otro.



- *Radiación γ (gamma)*: Son fotones usualmente de muy alta energía, emitidos por núcleos inestables u otros procesos. El núcleo no cambia su identidad sino que únicamente pierde energía.



- *Radiación neutrónica*: Es la emisión de neutrones en procesos nucleares.



- *Rayos X*: Son fotones de alta energía que se producen cuando los electrones atómicos cambian de órbita o cuando inciden electrones sobre un material y son frenados.

¿Qué son las radiaciones ionizantes?

Algunos de estos procesos, como la radiación beta, son en realidad un poco más complicados, al involucrar la emisión de otras partículas como los *neutrinos* y *antineutrinos*. Pero estas partículas no tienen carga eléctrica, poseen muy poca masa e interaccionan muy débilmente con la materia, de forma que son irrelevantes en cuanto a los efectos que pueden producir; por eso no haremos más comentarios acerca de ellas.

El positrón es la anti-partícula del electrón. Solo difieren en que su carga eléctrica es positiva. Al chocar, ambos desaparecen produciendo dos fotones de alta energía.

Vale la pena aclarar que, además de las radiaciones ionizantes, existen las llamadas *radiaciones no ionizantes*, constituidas por ejemplo por la radiación infrarroja, gran parte del rango ultravioleta (UV), la luz visible, las ondas de radio, las microondas, la radiación empleada en las resonancias magnéticas, etc. Todas estas formas de radiación no tienen suficiente energía como para ser ionizantes y en la mayoría de ellas no se ha demostrado que tengan efectos negativos sobre la salud. Este tipo de radiación está presente en nuestra vida diaria, ya que utilizamos hornos de microondas, teléfonos celulares, radios, GPS y controles remotos, entre otros. En este libro nos ocuparemos principalmente de las *radiaciones ionizantes* y nos referiremos a ellas simplemente como *radiaciones*.

Una propiedad muy importante y que caracteriza a cada tipo de radiación ionizante es su capacidad de penetración en los materiales. Esta propiedad es la que determina el riesgo que implica su uso y sus potenciales aplicaciones.

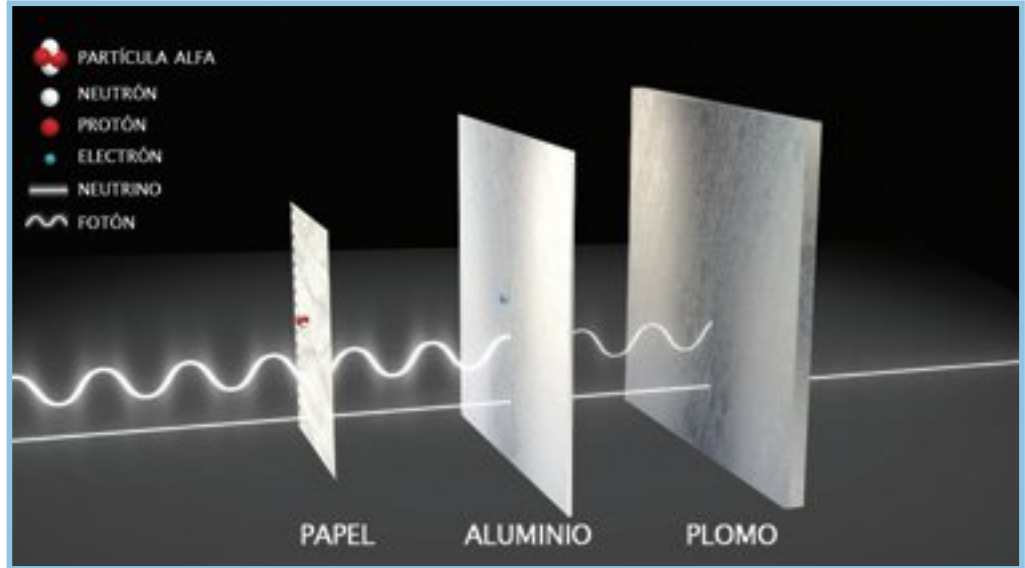
La radiación neutrónica es muy penetrante por no tener carga eléctrica. En la materia pierde su energía produciendo rayos gamma y beta.

¿Qué son las radiaciones ionizantes?

La radiación alfa es detenida en el aire al recorrer 1 o 2 centímetros, o por una hoja de papel.

La radiación beta es absorbida completamente por una lámina de vidrio, madera o metal.

La radiación gamma es muy penetrante y únicamente un espesor importante de plomo u hormigón la detiene.



¿Qué ocurre en la naturaleza?

Como ya hemos mencionado, nuestra especie ha evolucionado en un ambiente naturalmente radioactivo.

Nuestro planeta está siendo bombardeado constantemente por partículas provenientes del espacio que reciben el nombre de *rayos cósmicos* y que consisten principalmente en protones, núcleos pesados, partículas alfa y beta y radiación gamma. La atmósfera actúa como un filtro y disminuye la cantidad de esta radiación que llega a la tierra, pero no su totalidad.

Además, la tierra y los elementos que se encuentran en la naturaleza emiten radiación, ya que parte de sus constituyentes son elementos radioactivos, como por ejemplo potasio 40, rubidio 87, uranio 238, torio 232 y radón 222. La cantidad de radiación proveniente de estas fuentes naturales varía sustancialmente según el lugar geográfico.

Gran parte de la radiación que recibimos surge de los pisos y paredes de los recintos que habitamos, ya que los materiales utilizados para la construcción se obtienen a partir de elementos naturales que contienen radionucleidos.

Por otra parte, los alimentos que ingerimos, el agua que bebemos y el aire que respiramos también tienen en su composición una pequeña porción de elementos radioactivos.

Y no olvidemos que nuestro propio organismo contiene potasio, parte del cual es también radioactivo.

Pensemos ahora, por ejemplo, en aquellas personas que son viajeros frecuentes o personal aéreo. Ellas están expuestas a una cantidad extra de radiación cósmica en comparación con

Niveles de radiación cósmica comparados con la radiación cósmica a nivel del mar



¿Qué ocurre en la naturaleza?

Los pilotos y azafatas de aerolíneas son algunos de los trabajadores más expuestos a la radiación.

quienes acostumbran a estar con los pies en la tierra, ya que el filtro y la protección que brinda la atmósfera es menor a grandes alturas.

Fuentes naturales	Porcentaje de la radiación anual
Radiación cósmica	14%
Radiación terrestre	18%
Radiación interna	11%
Radón	43%
Total	86%



Cerca de la mitad de la radiación natural que recibimos se debe al radón, que es un elemento perteneciente al grupo de los gases nobles y por lo tanto muy inerte químicamente. Es inodoro, incoloro e insípido en su forma gaseosa. El isótopo más estable y abundante en la naturaleza es el radón 222, un radioisótopo cuya vida media es de 3,8 días. Decae emitiendo partículas alfa y sus productos de decaimiento son también radioactivos. Estos productos de decaimiento depositados en la tierra, las rocas y el agua producen una dosis de radiación por inhalación de las partículas de polvo a las que se adhieren.

¿Qué ocurre en la naturaleza?

Entonces todos los seres humanos estamos expuestos a radiación tanto externa como interna a nuestro cuerpo, y nuestra especie ha evolucionado en presencia de la radiación y probablemente también gracias a ella.

La alta contribución del radón a la radiación natural fue descubierta en la década del 70.

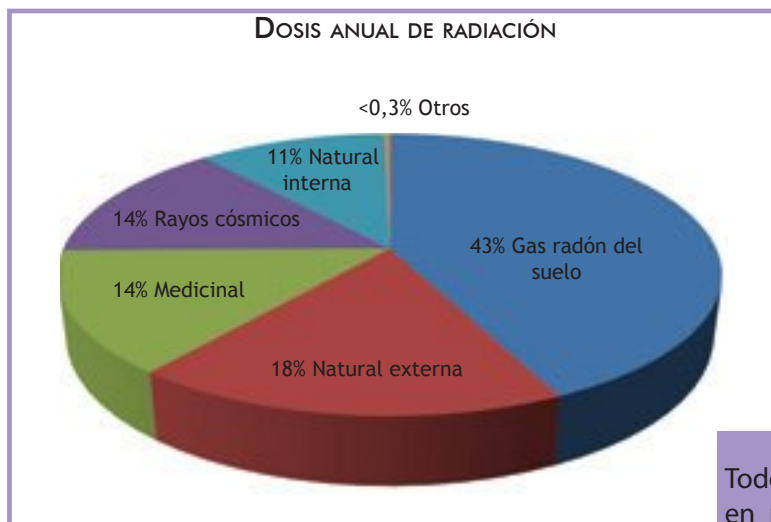
¿Qué es la radiación artificial?

La radiación artificial es aquella producida por el hombre en diversas actividades: medicina, industria, minería, pruebas de armas nucleares, generación de energía y accidentes nucleares, entre otras.

Es importante destacar que los usos relacionados con la medicina, ampliamente beneficiosos, son los que constituyen casi la totalidad de la radiación artificial.

El siguiente diagrama contiene los valores en porcentajes de la radiación natural y la artificial.

Fuentes artificiales	Porcentaje de la radiación anual
Médicas	14%
Ensayos nucleares	0,2%
Chernobyl	0,07%
Centrales nucleares	0,01%
Total	~14%



Todos estamos expuestos, en promedio, a una dosis anual de radiación compuesta por un 86% de radiación natural y un 14% de radiación artificial.

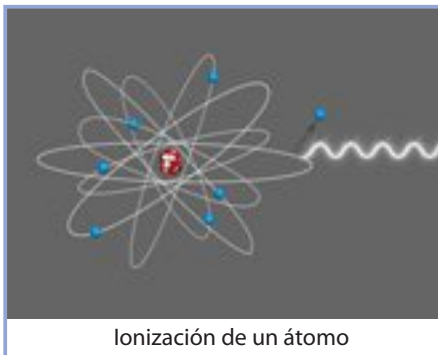
¿Qué sucede cuando la radiación y la materia se encuentran?

Actualmente se posee una enorme cantidad de conocimiento acerca de las radiaciones, los procesos nucleares y sus aplicaciones. Esto ha sido posible principalmente gracias a la investigación en física nuclear y de partículas durante el siglo XX. Los descubrimientos más importantes están asociados a los nombres de físicos, algunos de los cuales han recibido el Premio Nobel. Aún hoy los avances en estos temas y sus aplicaciones, por ejemplo en medicina, están íntimamente relacionados con la investigación en las áreas mencionadas.

La interacción entre la radiación y la materia, y en particular la forma en que la radiación transmite su energía a la materia cuando la atraviesa, es un proceso extremadamente complejo. Aun así es posible dar una explicación cualitativa que contiene los elementos más importantes de esta interacción.

Las radiaciones ionizantes poseen alta energía y, al encontrar en su camino los átomos y moléculas de la materia, son capaces de romper los enlaces entre átomos, entre moléculas e incluso liberar electrones de los mismos (*ionización*). Los electrones liberados a su vez podrán repetir este proceso si tienen suficiente energía.

La *ionización* y la *excitación* son procesos que pueden ocurrir cuando la radiación y la materia se encuentran.



La radiación también puede transferir parte de su energía a los átomos o moléculas, dejándolos en un estado con más energía. A este proceso se lo llama *excitación*. Luego podrán desexcitarse volviendo a emitir radiación.

Pero no toda la radiación que incide en la materia necesariamente tiene que ionizarla o excitarla, sino que parte de ella puede atravesar el material sin haber sufrido ninguna interacción.

Los procesos por los cuales la radiación deposita su energía en la materia son la base para

¿Qué sucede cuando la radiación y la materia se encuentran?

el diseño de dispositivos que permiten detectarla. Son estos mismos procesos los que permiten explicar los efectos que la radiación produce sobre los seres vivos.



Detector Geiger

¿Cómo se mide la radiación?

Es imposible detectar la radiación con nuestros ojos, pero eso no significa que no sea posible medirla y cuantificar sus efectos. Para ello definiremos algunas magnitudes y unidades.

Se llama *dosis absorbida* a la cantidad de energía que deposita la radiación por cantidad de masa radiada.

La dosis absorbida se mide en una unidad llamada *gray* (Gy).

De acuerdo al tipo de radiación y según cuál sea el órgano o tejido que la ha absorbido —ya que la sensibilidad a la radiación es diferente—, los efectos biológicos serán distintos. La magnitud que tiene en cuenta estos factores es la *dosis efectiva*, cuya unidad es el *sievert* (Sv).¹ De aquí en adelante nos referiremos a la dosis efectiva simplemente como *dosis*.

La dosis efectiva se mide en una unidad llamada *sievert* (Sv).

Por ejemplo, la dosis total promedio recibida anualmente por la población es un valor cercano a 0,0028 Sv, de los cuales 0,0024 Sv corresponden a radiación de origen natural y 0,0004 Sv a radiación de origen artificial. Estos valores, que no tienen efectos importantes sobre la salud, nos dan una idea cualitativa de la dosis de radiación que no implica riesgos. Para valores más altos, los posibles efectos solo pueden confirmarse en estudios sobre la población. Sin embargo, estos estudios no pueden llevarse a cabo porque no es admisible irradiar a una población con fines de investigación.

Los datos disponibles, a partir de los cuales se han establecido los valores aceptables y se han cuantificado los efectos de la radiación, son principalmente los que provienen de los pocos casos en que grandes poblaciones han sido irradiadas. Los estudios en los sobrevivientes de las bombas nucleares de Hiroshima y Nagasaki proveen los principales

La dosis de radiación promedio recibida por la población en un año es de 0,0028 Sv. A esta cantidad se la llama *dosis anual*.

¹Hemos elegido utilizar esta unidad, aun sacrificando parcialmente el rigor de la exposición, para evitar una proliferación de unidades que oscurecerían la comprensión del texto.

¿Cómo se mide la radiación?

datos. En mucho menor medida, el accidente de Chernobyl y otros han permitido obtener datos estadísticos acerca de los efectos de la radiación sobre la salud.

La siguiente tabla muestra que en los estudios más frecuentes la dosis de radiación es muy pequeña si la comparamos con la dosis anual.

**Dosis máximas de diferentes estudios
y comparación con la dosis anual de radiación**

Estudio	Dosis en Sv	Porcentaje de la dosis anual
Placa dental	0,0001	4%
Placa de tórax	0,0001	4%
Mamografía	0,001	36%
Tomografía de cabeza	0,005	180%
Tomografía de tórax	0,01	360%
Cateterismo cardíaco	0,05	1800%

Como hemos mencionado, la ionización es fundamental para el diseño de dispositivos de detección de la radiación. El primer detector fabricado fue el *contador Geiger*, en 1908, que estaba diseñado para detectar únicamente radiación alfa. En la actualidad el contador Geiger puede detectar también los restantes tipos de radiación.

Sin duda este dispositivo es el más conocido y puede medir la presencia y la actividad de

¿Cómo se mide la radiación?

la radiación en personas, objetos y lugares. Recibió el nombre de *contador* porque justamente lo que hace es contar la cantidad de partículas que llegan a él.

Existen otros aparatos que permiten medir la radioactividad en diversas situaciones y con gran precisión, como por ejemplo las cámaras de ionización, cuya tecnología ha evolucionado rápidamente en las últimas décadas.



Dosímetro personal

La dosis que reciben las personas que trabajan con radiaciones ionizantes se determinan mediante el uso permanente de un detector llamado *dosímetro personal*. Es un dispositivo muy compacto, que puede dar una lectura en tiempo real o ser medidos al cabo de un tiempo mediante un dispositivo especial.

Finalmente, existen detectores de partículas para la investigación que tienen una enorme sensibilidad y complejidad, como los que se usan en la física de altas energías.



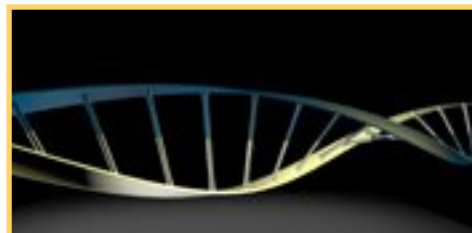
Detector Atlas del experimento
LHC, CERN

Radiaciones ionizantes y salud

Cuando la radiación interacciona con el tejido vivo lo hace modificando el material celular. Como la radiación posee energía y esta puede ser transmitida a la célula, ya sea ionizando a sus átomos o moléculas o produciendo, por ejemplo, un aumento en la temperatura del material celular, modifica su condición natural.

Las células están constituidas en un 80% por moléculas de agua. Ante el paso de la radiación estas moléculas son susceptibles de disociarse y generar los llamados *radicales libres*, que son compuestos químicos muy reactivos capaces de alterar de manera irreversible las restantes moléculas, lo que tiene importantes efectos relacionados con la salud.

La más importante de estas moléculas es el ADN, que se encuentra en cada célula y es la que contiene toda la información que le permite funcionar, crecer y reproducirse. Esta molécula también podría ser dañada directamente por la radiación, por ejemplo por ionización. Cuando el ADN ha sido modificado y la célula no lo repara o lo repara incorrectamente, se pueden producir daños irreversibles.



Molécula de ADN

Estos daños pueden interferir en los procesos celulares, impedir su reproducción o provocar una división celular sin control que podría derivar en las enfermedades que llamamos *cáncer*. También pueden generarse defectos genéticos que se transmitan a las futuras generaciones. Además, si un número importante de células son afectadas o aniquiladas en un órgano en particular, este puede dejar de funcionar normalmente, o seguir cumpliendo sus funciones si esas células no son cruciales para el órgano al que pertenecen.

Una dosis de 3 Sv provoca la muerte a corto plazo en el 50% de los casos. Se denomina a este valor *LD50* (dosis letal al 50%).

En cualquier caso el efecto producido por la exposición a la radiación dependerá de varios factores: de la dosis recibida, de si fue recibida en etapas o en una sola vez, del tiempo de exposición a la radiación, de si fue aplicada en todo el cuerpo o en una parte de él, de si fue aplicada interna o externamente. También los efectos dependerán de la etapa del crecimiento en que fue recibida, ya que son diferentes en la etapa embrionaria, la etapa fetal, la infancia y la adultez. Son importantes además los factores genéticos de cada persona.

La clasificación más utilizada divide los efectos en dos clases: los *determinísticos* y los *estocásticos*. Los efectos determinísticos son aquellos que se producirán siempre que la dosis recibida por el órgano en cuestión supere cierto valor mínimo. Casi siempre se presentan rápidamente luego de la exposición, por lo general no son fatales y la severidad aumenta según la dosis recibida.

Los efectos estocásticos son de tipo probabilístico o al azar. La probabilidad de su aparición —no su gravedad— depende de la dosis recibida, y no requieren una dosis mínima. Son efectos vinculados a la acumulación de dosis a lo largo del tiempo y tal vez puedan pasar décadas sin detectarse, o incluso no ser detectados en la propia persona sino en sus descendientes.

Una dosis de 2 Sv puede provocar a corto plazo hemorragias, deshidratación, cansancio intenso, náuseas y diarreas, seguidos de pérdida de cabello, síntomas denominados *envenenamiento por radiación* o *enfermedad por radiación*.

Las cataratas, el enrojecimiento de la piel y la esterilidad son ejemplos de efectos determinísticos.

El cáncer es el ejemplo más conocido de efecto estocástico.

Radiación y cáncer

El cáncer es la segunda causa de muerte en el mundo. Aproximadamente el 13% de los decesos son debidos a esta enfermedad.

El cáncer es una de las enfermedades más temidas por la población en general. Aproximadamente el 40% de la población desarrolla algún cáncer a lo largo de su vida. No se sabe con certeza si ello se debe a factores del medio ambiente, alimentación u otros.

Desde hace algunos años el avance en las técnicas para combatir el cáncer ha cambiado la forma de considerarlo: pasó de ser una enfermedad incurable a una enfermedad que en el 50% de los casos es curable y en otro gran porcentaje es más bien una dolencia crónica.

Esta enfermedad está relacionada con una reproducción celular descontrolada, a pesar de que existen varios mecanismos biológicos destinados a impedir que esto ocurra. Si se producen suficientes mutaciones en el ADN de forma que estos mecanismos sean anulados, entonces la multiplicación celular puede descontrolarse y dar lugar a la formación de cáncer. Este crecimiento sin límite puede llegar a comprometer diversos órganos, interferir con funciones vitales y eventualmente provocar la muerte.



¿Pueden las radiaciones ionizantes causarlo? Hasta el momento no se ha determinado claramente qué lo origina, pero sí se ha demostrado que varios factores contribuyen al riesgo de desarrollarlo. Estos factores de riesgo, que aumentan la probabilidad de contraer cáncer por encima de ese 45% de la población que mencionamos, son la exposición a varios agentes ambientales, así como el consumo de tabaco y el consumo de alcohol, entre otros, y también las radiaciones ionizantes, particularmente en altas dosis.

El desarrollo de la enfermedad es complejo y se cree que la exposición a la radiación tiene un papel importante en las etapas tempranas. El cáncer puede desencadenarse inmediatamente o bien tardar varios años en desarrollarse, debido a que en general son necesarias varias mutaciones para que la célula pierda el control de su reproducción.

Ya que no es posible, salvo en casos específicos, discriminar un cáncer producido por la exposición a las radiaciones ionizantes de aquellos que ocurren normalmente, se recurre a la estadística para estimar el riesgo de contraer la enfermedad como consecuencia de la exposición a la radiación. Por ejemplo, en una población que haya sido irradiada, como la de Hiroshima, Nagasaki o Chernobyl, se puede cuantificar la cantidad de casos de cáncer y compararlos con una población que no estuvo expuesta a la radiación, y así se determina el factor de riesgo de contraer la enfermedad por la exposición a fuentes radioactivas.

Los principales tratamientos para curar la enfermedad están basados en el poder destructor que tienen las radiaciones ionizantes a nivel celular, y ese mismo poder es utilizado para destruir las células cancerígenas. Ocurre además que estas células son más sensibles a las radiaciones ionizantes debido a que todas sus funciones están dedicadas a la reproducción y no a intentar reparar los daños genéticos que se puedan producir, como lo haría una célula sana. Si el tratamiento radiante es efectivo, estas células mueren y el cáncer no progresa.

El temor a la radioactividad está asociado probablemente a su carácter invisible y al hecho de que el cáncer, que puede eventualmente ser producido por mutaciones también invisibles, no muestre ningún signo hasta que la enfermedad está declarada. Además de provocar distintos trastornos de salud, algunos a corto plazo y otros a más largo

Debido al consumo de tabaco y la consiguiente introducción de diversas sustancias agresivas para los pulmones, los fumadores que reciben radiaciones tienen un incremento adicional del riesgo de contraer cáncer.

Las radiaciones ionizantes tienen una singular relación con el cáncer, ya que, si bien son causa de riesgo adicional, a la vez constituyen una de las herramientas más eficientes para combatirlo.

Riesgo de cáncer por radiación

Fuente de radiación	Probabilidad de contraer cáncer
Rayos X de tórax o dental	1 en 60.000
Habitantes cercanos a central nuclear	
Rayos X de abdomen o columna	1 en 6.000
Mamografía	
Tomografía de cráneo	1 en 1.200
Dosis anual	
Diagnóstico en medicina nuclear	
Tomografía de tórax o abdomen	1 en 600
Cateterismo cardíaco	1 en 120

plazo, dosis altas de radiación también pueden inducir cáncer con alta probabilidad.

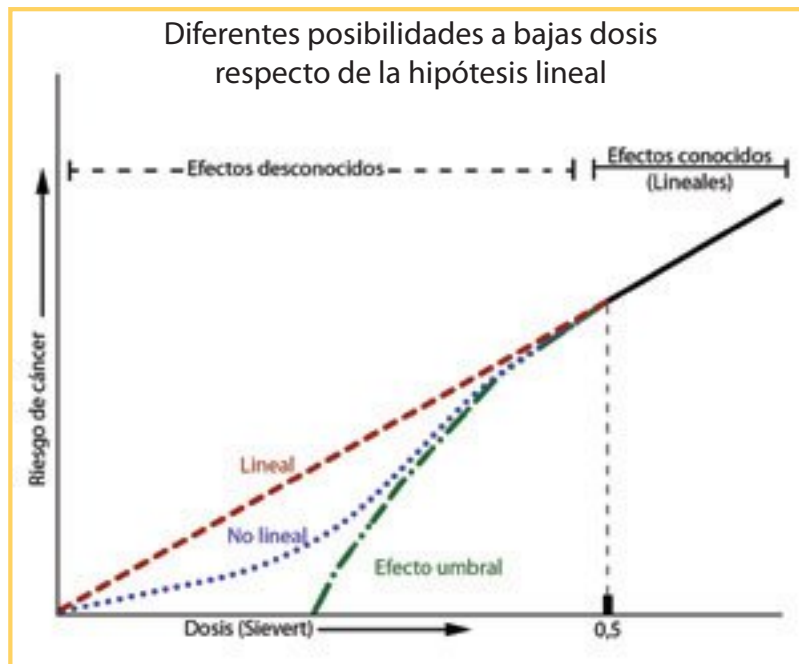
Podemos considerar altas las dosis del orden de algunos sievert, que implican cientos de veces la dosis anual a la que estamos corrientemente sometidos. Dosis menores que 1 Sv no suelen provocar síntomas y en general no son advertidas, aunque pueden eventualmente aumentar el riesgo de contraer cáncer y fallecer por ese motivo en un plazo de años.

Por ejemplo, una dosis de 0,25 Sv provoca un 1% de probabilidad de exceso de muerte por cáncer. Esto significa que, en una población de 100 personas en la que cada una de ellas reciba una dosis de 0,25 sievert, una de ellas fallecerá por cáncer debido a la radiación, además de las otras 13 que constituyen la frecuencia usual de fallecimiento por cáncer. Esta proporcionalidad entre dosis y exceso de muerte por cáncer se mantiene en un rango amplio de dosis y constituye la llamada *hipótesis lineal*.

La hipótesis lineal se usa para establecer los límites seguros de dosis para todas las personas

eventualmente expuestas a la radiación, sean trabajadores, pacientes o ciudadanos que reciban pasivamente alguna dosis. No se sabe si esta hipótesis es cierta a dosis muy bajas. Podría ocurrir que para ellas el efecto lineal no sea cierto y que el exceso de muerte por cáncer sea mucho menor. Hoy en día se aplica el conocimiento que poseemos, a pesar de ser insuficiente, siendo cuidadosos y conservadores para proteger la salud de la población.

La hipótesis lineal y los datos disponibles implican que la radiación natural no es responsable de los altos porcentajes de cáncer que afectan a la población.



Radiación y embarazo



No produce los mismos efectos recibir cierta dosis de radiación en el período fetal que en la adultez, debido a que en el primero las células se reproducen rápidamente y son mucho más sensibles. El período de mayor compromiso es el que abarca desde la octava hasta la decimoquinta semana de gestación. Los posibles efectos de la exposición a la radiación en el período fetal son la reducción del diámetro craneal y el retardo mental, entre otros, y el más grave es la muerte fetal.

Además, existen enfermedades de carácter hereditario que pueden afectar a un embrión o feto y que podrían surgir de la exposición a la radiación de las células germinales, tanto de hombres como de mujeres. Dichas células pueden presentar mutaciones en su ADN capaces de desencadenar efectos

indeseados en los descendientes por varias generaciones. Este es un tema de investigación en la actualidad.

¿Es cierto que una persona embarazada debe evitar siempre exponerse a los rayos X?

Es bueno aclarar que la cantidad de radiación necesaria para desencadenar alguno de los efectos mencionados está muy por encima de las dosis que se reciben en estudios diagnósticos típicos que involucran rayos X. Es en estudios específicos de zonas próximas al abdomen, en tratamientos con altas dosis como algunos de radioterapia o braquiterapia, o en ciertos tratamientos con medicina nuclear, donde se debe evaluar cuál es el riesgo y el beneficio de llevar adelante el procedimiento, o si es posible realizarlo después de culminado el embarazo sin que eso implique severas consecuencias para la madre.

Dosis muy altas recibidas en la gestación provocan que la probabilidad de fallecimiento por cáncer desde el nacimiento y hasta los 15 años de edad sea de 1 en 30 por cada sievert recibido.

En general se acepta que las dosis que se administran en procedimientos usuales de diagnóstico con rayos X (placas de pecho y abdomen, tomografía de pulmón, etc.) exponen al feto a una dosis menor, que no implica un aumento significativo del riesgo de malformaciones y aborto. Otros tratamientos más específicos y de dosis más altas pueden tener efectos en el embarazo. La dosis a partir de la cual se acepta que comienza a aumentar el riesgo por encima de los valores usuales es de 0,1 a 0,2 Sv.

En los casos de exposición a la radiación que representen un riesgo potencial para el feto, es importante que se lleve un control estricto y documentado de las dosis recibidas y las técnicas utilizadas, a fin de calcular la dosis fetal si fuese necesario.

Además es importante que aquellas trabajadoras expuestas a las radiaciones ionizantes notifiquen al responsable de radioprotección si están embarazadas, para que se tomen las precauciones pertinentes y puedan continuar en su labor sin ningún riesgo para su bebé.

Por otra parte, corresponde tener en cuenta que los embarazos tienen, en forma independiente de las radiaciones, ciertos porcentajes de malformaciones graves (2%) y pérdida espontánea (15%) que implican riesgo de salud para las gestantes.

Una embarazada debe siempre comunicar su estado al someterse a técnicas de diagnóstico o terapias con radiación, o hacerlo posteriormente si en ese momento no era consciente de su estado de gestación.

En algunos casos es recomendable que las mujeres tratadas con radioterapia eviten un embarazo durante varios meses después del tratamiento.

Las trabajadoras expuestas a las radiaciones ionizantes no deben recibir en la superficie del abdomen una dosis mayor de 0,002 Sv desde el momento en que toman conciencia del embarazo hasta el final de la gestación.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

Casi inmediatamente a su descubrimiento se extendió muchísimo el uso de las radiaciones en diversas áreas. Dentro del campo industrial, la medicina, la investigación y la generación de energía las aplicaciones son muy variadas y numerosas debido a las ventajas que presentan.

En muchos casos no hay técnicas alternativas que permitan obtener los beneficios potenciales de las radiaciones.

Medicina

En medicina el uso de las radiaciones es muy diverso, extendido y particularmente beneficioso. Sus aplicaciones van desde la esterilización de material quirúrgico hasta el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades.

En 1896, un año después del descubrimiento de los rayos X, se realizó el primer tratamiento de cáncer con radiación.

Hoy en día existen diferentes técnicas de diagnóstico con radiaciones en función del tipo de enfermedad buscada. Su principal ventaja es la observación no invasiva del interior del organismo. Las técnicas más utilizadas son la radiografía convencional —comúnmente llamada rayos X—, la fluoroscopia, la tomografía computada (TC), la mamografía, el centellograma y la tomografía por emisión de positrones (PET).

Para el tratamiento del cáncer las técnicas más utilizadas son la radioterapia, la braquiterapia y la medicina nuclear. También existe la radioterapia con iones pesados, pero su costo es muy alto y está en una etapa de investigación y desarrollo en algunos países del primer mundo.

Por otra parte se emplea material radioactivo en ciertos tipos de análisis clínicos; por ejemplo, para determinar el contenido de hormonas, vitaminas, drogas, enzimas y antígenos de cáncer en la sangre.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

El uso en medicina implica al menos dos esferas de actuación profesional de principal importancia. Por un lado la parte médica, que diagnostica e indica el tipo de estudio o tratamiento, y por otro los especialistas, quienes permiten optimizar el uso y los procedimientos relacionados con los equipamientos actuales, que en las últimas décadas han avanzado enormemente en complejidad y posibilidades. Este profesional, llamado *físico médico*, ha hecho estudios avanzados en física y sus aplicaciones a la medicina, y es una nueva figura en los hospitales, que garantiza la calidad técnica, la efectividad y la seguridad al tiempo que reduce la probabilidad de accidentes.

La presencia de estos profesionales permite incorporar a las instituciones de salud las técnicas más modernas que día a día se desarrollan en esta área de rápida evolución.

Diagnóstico: mirando hacia el interior del organismo



Primera radiografía.
Mano de la esposa
de Roentgen (1895)

En una gran variedad de situaciones relacionadas con la salud es conveniente utilizar los rayos X. En otras, menos frecuentes, se recurre a los rayos gamma. La elección de la energía de estos rayos depende del órgano o tejido que se desee estudiar. Por ejemplo, una fractura de hueso y una anomalía en el tejido mamario son claramente situaciones diferentes. En la primera se necesita radiación que puede penetrar profundamente y atravesar los huesos, mientras que en la segunda se busca detectar anomalías en un tejido blando.

Además, la elección de la técnica depende del fin buscado: obtener una imagen anatómica u observar el funcionamiento de un órgano.

Radiografía convencional

Popularmente conocida como rayos X, es una técnica que permite ver la anatomía de órganos y tejidos.



Radiografía de tórax

El equipo consta principalmente de un tubo que emite rayos X y un detector, que puede ser una película radiográfica (placa) o dispositivos de detección digital. Es capaz de emitir rayos X durante períodos sumamente pequeños, y alcanza con una o dos placas para finalizar el procedimiento.

Los rayos X para radiografía no se obtienen de materiales radioactivos, sino acelerando electrones que luego chocarán contra un blanco metálico. Los fotones son emitidos por los electrones al ser frenados o por procesos que tienen lugar en los átomos del metal.

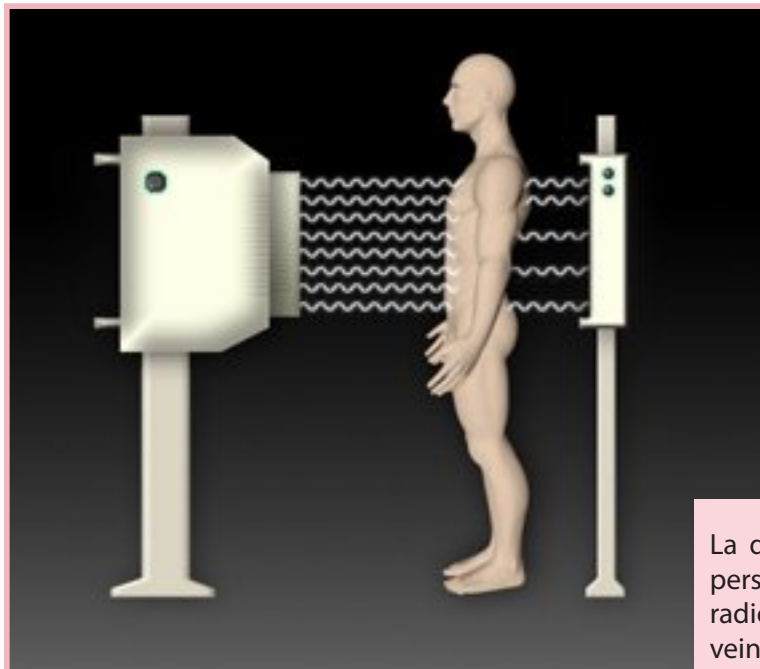


Equipo de rayos X

La imagen se forma porque cada órgano del cuerpo atenúa en mayor o menor proporción el haz de rayos X, según su densidad. Aquellos rayos que logren atravesar el organismo impactarán en el detector formando una imagen, que luego será revelada o procesada por una computadora.

La radiografía se emplea, por ejemplo, para observar fracturas en huesos, anomalías pulmonares, estructura dental, etcétera.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?



La dosis que recibe una persona durante una radiografía de tórax es veinte veces menor que la dosis anual.

Fluoroscopia

Esta técnica es indicada para estudiar el funcionamiento de algunos órganos y vasos sanguíneos, en procedimientos médicos como cateterismos y en algunas cirugías.

El equipo es muy similar a un equipo de rayos X convencional, pero tiene dos grandes diferencias: el tubo de rayos X emite en forma continua y tiene un tubo intensificador de imagen. Esto permite realizar una filmación con rayos X, que es vista en un monitor.

Generalmente se le inyecta al paciente una sustancia química llamada *medio de contraste*,

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

En una fluoroscopia las dosis recibidas son del orden de la dosis anual.

cuya densidad es bien diferente a la densidad del tejido humano, para distinguir el tejido a estudiar del resto.

El procedimiento puede durar minutos y suministra una dosis de radiación muy superior a una radiografía.

Mamografía

En Uruguay una de cada cinco mujeres fallece por cáncer de mama. Esto equivale a dos mujeres por día.

La mamografía es un estudio que se realiza principalmente a mujeres para la detección precoz del cáncer de mama. Este es el cáncer más frecuente en las mujeres y Uruguay tiene uno de los índices mundiales más altos de mortalidad por esta causa.

El mamógrafo es un equipo convencional de rayos X, pero muy compacto y diseñado para este tipo de estudios. Consta de un tubo de rayos X, un dispositivo para aplanar e inmovilizar la mama y un sistema de detección digital o con película radiográfica.

Una de cada ocho mujeres en el mundo ha tenido al menos un episodio de cáncer de mama en su vida.

Existen dos modalidades de estudio: de *screening* y de *diagnóstico*. La primera se aplica a mujeres que no presentan al tacto ninguna anomalía y consiste en dos radiografías de cada mama. La segunda está indicada en mujeres que presentan anomalías al tacto o a las que en la mamografía de *screening* se les detectó alguna anomalía. En este caso se pueden tomar más radiografías y deberá realizarse un seguimiento.

La dosis típica de una mamografía es del orden de $\frac{1}{3}$ de la dosis anual.

Dado que en estos estudios se busca detectar pequeñas formaciones

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?



Equipo para mamografía

que indiquen la posible presencia de la enfermedad, el equipo debe ser cuidadosamente calibrado, así como todas las etapas hasta la formación de la imagen deben ser optimizadas para que el estudio sea efectivo.

En Uruguay se recomienda a las mujeres mayores de 40 años realizarse una mamografía anual. De existir antecedentes familiares de cáncer de mama se debe consultar al médico desde la adolescencia.

Tomografía computada (TC)

Es una técnica bastante más sofisticada que las anteriores ya que permite obtener imágenes del organismo en tres dimensiones. Por su invención, Sir Godfrey Newbold Hounsfield y Allan McLeod Cormack recibieron el Premio Nobel en 1979.

El equipo consta de un tubo de rayos X y un arreglo de detectores, ambos ubicados sobre un anillo rotatorio, y una camilla móvil. Una vez colocado el paciente en la camilla, esta se irá desplazando y el tubo de rayos emitirá en forma continua, mientras el anillo rotatorio girará en torno al paciente. De esta forma se obtiene una gran cantidad de imágenes provenientes de rayos X que permiten reconstruir el interior del cuerpo del paciente.

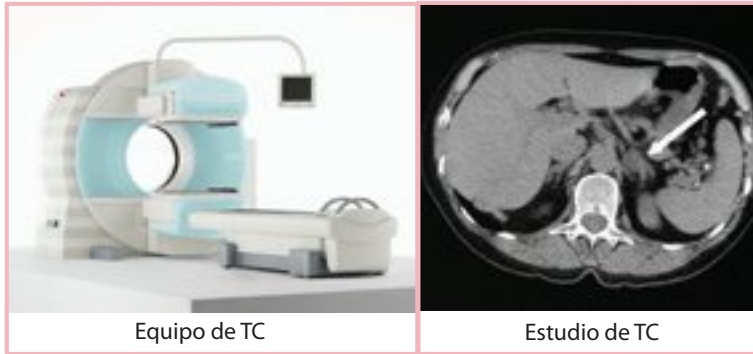
Este equipo es enteramente digital y contiene una potente computadora capaz de procesar gran cantidad de datos para formar la imagen. Incluso el monitor utilizado se diferencia bastante de un monitor doméstico.

La dosis recibida en un estudio típico de tomografía es aproximadamente cinco veces la dosis anual.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

También en este caso puede ser necesario suministrar al paciente un medio de contraste, a fin de visualizar mejor los órganos.

Típicamente el estudio puede durar hasta media hora.



Centellograma

El centellograma es similar a la fluoroscopia, ya que permite observar el funcionamiento de un órgano en tiempo real, pero la gran diferencia es que no utiliza para ello rayos X. El estudio consiste en introducir en el paciente —sea por vía intravenosa, ingestión o inhalación— un compuesto químico llamado *radiofármaco*.

Un *radiofármaco* es un compuesto químico que se introduce en el organismo con fines terapéuticos o de diagnóstico y que en su composición contiene elementos radioactivos.

Para el centellograma este compuesto es un emisor de radiación gamma. Contiene además moléculas específicas que hacen que sea absorbido por el órgano a estudiar. Los elementos radioactivos que se emplean son de corta vida media, por lo que desaparecen del organismo al cabo de horas o días.

Los rayos gamma, que como ya mencionamos son capaces de penetrar

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

el tejido, escaparán del cuerpo y serán detectados por un dispositivo que se ubica sobre el paciente. La señal será recibida por una computadora que procesará los datos y formará la imagen.



Gamma cámara

Estudio de centellograma

PET (tomografía por emisión de positrones)

La técnica PET también se basa en la obtención de una imagen a partir de inyectar en el paciente un radiofármaco, pero en este caso el elemento radioactivo será un emisor de positrones provenientes de decaimientos β^+ . Dichas partículas podrán viajar muy cortas distancias dentro del organismo, ya que al encontrarse con un electrón ambos se aniquilan y se emiten dos fotones que salen a 180° uno del otro, en un proceso llamado *aniquilación de pares*.

A esta técnica se recurre principalmente para detectar y determinar el estado de cánceres, y también en estudios neurológicos para, por ejemplo, detectar la enfermedad de Alzheimer.

En el caso de la detección del cáncer, el radiofármaco contiene una molécula rica en glucosa, compuesto químico que se sabe es consumido más ávidamente por las células cancerígenas. Estas

En general la técnica PET va acoplada a una tomografía computada para obtener una visión completa: funcional, proveniente de la PET y anatómica, proveniente de la TC.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

El radiofármaco más utilizado en PET se llama FDG (18 fluorodesoxiglucosa).

moléculas, por lo tanto, se concentrarán en las zonas del cuerpo que presenten estas anomalías y darán una imagen relacionada con las funciones biológicas que tienen lugar en el interior del cuerpo y no simplemente de la anatomía. ¿Cómo?

Recientemente esta técnica se ha incorporado a nuestro país en el Centro Uruguayo de Imagenología Molecular (CUDIM), para el cual se han invertido cerca de USD 20.000.000. Este centro está ubicado al lado del Hospital de Clínicas.

Un equipo PET consta de un arreglo de detectores ubicados en un anillo, de forma que los fotones provenientes de la aniquilación electrón-positrón impactarán a los detectores que se encuentran diametralmente opuestos. Dependiendo del tiempo que cada uno demoró en impactar a cada detector, es posible determinar de qué lugar del cuerpo provinieron y así reconstruir una imagen a partir de la detección de miles de estos pares de fotones.

Un centro de diagnóstico por PET cuenta generalmente con un ciclotrón cercano o bien en el mismo edificio, ya que los radiofármacos empleados son de corta vida media. El ciclotrón es un acelerador de partículas que permite obtener los núcleos emisores de positrones necesarios para la elaboración del radiofármaco.

Resonancia magnética nuclear

Vamos a hacer un paréntesis para comentar un estudio diagnóstico que utiliza radiaciones no ionizantes.

Se recurre a esta técnica principalmente para observar con alta definición el tejido blando del cuerpo. Se basa en que los distintos tejidos contienen diferente cantidad de moléculas de agua y por lo tanto de átomos de hidrógeno. Los núcleos de estos átomos son muy sensibles a la presencia de intensos campos magnéticos y además emiten ondas similares a las de radio si son expuestos a campos magnéticos que varíen con el tiempo.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

Y esto es lo que hace un equipo de resonancia magnética: genera grandes campos magnéticos que varían muy rápidamente, y registra las ondas de radio emitidas por los átomos de hidrógeno que componen los tejidos. A partir de esas ondas que son captadas por una antena, una computadora se encarga de procesar los datos para formar la imagen.



Ecografía

Un estudio ecográfico tampoco utiliza radiaciones ionizantes. Estos equipos contienen un dispositivo que envía ondas sonoras de muy alta frecuencia, inaudibles para nuestros oídos. Parte de estas ondas rebotan al encontrarse con un cambio de densidad, entonces ese rebote o eco es lo que se detecta y se usa para formar las imágenes.

Tratamiento

Medicina nuclear

El poder “destructor” de las radiaciones ionizantes a nivel celular es utilizado para combatir ciertas enfermedades. Para ello se le suministra al paciente un radiofármaco que contiene generalmente un emisor alfa o un emisor beta en conjunto con un emisor gamma. El emisor alfa o beta es el encargado de producir localmente la destrucción de las células en cuestión, mientras que el emisor gamma se utiliza para el monitoreo del tratamiento mediante un centellograma.

En medicina nuclear la dosis recibida en un tratamiento es mucho mayor que la recibida en diagnóstico.

Radioterapia

Es una de las técnicas más importantes utilizadas para el tratamiento del cáncer, junto con la cirugía y la quimioterapia.

La técnica se basa en depositar en la zona del tumor una dosis de radiación tal que logre destruir las células cancerosas y, al mismo tiempo, evitar que esa radiación dañe los tejidos sanos circundantes.

Las técnicas modernas han hecho evolucionar los tratamientos rápidamente. Cada pocos años es posible seleccionar con mayor precisión las zonas a tratar y mejorar la forma de suministrar la dosis. Como consecuencia directa mejoran los resultados, vistos como la probabilidad de cura y también como la posibilidad de continuar con una buena calidad de vida luego del tratamiento.

Como en toda exposición a la radiación, existe la posibilidad estadística de efectos a largo plazo, ya que la misma radiación que cura es la que puede inducir la enfermedad. Esto en general no ocurre, y además siempre se considera una relación riesgo/beneficio en la cual este último es claramente mayor.

Para concentrar el haz de radiación en la zona de interés y disminuir la irradiación del tejido sano se aplican diferentes técnicas simultáneamente. Por ejemplo: usar filtros apropiados, enfocar el haz de radiación desde varios ángulos convenientemente seleccionados, disponer de un tomógrafo acoplado al equipo para detectar eventuales cambios anatómicos sucedidos en el transcurso del tratamiento.

Las nuevas técnicas requieren el uso de tecnologías y de conocimientos muy avanzados por parte de radioterapeutas y físicos médicos, y en general los países subdesarrollados deben hacer un gran esfuerzo en la formación de sus profesionales para poner estas nuevas posibilidades al alcance de la población.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

Los tratamientos de radioterapia se realizan comúnmente con haces de radiación externa, ya sea con rayos X de alta energía, o electrones acelerados en equipos conocidos como aceleradores lineales, o con fuentes de radiación gamma como el cobalto 60.

Cuando se emplean haces de protones, neutrones o incluso haces de núcleos de carbono u oxígeno, el tratamiento recibe el nombre de *radioterapia con iones pesados*. Hace más de una década que se ha demostrado que este tipo de radioterapia es sumamente eficaz en el tratamiento de cánceres profundos.



Acelerador lineal

En algunos tipos de cánceres es posible introducir el emisor de radiación —en forma encapsulada— en la zona del tumor, de manera que libera la radiación en una zona cercana al lugar donde es colocado: a este método se lo conoce como *braquiterapia*.

Hasta hace unas décadas los equipos de radioterapia consistían principalmente en una fuente del radioisótopo cobalto 60, debidamente blindada, que proporciona rayos gamma provenientes de sus productos de decaimiento. El cobalto 60 tiene una vida media de 5,27 años, por lo cual al cabo de ese tiempo la fuente tiene la mitad de su actividad inicial.

Actualmente estas máquinas están siendo desplazadas por los aceleradores lineales, que pueden producir rayos X y electrones en un rango de energía muy amplio. Las unidades de cobalto, si bien son mucho más simples, no permiten las enormes posibilidades que ofrecen los aceleradores lineales para la eficacia en los tratamientos oncológicos.



Bomba de cobalto

Industria

Cada vez son más las industrias que han optado por utilizar las radiaciones ionizantes en alguna etapa dentro de sus procesos. A continuación daremos algunos ejemplos.

Industria metalúrgica

La capacidad de atravesar metales que posee la radiación gamma se aprovecha para obtener radiografías de estos a fin de detectar imperfecciones en piezas metálicas, principalmente en las soldaduras.

Además, la uniformidad del espesor de productos que se fabrican en láminas también puede medirse empleando radiación. El equipo consiste en una fuente emisora que se coloca por encima del material cuyo espesor se quiere controlar. Un detector situado por debajo indica la intensidad de la radiación que atraviesa el material, la cual decrece si aumenta el espesor de la lámina.

También se pueden realizar estudios de lubricación y desgaste de las partes móviles de maquinarias empleando un elemento radioactivo. Al desgastarse la pieza con el uso, parte del material radioactivo pasa al lubricante, donde es detectado. Mediante esta técnica se puede estudiar, por ejemplo, el desgaste de un pistón en un motor.

Medidas de nivel

Con radiación gamma se puede controlar el nivel del líquido contenido en un tanque o en un equipo. Cuando el líquido llega a la altura donde está colocada la fuente emisora, un detector notifica una fuerte disminución de la cantidad de radiación en el extremo opuesto del recipiente y frena el suministro.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

Este método también se utiliza para el llenado de botellas de gas y envasado de productos. Es especialmente útil cuando se quiere evitar el contacto con líquidos, sea porque están a elevadas temperaturas, en recipientes a presión, por ser corrosivos, etcétera.

Control de equipaje

Es común ver en los aeropuertos que el equipaje de mano pase a través de un equipo emisor de rayos X, el cual permite visualizar de forma rápida su contenido sin necesidad de abrirlo. Lo mismo ocurre con el equipaje que es despachado para la bodega del avión. En cambio, el dispositivo por el que pasa la gente para controlar la presencia de metales no es emisor de radiaciones ionizantes.



Industria de resinas

Muchas reacciones químicas se producen en presencia de radiación. Un ejemplo es la reacción por la cual se endurece la resina poliéster con la que se impregnan maderas blandas para mejorar su resistencia al agua y a la abrasión.

También en la polimerización del polietileno se obtiene un producto de mayor resistencia mecánica a altas temperaturas cuando el proceso se realiza en presencia de radiación.

Medidas de humedad

Utilizando fuentes emisoras de neutrones es posible determinar la cantidad de humedad en suelos. Esta es una medición importante para la construcción de carreteras.

Hidrología

El movimiento de las corrientes de agua subterráneas se puede rastrear agregándoles un elemento radioactivo. Esto permite descubrir depósitos subterráneos de agua que pueden utilizarse en el riego.

Producción de materiales luminiscentes

Se basa en la propiedad de las partículas alfa y beta de producir fenómenos de luminiscencia en algunos materiales. Los productos así obtenidos son de utilidad para la señalización de aviones, barcos, trenes, etcétera.

Detectores de humo

Estos dispositivos contienen un detector de radiación y un emisor alfa o beta que da lugar a una corriente de ionización constante. La presencia de humo en el dispositivo provoca una disminución de dicha corriente, y al registrar esta disminución el dispositivo emite una señal.



Industria textil

Tanto la industria textil como la que fabrica películas plásticas emplea elementos radioactivos emisores de partículas alfa para neutralizar la electricidad estática que adquieren los materiales por rozamiento. De esta forma evitan riesgos de incendios originados por chispas producidas entre el material cargado eléctricamente y las partes metálicas de la maquinaria.

Industria de alimentos

La radiación ataca fuertemente a los microorganismos como bacterias y hongos. Esta es la razón principal de que su uso sea tan extendido en esta área. Permite además almacenar y conservar los alimentos por más tiempo.

Por ejemplo, en la papa y la cebolla los brotes se producen a expensas de los nutrientes que contienen, lo que causa una progresiva disminución del peso y la calidad hasta hacerlos inadecuados para el consumo. Sin embargo, irradiando los alimentos con radiación gamma es posible inhibir la formación de brotes durante el almacenamiento y así obtener un producto más duradero.



Logo de alimentos irradiados

En forma similar, varios países exigen que la miel que se importa haya sido irradiada para asegurar los niveles sanitarios que protegen de la propagación de diferentes plagas. Esta práctica tiene efectos positivos, ya que con menos bacterias disminuye la toxicidad del alimento.

Es importante señalar que los alimentos irradiados son completamente aptos para el consumo. No quedan contaminados con radiación ni se convierten en emisores de radiaciones.

Control de plagas

La irradiación externa constituye frecuentemente una alternativa frente a la fumigación con agentes químicos, ya que presenta la ventaja de su nula toxicidad.

La irradiación de granos como el trigo y el arroz u otros alimentos con radiación gamma permite eliminar insectos, como por ejemplo los gorgojos.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

Esterilización de insumos médicos

La radiación gamma es utilizada para esterilizar gasas, jeringas y otros insumos médicos generalmente descartables.

Otros

Datación fósil

Todos los seres vivos, ya sean animales o vegetales, contienen carbono. Un porcentaje muy pequeño de ese carbono es radioactivo, el carbono 14.



Pirámide de Menkaure (Egipto): rastros de madera permiten la datación con carbono 14

El carbono 14 se genera continuamente en la atmósfera y se transforma luego en dióxido de carbono radioactivo, que es asimilado por los vegetales mediante la fotosíntesis. Al alimentarse, los animales herbívoros incorporan carbono 14 proveniente de las plantas. A lo largo de su vida la cantidad de carbono 14 se mantiene constante, ya que el organismo se encarga de que así sea. Cuando el animal o la planta muere, deja de incorporar dióxido de carbono y entonces el contenido de carbono 14 en su organismo disminuye con el tiempo, ya que es un emisor de radiación beta. Cada 5730 años, que es la vida media del carbono 14, su contenido se reduce a la mitad del valor inicial.

Midiendo en los restos de animales, plantas u objetos confeccionados por el hombre la

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

cantidad de carbono 14 que se desintegra por segundo, es posible determinar su antigüedad o el año de su deceso.

La datación fósil por el método del carbono 14 permite determinar edades de hasta 50.000 años.

Investigación agrícola

Mediante el uso de las radiaciones es posible estudiar, por ejemplo, la forma en que se distribuyen los fertilizantes en las plantas. Para ello se emplean fertilizantes que poseen en su composición un elemento radioactivo y detectores que permiten mostrar la distribución de este elemento dentro de las plantas.

Medio ambiente

La detección de diferentes radioisótopos permite cuantificar la presencia de diferentes sustancias tóxicas en el aire, la atmósfera y el agua.

También de este modo es posible estudiar el cambio climático a lo largo del tiempo registrando la medida de radiaciones en sedimentos. Además de carbono 14, para la datación de los cambios climáticos se utilizan técnicas similares con plomo 210, cuya vida media de 22 años permite estudiar escalas de tiempo diferentes.

Investigación biológica

Gran número y variedad de aplicaciones utilizan radioisótopos que permiten identificar y cuantificar diversos mecanismos, sea en biología, bioquímica, virología u otras áreas. Por ejemplo, mediante el uso de radioisótopos es posible estudiar la distribución de diferentes medicamentos luego de la ingestión.

¿Qué usos tienen las radiaciones ionizantes?

En 1948 se pudo estudiar el mecanismo de la fotosíntesis empleando dióxido de carbono que contenía carbono 14.

Utilizando elementos radioactivos se puede estudiar también la velocidad de absorción y distribución de sustancias nutrientes en las plantas.

Centrales nucleares y energía

Todos los fenómenos nucleares involucran un intercambio y/o liberación de energía. Las centrales nucleares reúnen las tecnologías que permiten utilizar la enorme energía almacenada en los núcleos atómicos para usarla a gran escala. Usualmente es llamada *energía atómica*, pero también se la denomina *energía nuclear*, que hace referencia más precisa a su origen físico.

En el 2009 el 13% de la energía eléctrica en el mundo fue generada en centrales nucleares.

Frecuentemente la expresión *central nuclear* tiene una connotación negativa. Muestra de ello es que el inspector de seguridad nuclear más famoso es el personaje Homero Simpson. La generación de energía a partir de centrales nucleares suele asociarse a la posibilidad de accidentes importantes, con grandes daños ambientales y a la salud. Por otra parte, es necesario un gran esfuerzo para administrar en forma segura los residuos que se generan.

A pesar de este contexto, gran cantidad de países han optado por la energía nuclear para llegar al nivel de consumo energético que necesitan, el cual les permite tanto el desarrollo económico como el acceso a modalidades de consumo que están muy difundidas.

País	Cantidad de reactores nucleares	Porcentaje de generación de energía eléctrica
Estados Unidos	104	29%
Francia	58	75%
Japón	54	29%
India	20	2%
Argentina	2	7%
Brasil	2	3%

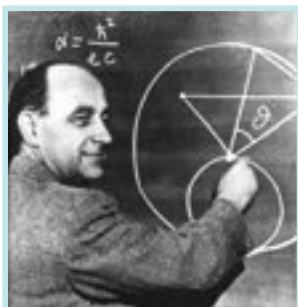
29 países disponen de centrales nucleares para generación de energía. Actualmente operan 442 y hay 65 más en construcción.

Centrales nucleares y energía

Aun aquellos países que no disponen de centrales nucleoelectricas hacen un uso indirecto de esta energía, al proveerse de los países vecinos que tienen excedente a partir del uso de centrales nucleares. Es el caso de Uruguay, que frecuentemente compra energía a Argentina y Brasil.

En nuestro país se ha comenzado a debatir acerca de la conveniencia de esta opción energética y hay consenso en que a corto plazo y por algunas décadas no será técnicamente posible ni conveniente. El debate ha permitido que la ciudadanía se informe, medite y se plantee la resolución de las cuestiones ya presentes en nuestra vida con relación a las tecnologías nucleares. Por ejemplo, ¿qué destino se les da actualmente y se les daría a los desechos nucleares en el Uruguay?, ¿es razonable renunciar en nombre de una consigna ("NO NUCLEAR") a los enormes beneficios de estas tecnologías para la medicina y otras aplicaciones?

Por otra parte, no todos los reactores nucleares se destinan a la producción de electricidad. Existen reactores de poca capacidad de generación de energía cuya finalidad principal es la investigación en diversas áreas científicas y tecnológicas y la producción de radioisótopos, los cuales se emplean en medicina con grandes beneficios. La investigación llevada a cabo en pequeños reactores ha permitido desarrollar tecnologías de gran aplicación en nuevos materiales, biología, medicina y medio ambiente, entre otros.



Enrico Fermi (1901-1954) Premio Nobel de Física 1938

El primer reactor nuclear fue desarrollado en el Proyecto Manhattan durante la segunda guerra mundial, como parte de la carrera armamentista que permitió a Estados Unidos disponer de armas nucleares antes que Alemania y sus aliados. El físico italoamericano Enrico Fermi fue quien descubrió nuevos elementos radioactivos obtenidos a partir del bombardeo de núcleos pesados con neutrones;

fue asimismo el creador de este reactor que usaba uranio natural como combustible.

¿Cómo funciona un reactor nuclear? La producción de energía eléctrica en una central nuclear es muy similar a la producción de electricidad en una central térmica de carbón o de gas. Ambas se basan en obtener energía a partir de un combustible que genera calor, el cual es utilizado para producir vapor de agua, que a su vez se encargará de mover las turbinas generadoras de la electricidad.

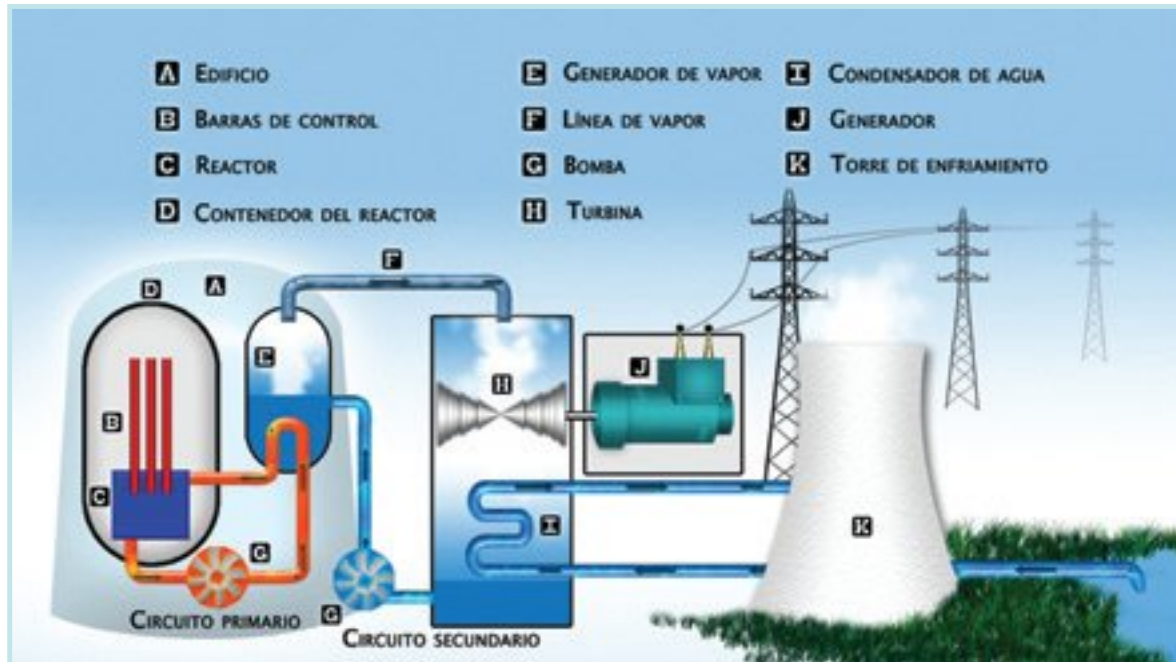
La principal diferencia radica en el tipo de combustible a partir del cual se obtiene el calor, que en el caso de una central nuclear son materiales con núcleos fisionables, mientras que en una central convencional son combustibles fósiles. Esto implica el uso de complejas tecnologías relacionadas con los fenómenos nucleares y prácticas cuidadosas de seguridad y para la protección del personal, la población y el medio ambiente.

En las centrales nucleares el combustible que se utiliza es en general óxido de uranio, con uranio natural a veces enriquecido con uranio 235 hasta el 5%. El enriquecimiento de uranio natural es un proceso que implica el uso de tecnologías muy avanzadas (¡y secretas!), de difícil acceso para la mayoría de los países. Otra posibilidad de combustible nuclear es el plutonio 239. Estos combustibles tienen la propiedad de contener núcleos que fisionan en condiciones adecuadas.

El uranio que se encuentra en la naturaleza consta de 140 núcleos de uranio 238 por cada núcleo de uranio 235.

El uranio es uno de los principales combustibles que se utilizan en las centrales nucleares, y frecuentemente es uranio enriquecido.

¿Qué es el uranio enriquecido? Es el que se obtiene luego de someter el uranio natural a diferentes procesos físicos y químicos para aumentar el porcentaje de uranio 235.



¿Qué significa la fisión nuclear? Es la división de un núcleo en núcleos más pequeños, sea espontáneamente, debido a que son inestables, o inducida por el bombardeo con partículas. Por ejemplo, si los núcleos de uranio 235 son bombardeados con neutrones de poca velocidad, se dividen generando nuevos neutrones y núcleos radioactivos.



Estos nuevos neutrones pueden a su vez provocar nuevas fisiones de uranio 235 y así iniciar una *reacción en cadena*. Manteniendo constante el ritmo de la reacción en cadena es posible obtener una liberación controlada de la enorme energía almacenada en los núcleos radioactivos.

Los reactores se diseñan de forma que, de los dos o tres neutrones producidos en cada fisión, en promedio solamente uno logre provocar un nuevo proceso de fisión. De esta forma se logra mantener un ritmo de generación de energía constante.

Los neutrones provenientes de los núcleos fisionables son enlentecidos por materiales específicos llamados *moderadores*, para permitir que estos provoquen nuevas fisiones de uranio 235. Por ejemplo, en el primer reactor el moderador era de grafito (una forma del carbón), así como en el reactor de Chernobyl. Otro moderador utilizado es simplemente agua, como es el caso de los más de cien reactores de Estados Unidos, o agua pesada, como en los de origen canadiense.

Por otra parte, el reactor contiene *barras de control* construidas con materiales como boro o cadmio, cuya finalidad es la absorción de neutrones. Estas barras se introducen o se quitan del reactor con el propósito de regular el ritmo de la reacción en cadena y constituyen un importante elemento de seguridad.

Finalmente, los productos de fisión, que tienen grandes velocidades y por lo tanto generan altas temperaturas, transmiten por contacto su energía a un circuito cerrado de agua u otro fluido, llamado *circuito primario*, provocando su calentamiento. Este circuito de agua finalmente transfiere su calor a otro circuito cerrado e independiente, llamado *circuito secundario*, lo que genera vapor en él. El vapor mueve las turbinas como en cualquier

El uranio 238 absorbe neutrones lentos sin fisionarse, generando otros elementos radioactivos, como el plutonio 239. En cambio, el uranio 235 se fisiona cuando absorbe neutrones lentos.

Los neutrones lentos, capaces de provocar la fisión del uranio 235, son llamados *neutrones térmicos*.

Centrales nucleares y energía

central convencional, de igual forma que el agua del río Uruguay mueve las turbinas de la central de Salto Grande. Luego de pasar por las turbinas, este vapor es enfriado con agua que se toma de un arroyo, embalse o río cercano a la central.

En las enormes torres que son características de las centrales nucleares se realiza el enfriamiento del vapor del circuito secundario. El calor extraído al vapor del circuito secundario produce las columnas de vapor que se ven en estas torres de enfriamiento. Es importante destacar que ninguno de los circuitos mencionados mezcla sus fluidos durante el funcionamiento de la central, y en el funcionamiento normal no se emiten vapores radioactivos a la atmósfera.



Torres de enfriamiento

¿Qué ocurre con el combustible luego de la fisión? Al cabo de un año aproximadamente el reactor ha usado buena parte del uranio 238 que ha generado plutonio 239, de vida media muy larga, además de otros elementos radioactivos originados en la fisión del uranio 235 o del plutonio 239. La larga vida media de los fragmentos de fisión (*transuránidos*) es uno de los principales problemas para la disposición final de los desechos radioactivos de los reactores nucleares.

El plutonio 239 también puede ser utilizado como combustible en reactores o en armas nucleares. La extracción del plutonio 239 es una tarea complicada y recibe el nombre de *reprocesamiento*. Algunos países reprocesan el combustible nuclear, lo que constituye un indicio de que construyen armas nucleares basadas en plutonio, pese a que para ello se requiere tecnología extremadamente avanzada.

Seguridad nuclear y accidentes

Las actividades humanas pueden implicar un riesgo para el medio ambiente y para la seguridad. Estas son finalmente aceptadas o rechazadas por la sociedad de acuerdo a los beneficios y a los riesgos que conllevan.

Eventualmente, los accidentes en centrales nucleares pueden generar pérdida de vidas humanas, afectar la vida de poblaciones importantes que deben trasladar sus viviendas, y producir daños en el medio ambiente. De acuerdo a su gravedad podrán implicar un legado hacia las futuras generaciones que los hace singulares. Accidentes de grandes consecuencias han ocurrido hasta el momento en pocas oportunidades. El más grave ha sido el de Chernobyl en 1987.

Un reactor fuera de control puede generar diversas situaciones relacionadas con el combustible, los circuitos de intercambio de calor o los materiales con los que está construido. Si se alcanzan altas temperaturas que provoquen la rotura del contenedor metálico y/o del edificio que lo contiene, se puede llegar a liberar elementos radioactivos hacia el exterior.

Los reactores nucleares se construyen con múltiples mecanismos de seguridad y funcionan de acuerdo a procedimientos claramente asentados, de forma de evitar errores e improvisaciones. Esto supone un gran entrenamiento del personal que trabaja en ellos. En los cerca de cien accidentes ocurridos en centrales nucleares desde 1945, frecuentemente las fallas humanas han desempeñado un papel central, ya que se aplicaron incorrectamente los protocolos establecidos. En un número relativamente menor de ellos ha habido fatalidades.

El reactor propiamente dicho es la única estructura que contiene y está

¿Por qué un reactor no puede explotar como una bomba atómica si ambos se basan en el mismo proceso físico? Los reactores se diseñan de forma que, cuando aumenta inesperadamente la generación de energía, el número de neutrones lentos disminuye y la reacción en cadena se detiene.

en contacto con elementos radioactivos. En él se encuentran los elementos combustibles formados por uranio, blindados en pequeños cilindros de materiales cerámicos colocados en vainas metálicas. El reactor está recubierto por una estructura de gruesas paredes de metal que constituye una barrera de seguridad. En general está rodeado de otra fuerte estructura edilicia que lo aísla del exterior y previene que en cualquier incidente se emitan gases o residuos del combustible a la atmósfera. Por otra parte, la tecnología del reactor ha sido planeada para impedir cualquier desviación de su funcionamiento normal. Mecanismos electrónicos, mecánicos y los procesos físicos que se desarrollan en el reactor están diseñados para este fin.

Además, existe un estricto programa de garantía de calidad, con un conjunto de prácticas y de procedimientos sistemáticos y documentados, basados en normas nacionales e internacionales, que agrega confiabilidad a todos los elementos de seguridad. Estos programas se aplican en todas las fases de un proyecto nuclear: el diseño, la construcción, la puesta en marcha, la operación regular y finalmente la clausura de las instalaciones. Paralelamente, las autoridades nacionales de radioprotección de cada país realizan inspecciones periódicas a las instalaciones para verificar el funcionamiento y la fiabilidad de todos los elementos anteriores. Este seguimiento también se realiza con los desechos nucleares que produce el reactor.

Chernobyl



Central de Chernobyl después del accidente

En este lugar de Ucrania, en la Unión Soviética, el 26 de abril de 1986 ocurrió un grave accidente nuclear. Durante un experimento para verificar la seguridad en uno de los reactores, la reacción en cadena se salió de control debido tanto a fallas humanas como de diseño. El recalentamiento del reactor provocó la rotura de circuitos de refrigeración de agua y finalmente el carbón —elemento usado como moderador— se incendió y liberó cerca del 30% de la radioactividad del reactor en forma de humo radioactivo a la atmósfera. Por otra parte, la planta de Chernobyl no tenía un edificio contenedor que pudiera evitar el escape. Diversas fallas del personal anulaban mecanismos de seguridad y protocolos. Sin estos hechos probablemente se habría evitado el accidente.

¿Cuáles fueron las consecuencias? Algunos cientos de personas sufrieron síndrome agudo por radiación, de las cuales cerca de 30 fallecieron en los primeros tres meses. Estas personas eran principalmente personal de la planta y bomberos que acudieron al lugar de la explosión. La mayoría de los decesos asociados a este accidente no ocurrieron inmediatamente sino que fueron provocados por los efectos de bajas dosis de radiación presentes en las primeras semanas luego del accidente.

La radiación liberada decayó a un $\frac{1}{4}$ de su valor inicial luego de 15 minutos, a $\frac{1}{15}$ luego de un día, y a menos del $\frac{1}{100}$ luego de tres meses. La contaminación generada en la atmósfera se dispersó en grandes regiones, aun cuando los efectos importantes han ocurrido principalmente en algunos países de Europa. De las 30.000 personas que residían en los alrededores de la planta, el exceso de muertes por causa de cáncer debido al accidente se calcula en 500 personas

Debido a la necesidad de energía eléctrica, luego del accidente Ucrania continuó operando los reactores de Chernobyl por varios años. El último reactor fue cerrado en el 2000, 14 años luego del accidente.

por encima de los 6.000 fallecimientos por cáncer que ocurren estadísticamente en esa población. Las Naciones Unidas han estimado que el total de excesos de muerte por cáncer a largo plazo debido a la radiación liberada es de 4.000 a 10.000. Las víctimas corresponden a varios países cercanos. La mayor parte de las muertes estimadas provienen de regiones que han recibido dosis residuales pequeñas, cuyos efectos, utilizando la hipótesis lineal, dan como resultado las cifras mencionadas.

La radioactividad liberada en el accidente fue 400 veces mayor que la liberada en Hiroshima y de 100 a 1000 veces menor que la liberada en los ensayos nucleares de los años cincuenta y sesenta.

Es muy difícil identificar en cada caso si un fallecimiento por cáncer se debió o no al accidente de Chernobyl. Esta identificación únicamente es posible en los tipos de cáncer que ocurren con muy baja frecuencia y que presentan un aumento significativo —por ejemplo, los casos de cáncer de tiroides verificados en las zonas vecinas al accidente—. El hecho de que un accidente como este cause cierto número de muertes pero que sea virtualmente imposible identificar cuáles de ellas tienen origen en él provoca un desconcierto que aumenta el temor por estas situaciones.

Otros efectos incluyen la evacuación de la población cercana. Los habitantes de Pripyat, el pueblo más próximo a la central, fueron evacuados al día siguiente, y en total cerca de 300.000 habitantes de zonas de Ucrania, Rusia y Bielorrusia debieron ser relocalizados. Alrededor de la central se estableció una zona de exclusión de 30 kilómetros para viviendas y está vigente hasta el día de hoy.

El accidente fue reconocido por la Unión Soviética dos días después, cuando se detectaron partículas radioactivas en los trabajadores de una planta nuclear en Suecia, a 1000 kilómetros de distancia.

La radioactividad se dispersó de acuerdo a las condiciones meteorológicas y los vientos. La contaminación ambiental más importante fue debida a los radioisótopos estroncio 90, yodo 131 y cesio 137, que afectaron la producción de alimentos de origen animal y vegetal en grandes zonas. Algunos países prohibieron el ingreso de ciertos alimentos con origen en las zonas afectadas.

El accidente tuvo lugar cerca de dos ríos y de una de las reservas de agua de superficie más importantes de Europa. En las primeras semanas esto fue un problema, pero al cabo de algunos meses el nivel de radiación en el agua fue compatible con los valores límite aceptados. Gran parte de la fauna pesquera de lagos y ríos ha tenido por algunos años niveles altos de radioactividad, principalmente relacionada con cesio 137, varias veces por encima del nivel admisible. Algunas malformaciones han podido ser relacionadas con el accidente; por ejemplo, en Alemania se observó un aumento de casos de síndrome de Down después de 9 meses y luego las cifras volvieron a los niveles usuales. En Turquía, en el mismo período, también se detectó en los nacimientos un aumento de malformaciones relacionadas con el sistema nervioso central.

El reactor en el que tuvo lugar el accidente se encuentra dentro de un *sarcófago* de cemento que tuvo que reacondicionarse recientemente, con un costo de cientos de millones de euros, para evitar nuevas fugas de radioactividad.

$E = m c^2$ implica que una pequeña cantidad de masa puede transformarse en una enorme energía. Por ejemplo, a partir de un gramo de masa podría obtenerse la energía eléctrica que utilizan 100.000 hogares en un mes.

$E = m c^2$. Del impactante contenido de la famosa fórmula de Einstein surgió, en medio de la segunda guerra mundial, el desarrollo científico y tecnológico que en 1945 permitió a los Estados Unidos obtener la primera arma de destrucción masiva, la bomba atómica. Esto fue posible en el marco del llamado Proyecto Manhattan, que involucró a los más importantes científicos, principalmente físicos, de Estados Unidos y de Europa, y que compitió con Alemania y Japón, que tenían un desarrollo similar.

La magnitud del esfuerzo realizado se puede cuantificar en su costo en dólares americanos de entonces: 20.000.000.000. Ese año Estados Unidos utilizó con fines bélicos y sobre poblaciones civiles dos bombas atómicas basadas en diferentes tecnologías: la bomba de uranio en Hiroshima y la bomba de plutonio en Nagasaki.

Una bomba nuclear se basa en la liberación de energía por procesos nucleares de *fisión* o *fusión*. El primero es el mismo proceso físico utilizado en un reactor nuclear, mientras que el segundo implica la unión de dos núcleos atómicos, pero en ambos casos estos procesos ocurren en un número y a un ritmo muy acelerado, por lo que se libera una gran cantidad de energía en un lapso muy corto. Cerca del 95% de la energía liberada produce la onda expansiva y el calor, mientras que el 5% restante es radiación. De esta última, un 80% son rayos gamma y el resto principalmente neutrones y diversos productos de fisión.

Existen numerosas palabras para designar a las armas nucleares: *bomba atómica*, *bomba nuclear*, *bomba termonuclear*, *bomba H*, *bomba de hidrógeno*, *bomba de neutrones*, *bomba de plutonio* y *bomba de fusión*, entre otras. Algunas son sinónimos y otras designan las diferentes tecnologías en las que están basadas, pero todas provocan un enorme impacto al cual nadie es indiferente.

La mayoría de las que han sido detonadas son bombas de uranio y plutonio, basadas en

el proceso de fisión. Otras, como las bombas basadas en hidrógeno, utilizan como mecanismo de liberación de energía procesos de fusión de isótopos del hidrógeno (deuterio y tritio). Finalmente, las llamadas *bombas de neutrones* emplean los dos mecanismos, liberando la mayor parte de la energía por procesos de fusión y principalmente en forma de enormes cantidades de radiación, más que en forma de onda expansiva, como ocurre en una explosión convencional de dinamita o TNT.



En todos los casos, de acuerdo a la ecuación de Einstein, parte de la masa nuclear se transforma en energía, y esta energía produce el enorme calor y la explosión que constituyen el descomunal poder destructivo de estas armas. Esta liberación de energía provoca entonces la destrucción y la mayoría de las muertes en forma casi inmediata en una zona muy extensa. Por otra parte, como efecto colateral, se produce una cantidad muy importante de radiación ionizante capaz de producir la muerte a más largo plazo o dejar graves secuelas en aquellas personas expuestas. La fatalidad debido a estas últimas causas es mucho menor que la producida en la explosión primaria, con la que es posible arrasarse en un instante varios kilómetros a la redonda.

Los efectos colaterales mencionados son también importantes, ya que pueden depositar en la atmósfera y en las zonas cercanas a la explosión una cantidad significativa de elementos radioactivos, algunos de vida media muy larga. Este hecho se conoce como *fallout*. Si la bomba detona cerca del suelo, entonces la cantidad de polvo mezclado con residuos radioactivos es mucho mayor, lo que a largo plazo producirá un daño por radiación mucho más importante, ya que el polvo radioactivo queda en suspensión en la atmósfera y es trasladado por los vientos a grandes distancias.

Algunos de los fragmentos radioactivos peligrosos son el estroncio 90 y el cesio 137, cuyas vidas medias son de aproximadamente 30 años y, al ser de fácil incorporación a

las sustancias orgánicas, potencian los efectos de la radioactividad producida por las detonaciones nucleares. Otros efectos importantes son debidos al carbón radioactivo, cuya presencia en la atmósfera se ha duplicado por las pruebas nucleares.

Un poco de historia y actualidad

La energía liberada en bombas nucleares es usual cuantificarla en *kilotones*, equivalentes a la energía liberada por 1000 toneladas de TNT.

Cerca del 98% de los decesos ocurridos en Hiroshima y Nagasaki fueron debidos a la explosión inicial, la cual liberó instantáneamente una enorme cantidad de energía que provocó la onda de presión y calor que aniquiló a decenas de miles de personas y destruyó esas ciudades. El resto de las muertes fueron debidas a la exposición a la radiación.

La primera bomba nuclear, detonada en Nuevo México (Estados Unidos), fue la única prueba del Proyecto Manhattan previa a los bombardeos en Hiroshima y Nagasaki. La energía liberada equivalió a 20.000 toneladas de TNT.

La bomba de Hiroshima liberó aproximadamente 13 kilotones y en ella la mayoría del uranio fisionable (98%) no explotó, tal como estaba previsto en su diseño. Las bombas de hidrógeno o termonucleares pueden liberar energías del orden de 100.000 kilotones.

Ocho países han detonado bombas atómicas en ensayos nucleares: China, Corea del Norte, Estados Unidos, Francia, Gran Bretaña, India, Pakistán y la Unión Soviética. Otros tres países podrían tener armas nucleares pero no lo han declarado. Estos son Irak, Israel y Sudáfrica. En total Estados Unidos y la Unión Soviética han detonado (¡cada uno!) cerca de 1100 bombas nucleares desde 1945. Estados Unidos ha declarado que mantiene actualmente alrededor de 12.000 bombas nucleares como arsenal, mientras que Rusia cuenta con algunos cientos, Francia con unas 400 y Gran Bretaña 200.

Desde hace un par de décadas los ensayos de armas nucleares se han reducido drásticamente. Para estos ensayos Estados Unidos ha detonado bombas en el océano Pacífico, en Nevada, Colorado, Nuevo

México, Missisipi y Alaska. En la década de los noventa ensambló sus últimas bombas nucleares. Francia y China detonaron las últimas bombas nucleares en 1996, mientras que Pakistán e India continuaron sus ensayos algunos años más.

En ensayos de armas nucleares se han detonado desde 1945 más de 2000 bombas atómicas.

¿Cómo funcionan?

Las llamadas bombas de uranio se basan en uranio natural altamente enriquecido con uranio 235, que, como ya hemos comentado, es muy difícil de obtener. Para poder funcionar necesitan una masa mínima de uranio 235 de algunos kilogramos. El resto de la tecnología que utiliza esta bomba no requiere conocimientos tecnológicos que sean inaccesibles a la mayoría de los países. La bomba estallada en Hiroshima fue de este tipo. Contenía un mecanismo de detonación que disparaba dos trozos de uranio 235, los cuales al juntarse formaron la masa necesaria para detonar.

El uranio que se utiliza en las bombas nucleares tiene niveles de enriquecimiento muy altos.

Las bombas de plutonio se basan en este material que se produce como desecho en las centrales nucleares, pero que es difícil de obtener ya que necesita del reprocesamiento. Además, la tecnología del mecanismo detonante de la explosión está basada en una implosión que comprime al plutonio 239 hasta niveles que hacen posible la reacción en cadena. Esta es una tecnología inaccesible para la mayoría de los países.



Nagasaki, 9 de agosto, 1945

Las bombas de hidrógeno o termonucleares utilizan la energía liberada por la fusión de isótopos de hidrógeno. Para desencadenar este proceso emplean uranio o plutonio como combustible para una pequeña bomba nuclear que oficia de detonante. Presentan por tanto una enorme dificultad para

ser fabricadas. El arsenal nuclear de la mayoría de los países desarrollados contiene este tipo de bombas, que son mucho más potentes, de pequeño tamaño y livianas en comparación con las que usan otras tecnologías.

¿Qué son las llamadas *bombas sucias*? No son bombas atómicas, sino que están fabricadas con un explosivo convencional mezclado con un material radioactivo. Una vez que se produce la explosión, el material radioactivo se dispersa en el ambiente. El impacto principal que podrían producir es el pánico en la población, más que daños a la salud.

La fabricación de grandes armas nucleares se ha enlentecido o detenido en el mundo por diferentes causas. Además de las razones políticas y de la presión de la opinión pública, una de ellas es que no son fácilmente transportables en misiles. Por otra parte, con menor energía total liberada, varias bombas nucleares pequeñas logran en conjunto una destrucción mayor que una sola bomba nuclear de gran poder.



Misil nuclear

La energía que se libera a partir de la fisión de un núcleo de uranio es 20.000.000 de veces mayor que la que se produce cuando una molécula de TNT se rompe liberando su energía.

Hoy en día las tecnologías necesarias para la fabricación de bombas nucleares son accesibles a más países, lo que hace posible la proliferación de las armas nucleares. Este es uno de los graves problemas que afronta la humanidad.

Desechos radioactivos

Como consecuencia del uso de elementos radioactivos con diversos fines y principalmente del funcionamiento de centrales nucleares, se generan desechos radioactivos. Estos se pueden presentar en forma líquida, sólida o gaseosa y necesitan diferentes tratamientos. En los países donde hay centrales nucleares, estas producen el 90% de estos desechos, mientras que el 10% restante proviene de usos médicos, industriales y otros.

Se define como *residuo o desecho radioactivo* todo material o producto que presente trazas de radioactividad que puedan ser perjudiciales para la salud o el medio ambiente y para el cual no esté previsto ningún uso práctico.

Entonces, ¿qué se debe hacer con ellos?

Los residuos radioactivos deben ser primero clasificados según su actividad y también por su vida media. También es importante tener en cuenta su grado de toxicidad y las propiedades químicas que los hacen más o menos dañinos para la salud y el medio ambiente.

A título de ejemplo, en los países desarrollados, por cada kilogramo de residuos radioactivos se producen 70.000 kilogramos de residuos industriales tóxicos y 7.000.000 kilogramos de residuos industriales en general. Más allá de lo específico de los residuos nucleares, estos datos dan una idea de la diferencia que implica administrar unos y otros desechos.

Los residuos nucleares se almacenan en forma segura mientras contengan radioactividad que pueda ser nociva para la salud o el medio ambiente. Para este fin se utilizan barreras naturales o artificiales. Los residuos de baja actividad se confinan en instalaciones cerca de la superficie, mientras que los de alta actividad se colocan en contenedores a una profundidad de algunos cientos de metros, en zonas estables geológicamente y lejos de lechos acuosos. La IAEA (sigla en inglés de la Agencia Internacional de Energía Atómica) ha establecido principios de seguridad con relación a los desechos que son aplicados por la mayoría de los países. Un caso particular son los países subdesarrollados, que pueden carecer de personal debidamente capacitado para estas tareas.

Desechos radioactivos

Los residuos de los combustibles nucleares reciben un tratamiento particular debido a su gran volumen y actividad. Finalizada su vida útil en la central, son trasladados a piletas blindadas dentro de las mismas instalaciones. Usualmente, al colmarse la capacidad de estas, los residuos se almacenan en contenedores de plomo, hormigón o acero. Luego de tratamientos que permiten disminuir su volumen y separar los transuránidos, por ejemplo, se los transporta a depósitos que son su destino final. El transporte desde la central hasta el lugar de almacenamiento final puede resultar peligroso, por lo que deben tomarse medidas de seguridad de acuerdo a protocolos cuidadosamente diseñados. Además, para una gestión eficiente y segura es necesario llevar un historial de todos los residuos, especificando sus características y ubicación.



Pileta para desechos



Contenedor de hormigón para desechos

Una posibilidad para algunos residuos es la transmutación nuclear en otros elementos químicos no radioactivos. Esto permite que, por ejemplo, el tecnecio 99, que tiene larga vida media, se transforme por bombardeo de neutrones en tecnecio 100, que en pocos minutos decae al elemento estable rutenio. Esta tecnología está disponible únicamente para unos pocos residuos radioactivos y es objeto de intensa investigación para poder utilizarla en otros elementos y a gran escala.

En Uruguay es el Centro de Investigaciones Nucleares (CIN), dependiente de la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República, la única entidad designada para gestionar y almacenar las fuentes y los desechos radioactivos. Estos tienen origen en actividades médicas, de investigación, en la industria y otros. El CIN lleva un inventario de todas las fuentes y desechos que ingresan. Los desechos de más alta actividad, como las unidades de cobalto decaídas que no tienen ya utilidad en medicina y que fueron adquiridas en el exterior, son enviados a su país de origen.

Desechos radioactivos

El CIN y la Universidad de la República recibieron esa responsabilidad a partir del reactor de investigación que funcionó en ese centro en la década del sesenta. Fue totalmente desmantelado hace años, pero dejó como legado la mencionada responsabilidad. Es inconveniente que una institución educativa, localizada en medio de la ciudad más habitada y en un barrio muy populoso y con grandes necesidades sociales, sea la depositaria de todos los residuos nucleares del país. Es necesario dar a los desechos radioactivos un nuevo destino geográfico, bajo la responsabilidad de las autoridades competentes. Existen planes para solucionar esta situación de alcance nacional en los próximos años.



Centro de Investigaciones Nucleares



Facultad de Ciencias

¿Es necesario tomar precauciones a la hora de exponerse a la radiación?

Sí. Es necesario tomar precauciones y utilizarlas en forma supervisada y correctamente.

Para ello existe la ICRP (sigla en inglés de la Comisión Internacional de Protección Radiológica), una organización científica no gubernamental que publica recomendaciones de protección frente a las radiaciones ionizantes.

Establece tres principios básicos:

- que la práctica esté justificada,
- que se optimice la protección,
- que se apliquen límites de dosis individuales.

Los límites de dosis recomendados a partir de estudios científicos y que se utilizan en la mayoría de los países figuran en la tabla siguiente. Los límites adecuados varían de acuerdo a la sensibilidad de diferentes zonas del cuerpo a las radiaciones externas. Asimismo, los límites de dosis para personal que trabaja con radiaciones son diferentes que para el público en general, que recibe dosis sin ser consciente de ello.

Límites de dosis	Personal (Sv/año)	Público (Sv/año)
Cuerpo entero	0,02	0,001
Cristalino del ojo	0,15	0,02
Superficie de la piel	0,5	0,05
Extremidades	0,5	0,05

En el ámbito médico, por ejemplo, para asegurar la calidad de estudios y tratamientos y para disminuir en la medida de lo posible la dosis recibida por el personal y por el paciente, los médicos deben solicitar estudios de diagnóstico en casos debidamente justificados. Por su parte, los pacientes deben tener claro que no por someterse a varios procedimientos y estudios la calidad de la atención médica recibida mejora.

Además, las instituciones deben contar con personal capacitado, calificado y acreditado para el manejo de todos los equipos y para la correcta interpretación de los resultados de un estudio determinado. De poco sirve un estudio diagnóstico de última generación si no es posible interpretar correctamente sus resultados y si la calidad de los tratamientos posteriores no es la adecuada.

También se requiere la presencia de un físico médico. Este es el responsable de realizar controles de calidad periódicos en los equipos, con el fin de asegurar al paciente que está recibiendo su estudio/tratamiento en óptimas condiciones, además de planificar con el médico el tratamiento óptimo para cada persona.

Los trabajadores ocupacionalmente expuestos deben utilizar todas las medidas de protección personal posibles. Por ejemplo, ubicarse siempre detrás de las mamparas protectoras que han sido blindadas siguiendo estándares internacionales. Además, el uso de dosímetros personales es obligatorio y permite evaluar las condiciones laborales. Los médicos radiólogos deben utilizar chalecos, guantes y lentes blindados, y minimizar la duración del estudio cuanto sea posible.

Al paciente, a su vez, se le debe brindar la información y los medios adecuados para minimizar las dosis recibidas en los procedimientos.



Protección personal

Como norma general es importante que aquellas áreas que hacen uso de las radiaciones ionizantes estén identificadas con claridad. Además deben contar con dispositivos de aviso cuando una fuente de radiación está encendida y dispositivos de seguridad por si ocurriese una eventualidad.



El material radioactivo debe estar claramente señalado. Cada zona y los carteles que la identifican ayudan a poner en evidencia los protocolos que se deben aplicar en cada caso y que permiten al público y al personal estar adecuadamente protegidos frente a dosis innecesarias.

Poder estimar el exceso de cáncer debido a una cierta dosis de radiación es esencial, no solo para la radioprotección sino también para la sociedad, ya que las políticas públicas al respecto dependen de estos valores. Esto implica que los criterios para aceptar o rechazar distintas prácticas que involucran bajas dosis dependen del consenso en cada país y de las recomendaciones de los organismos internacionales. Estos criterios, y las políticas públicas que implican la regulación y prohibiciones correspondientes, están relacionados con eventuales costos de diferente tipo (económicos, en salud, etc.) que cada sociedad debe afrontar para permitir el uso de las radiaciones.

A título de ejemplo, la chance de fallecer en un accidente de auto es cercana al 1%. ¿Hasta qué nivel entonces se exigen medidas que impidan o permitan disminuir este hecho? Llega un punto en que los costos económicos y las tecnologías involucradas, si bien pueden reducir mucho este porcentaje, ¡invalidan la utilidad del transporte en auto! De igual forma, cada sociedad decide, usando como base el conocimiento científico disponible, qué dosis de radiación es tolerable para trabajadores y público.

¿Quién controla el uso de las radiaciones?

Hasta aquí hemos enumerado una infinidad de usos que la sociedad actual ha dado a las radiaciones ionizantes. Pero ¿quién regula y controla su correcta utilización?

Es fundamental contar con políticas claras en lo referente a la adquisición, la puesta en funcionamiento y el control periódico de equipos y prácticas que utilicen radiaciones ionizantes, así como también establecer normativas en lo referente a qué hacer con los desechos generados por estas prácticas y cómo enfrentar una emergencia nuclear.

La incorporación de las tecnologías nucleares requiere generar previamente los marcos legales, el personal capacitado para su uso y fiscalización, la educación continua de todos los actores involucrados, desde los operarios hasta los pacientes y los ciudadanos. El desarrollo acelerado de nuevas tecnologías nucleares y la incorporación de estas a diversas esferas de las actividades en las sociedades es reconocido en general como un gran avance que ha permitido combatir enfermedades y solucionar problemas impensables hace unas décadas. En los países subdesarrollados este impacto positivo —por ejemplo, la incorporación de las nuevas posibilidades de tratamientos radiantes oncológicos— no siempre se ha podido acompañar de las políticas que aseguren su correcta utilización.

Uruguay cuenta con un organismo estatal, la Autoridad Reguladora Nacional en Radioprotección, con sede en el Ministerio de Industria, Energía y Minería, que es la encargada de estipular las políticas que se llevarán a cabo en lo referente a esta temática. Las normas adoptadas se basan en las recomendaciones de la IAEA.

¿Sabías que...?

Aproximadamente 15 millones de átomos de potasio 40 y 7000 átomos de uranio natural se desintegran en nuestro organismo cada hora.

Los televisores y monitores de tubo (los que no son “planos”) emiten una pequeña cantidad de rayos X.



Las nueces amazónicas son el alimento más radioactivo sin que esto constituya un peligro para la salud.

En Estados Unidos, para que una bebida alcohólica sea apta para el consumo humano debe presentar cierto grado de radioactividad que demuestra que el alcohol es de origen vegetal y no derivado del petróleo.



En la década del cincuenta, en algunos comercios, como la conocida tienda London-Paris, los zapatos se probaban en el pie del comprador usando rayos X.



El calor generado en el interior de la tierra en parte es producido por la radiación emitida por el uranio y el torio. Este calor es responsable de volcanes y géiseres.

La medición de isótopos de arsénico radioactivos en el cabello de los restos de Napoleón, permitió descubrir que no había muerto por envenenamiento.

¿Sabías que...?

Frecuentemente los detectores de radioactividad en puertos, aduanas y aeropuertos se disparan cuando llega un cargamento de bananas. Esto se debe a que la banana contiene potasio, del cual 1 de cada 800 núcleos es potasio 40, que es radioactivo.



Existe una unidad de medida para pequeñas dosis llamada *dosis equivalente a un plátano*. Esta toma como referencia la radioactividad de la banana.

Los pararrayos radioactivos funcionan utilizando una fuente radioactiva que ioniza el aire a su alrededor atrayendo entonces a los rayos.

Un reactor nuclear de potencia similar a una central eléctrica convencional consume en un año cerca de una tonelada de uranio 235. Ocho metros cúbicos de uranio natural, que pesan 140 toneladas, tienen esta cantidad de uranio 235.

El Sol y las estrellas obtienen la enorme energía que producen a partir de la fusión nuclear.



Los submarinos nucleares tienen sus motores movidos por vapor, que es generado por combustible nuclear, por lo cual no necesitan consumir oxígeno como los motores convencionales y pueden estar sumergidos por largos períodos.

¿Sabías que...?

Se produce antimateria al lado del Estadio Centenario, en el CUDIM. Allí se generan constantemente positrones que serán utilizados en estudios clínicos.



Las reservas de uranio en el mundo no son inagotables. Diferentes estudios muestran que estas alcanzarían para unas decenas de años si toda la energía eléctrica proviniese de centrales nucleares.

Un dispositivo para tratamientos con radiación que se encontraba en un hospital abandonado en Goiana (Brasil) fue desarmado por algunas personas. En él encontraron polvo que brillaba (cesio-137, radioactivo) y lo utilizaron por diversión. Este accidente ocurrió en 1987 y cuatro personas fallecieron.

En un viaje aéreo de Montevideo a Madrid se recibe una dosis cercana a un centésimo de la dosis anual debida a rayos cósmicos.



En la década del cincuenta, algunos materiales luminiscentes producidos a partir de elementos radioactivos se usaban para hacer más brillante la dentadura.

La dosis anual puede ser decenas de veces mayor que el valor promedio para poblaciones que residen a mucha altitud (La Paz, Quito, etcétera) debido a los rayos cósmicos.

¿Sabías que...?

En nuestro planeta el uranio es un elemento más abundante que la plata.

Si se hacen incidir neutrones sobre núcleos estables estos pueden transformarse en radioactivos. Esto sucede con la plata y el arsénico; se llama a esta técnica activación.

Debido a la enorme proliferación de las armas nucleares, 92 bombas nucleares se perdieron en accidentes aéreos y marítimos, y no han sido recuperadas.

El primer reactor en nuestro planeta existió en Gabón hace ¡1700 millones de años! Hace poco se descubrió que el uranio que se extraía de minas en ese país de África contenía una proporción menor de uranio 235: uno cada 250 átomos de uranio 238, en vez de uno cada 140 como es usual. ¿Dónde estaba el uranio 235 faltante? Analizando elementos radioactivos en esas minas se descubrió que en ellas habían ocurrido, espontáneamente, reacciones en cadena como las de los reactores. Ello fue posible porque entonces y debido a las diferentes vidas medias de estos isótopos de uranio, la abundancia natural de uranio 235 era del 3%. ¡El uranio natural estaba entonces suficientemente enriquecido como para encender naturalmente una reacción en cadena!



acelerador lineal (LINAC). Acelerador de electrones de uso médico que usualmente también tiene la posibilidad de generar rayos X de altas energías para radioterapia.

actividad. Número de desintegraciones que ocurren por segundo en un material que contiene elementos radioactivos.

ADN (ácido desoxirribonucleico). Molécula que contiene toda la información que permite a una célula funcionar, crecer y reproducirse.

antígenos. Sustancias que aumentan la respuesta inmunitaria frente a las enfermedades.

antimateria. Materia formada por antipartículas. Ver *antipartícula*.

antipartícula. Para cada partícula elemental la antipartícula correspondiente, es la que tiene idéntica masa y propiedades excepto su carga, que es opuesta. Por ejemplo, para el electrón es el positrón. Una partícula y su antipartícula se aniquilan al chocar, produciendo dos fotones con una enorme energía dada por la ecuación de Einstein, $E = mc^2$, ya que en este proceso toda la masa se convierte en energía electromagnética.

barras de control. Barras construidas con materiales como boro o cadmio, cuya finalidad es la absorción de neutrones dentro de un reactor nuclear. Estas barras se introducen o se quitan del reactor permitiendo regular el ritmo de la reacción en cadena.

braquiterapia. Técnica para el tratamiento de ciertos cánceres en la que los materiales radioactivos son introducidos en el organismo en forma encapsulada.

cáncer. Conjunto de enfermedades en las cuales el organismo produce un exceso de células anormales (conocidas como cancerosas o malignas), que tienen un crecimiento fuera de control y se diseminan en los tejidos y órganos del cuerpo.

ciclotrón. Es un acelerador de partículas cargadas, basado en grandes imanes y procesos eléctricos que las aceleran en trayectorias aproximadamente circulares.

desechos radioactivos. Material o producto que presenta trazas de radioactividad que pueden ser perjudiciales para la salud o el medio ambiente y para el cual no está previsto ningún uso práctico.

desintegración. Proceso por el cual un radionucleido se transforma en otro elemento emitiendo radiación.

dosis. Término general que indica la energía depositada por la radiación en la materia. Ver *dosis absorbida, dosis efectiva y dosis equivalente*.

dosis absorbida. Cantidad de energía que deposita la radiación por cantidad de masa radiada.

dosis efectiva. Magnitud que se obtiene de multiplicar la dosis equivalente por un factor que tiene en cuenta la sensibilidad de los órganos a la radiación.

dosis equivalente. Magnitud que se obtiene de multiplicar la dosis absorbida por un factor que depende del tipo de radiación, para así tener en cuenta el daño que producen los distintos tipos de radiaciones ionizantes.

electrón. Partícula elemental de carga negativa unidad y de menor masa conocida.

excitación. Proceso en el que se entrega energía al núcleo, átomo o molécula dejándolos en un estado de mayor energía.

fallout. Término del inglés que designa a los residuos radioactivos luego de una explosión nuclear.

fisión. Proceso físico en el cual un núcleo pesado se divide en núcleos más livianos emitiendo diferentes tipos de radiación.

fotón. Partícula de la que está formada la radiación electromagnética. De acuerdo a la energía de estos, las distintas radiaciones reciben diferentes nombres: *luz visible, rayos X, gamma, luz ultravioleta, microondas*, etcétera.

fusión. Proceso por el cual varios núcleos atómicos se unen para formar un núcleo más pesado.

gen. Unidad biológica de la herencia.

gray. Unidad de medida de la dosis absorbida.

IAEA. Sigla en inglés de la Agencia Internacional de Energía Atómica, agencia de las Naciones Unidas que asesora para el uso pacífico de la energía atómica.

ICRP. Sigla en inglés del Comité Internacional de Radioprotección, organización privada sin fines de lucro creada en 1928 que elabora recomendaciones para la radioprotección basadas en información científica.

intensificador de imagen. Dispositivo que recibe el haz de radiación que logra atravesar el organismo y lo transforma en luz visible e intensifica la imagen.

ion. Átomo, molécula o parte de una molécula que adquirió carga eléctrica por la pérdida o captura de un electrón.

ionización. Proceso por el cual un átomo o molécula adquiere o pierde un electrón.

isótopo. Núcleos o átomos que poseen el mismo número de protones pero distinto número de neutrones.

medicina nuclear. Técnica de diagnóstico o tratamiento de pacientes que utiliza radiofármacos.

mecánica cuántica. Teoría física que describe los procesos microscópicos en núcleos, átomos y moléculas.

moderador. Materiales específicos que se utilizan en los reactores nucleares para enlentecer los neutrones producidos en la fisión, a fin de que estos adquieran velocidades que les permitan provocar nuevas fisiones.

mutación. Cambio químico en el ADN celular.

neutrino. Partícula sin carga eléctrica, de masa muy pequeña y que es muy difícil de detectar.

neutrón. Partícula similar al protón pero sin carga eléctrica y de masa aproximadamente 1800 veces la del electrón.

núcleo atómico. Constituyente del átomo que se encuentra en su centro, con carga positiva, formado por protones y neutrones.

partícula alfa. Partícula constituida por dos protones y dos neutrones (núcleo del átomo de helio) emitida por un radionucleido.

partícula beta. Electrón o positrón emitido por un radionucleido.

PET. Sigla en inglés de Tomografía por Emisión de Positrones.

positrón. Antipartícula del electrón, idéntica a este excepto porque su carga es positiva.

protón. Partícula con carga eléctrica positiva unidad y de masa aproximadamente 1800 veces mayor que la del electrón.

radiación electromagnética. Energía en forma de ondas proveniente de la electricidad y el magnetismo, que según la energía que transporta recibe diferentes nombres: *luz visible, ultravioletas, ondas de radio, microondas* y otros. La partícula cuántica que constituye a estas ondas se llama *fotón*, y cuando tiene energías muy altas se le da el nombre de *rayos X* o *rayos gamma*.

radiación ionizante. Fotones o partículas cargadas emitidas por elementos radioactivos o en procesos atómicos u otros procesos que poseen energía suficiente como para ionizar átomos o moléculas.

radioactividad. Proceso en el que ciertos núcleos se desintegran en forma espontánea y aleatoria junto con la emisión de radiación.

radiofármaco. Compuesto químico que se introduce en el organismo con fines de diagnóstico o terapéuticos y que contiene algún radionucleido.

radionucleido o radioisótopo. Núcleo radioactivo.

radioprotección. Conjunto de prácticas destinadas a evitar la exposición innecesaria a la radiación.

radioterapia. Técnica para el tratamiento del cáncer que utiliza haces de radiación ionizante.

rayos cósmicos. Radiación ionizante de alta energía proveniente del espacio exterior.

rayos gamma. Fotones de energía muy elevada emitidos por núcleos inestables u otros procesos.

rayos X. Fotones de energía muy elevada pero menor a la de un rayo gamma que se produce en transiciones atómicas u otros procesos.

reactor nuclear. Dispositivo en el que las reacciones en cadena de fisión se pueden mantener en forma controlada.

sievert. Unidad de medida de la dosis efectiva y la dosis equivalente.

transuránidos. Elementos pesados de vida media muy larga que se producen a partir del uranio en los reactores. Estos constituyen uno de los principales problemas para la disposición final de los desechos radioactivos de los reactores nucleares.

UNSCEAR. Sigla en inglés del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre el Efecto de las Radiaciones Atómicas, que desde 1955 asesora y reporta niveles de radiación a partir de información científica para las Naciones Unidas.

vida media. Tiempo en el que la mitad de un conjunto de núcleos radioactivos se desintegra.

Para saber más...

Para entender las radiaciones

<http://divnuclear.fisica.edu.uy>

Albert Einstein, Cartas al presidente Franklin Delano Roosevelt

<http://hypertextbook.com/eworld/einstein.shtml>

Radiaciones

<http://www.radiationanswers.org/>

http://www.csn.es/.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=3&Itemid=4&lang=es

<http://www.iaea.org/>

<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/42/htm/radiacti.htm>

Radiación y salud

<http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/001289.htm>

<http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/videosandcooltools.html>

<http://www.cancer.gov/espanol>

<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/099/htm/la-rad-ser.htm>

Primer equipo de rayos X para uso médico

<http://www.ajronline.org/cgi/reprint/164/1/241.pdf>

Radiación y embarazo

<http://noah-health.org/es/pregnancy/nine/radiation.html>

Armas nucleares

<http://www.brookings.edu/projects/archive/nucweapons/50.aspx>
<http://nuclearweaponarchive.org/>
<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/061/html/armas.html>

Centrales nucleares

http://www.worldnuclear.org/_nuclear_map/index.cfm?NN_Flash=0
http://www.csn.es/images/stories/publicaciones/otras_publicaciones/serie_divulgativa/fcentrales.pdf
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/119/html/sec_14.htm

Radioprotección

<http://www.sepr.es/html/recursos/publicaciones/carteles%20PR%20en%20RX.pdf>
<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/html/radia2.htm>

Aplicaciones industriales

<http://www.csn.es/publicaciones/gupro.pdf>

Accidentes nucleares

http://www.iaea.org/Publications/Factsheets/Spanish/ines_sp.pdf

Legislación

<http://www.arnr.gub.uy>

- ¿Qué son las radiaciones?
- ¿Cuáles son los riesgos y beneficios que se obtienen de ellas?
- ¿Por qué su uso en medicina es tan extendido?
- ¿Cómo funcionan las centrales nucleares?
- ¿Cuántos tipos de armas nucleares existen?
- ¿Dónde se depositan los desechos radioactivos?
- ¿Quién controla y legisla sus aplicaciones?

Estas son algunas de las preguntas que aborda este libro, en un lenguaje directo, evitando el uso innecesario de términos científicos. Está dirigido a todos aquellos que tengan curiosidad e interés por las radiaciones nucleares y sus aplicaciones.

ISBN 978-9974-0-0720-8



9 789974 007208

CSIC COMISIÓN
SECTORIAL DE
INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA


Facultad de Ciencias
Universidad de la República

Art. 2
Tratado de Fomento del Libro de Textos de la
