

Introducción

Impacto ambiental y sobre los individuos:

- *Efecto de la radiación sobre los individuos*
- Efectos inmediatos de una exposición a la radiación
- Efectos tardíos de una exposición a la radiación

2. Efecto de la radiación sobre el ambiente

2.1. ¿Que daño ambiental causa la energía nuclear?

2.2. Accidentes Nucleares

2.3. Los desechos

Beneficios del uso de la radioactividad:

3. La datación

- *El trazado isotópico en biología y en medicina*
- *Las radiaciones y la radioterapia*

5.1. Las diferentes formas de radioterapia

- *La energía nuclear*
- *La producción de electricidad*

7.1 El ciclo del combustible nuclear

7.2. La seguridad nuclear

7.3. Los residuos nucleares

Aplicaciones:

- *Medicina*

8.1. Radiografías

8.2. Medicina Nuclear

8.3. Radioterapia

- *Aplicaciones agrícolas, industriales y científicas.*

9.1. Trazadores

9.2. Investigación Biomédica

9.3. Mutaciones inducidas en semillas

9.4. Esterilización

9.5. Energía Nucleoeléctrica

Ética social y psicológica:

- *Temores*
- *Aplicaciones benéficas*
- *Activistas Anti-nucleares*

12.1 Apoyo de famosos

12.2 Los 70 y 80

12.3. El debate

Bibliografía

- **Impacto ambiental y sobre los individuos:**

Efecto de la radiación sobre los individuos

Efectos inmediatos de una exposición a la radiación:

Para poder explicar lo que ocurre en el organismo como consecuencia de la exposición a la radiación, es necesario entender que lo observado es la consecuencia de un conjunto de efectos en el nivel celular. Estos efectos y la manera como se manifiestan, dependen de factores inherentes a la radiación y a características del individuo o del tejido irradiado.

Los principales factores que determinan el efecto biológico de una exposición son el tipo de radiación y la dosis absorbida. Sin embargo, la velocidad con que se recibe esta dosis y el número de veces que el individuo se expone a la radiación, son factores que pueden modificar los efectos producidos. No tendrá los mismos efectos la administración de una dosis única, que la misma dosis distribuida en múltiples exposiciones. En lo que se refiere al individuo, será su edad, su estado general de salud, el tamaño de la zona expuesta, así como el tipo de tejidos irradiados lo que determine la gravedad de los efectos. Es importante comprender que los efectos de una dosis serán muy diferentes si es todo el cuerpo el irradiado o si solamente parte de él resulta expuesto. Por ejemplo, las consecuencias de 400 rads. 2 recibidos en el cuerpo entero no serán las mismas que cuando 400 rads sean absorbidos solamente por una mano. En el primer caso, la vida del individuo estará en peligro, mientras que en la segunda, las consecuencias son las de una quemadura severa.

En exposiciones médicas y accidentales se alcanzan valores muy superiores (miles de veces) a los ambientales. En este capítulo se describe, en primer lugar, la interacción de la radiación con las estructuras celulares. A continuación se señala cuáles son los principales efectos locales causados por una sobreexposición en los tejidos u órganos que pueden ser vitales para el individuo irradiado. Posteriormente nos referimos a las consecuencias globales para el organismo y analizamos el caso particular de una irradiación terapéutica.

Efectos en la célula

Cuando una partícula cargada que proviene de la radiación, atraviesa el medio celular es posible que su campo eléctrico consiga arrancarle electrones a las moléculas que constituyen la membrana, el citoplasma o el núcleo

celular. El proceso se llama *ionización*, pues las moléculas que antes eran eléctricamente neutras, se transforman en iones (partículas cargadas) debido a la pérdida de un electrón. La radiación capaz de producir ionización se conoce como *radiación ionizante* y todos los tipos de radiación considerados en este libro (partículas alfa, beta, rayos gamma y neutrones) son de este tipo.

Una molécula ionizada tiene propiedades que pueden ser muy diferentes a aquellas de la molécula neutra. Por esto, una sola ionización puede significar que las funciones originalmente realizadas por la molécula ya no se podrán cumplir.

El efecto señalado anteriormente se considera directo, pues la molécula que sufre el daño es aquella que fue originalmente ionizada. Existen, además, efectos indirectos donde la molécula ya ionizada, puede resultar tóxica y afectar a otras moléculas o células que no fueron ionizadas directamente.

Como la ionización es un proceso que ocurre al azar, cualquier molécula puede resultar modificada al irradiarse la célula. Si la molécula ionizada es parte de la membrana celular es posible que se produzca una rotura que cause la muerte de la célula. En general, esta célula será reemplazada por otra. Si la molécula ionizada es parte de alguna organela citoplasmática, ésta puede llegar a destruirse y sus funciones serán asumidas por alguna otra estructura similar. Si la molécula dañada es el ADN del núcleo celular, parte de la información almacenada en los genes puede perderse o modificarse y dar lugar a que surjan mutaciones (capítulos IV y VI). Este daño se hará manifiesto durante la siguiente mitosis, cuando la célula intente reproducirse. Es posible que la mitosis no pueda realizarse y en este caso la célula morirá sin dejar descendencia. Pero también es posible que el gen dañado esté relacionado con la reproducción de esa célula y, en este caso, la célula y sus descendientes se dividan descontroladamente. Se piensa que esta pérdida de control en la etapa de división celular pueda ser una de las causas de la formación de un tumor.

Cuando la estructura de los cromosomas es alterada por la radiación, el daño puede ser reparado inmediatamente con sustancias celulares que tienen esta función específica (enzimas de reparación). Si no hay reparación, o si ésta no es capaz de reintegrar la organización original del cromosoma, se producen rompimientos y rearreglos estructurales que se pueden observar al microscopio.

Los efectos de la radiación en diferentes tejidos dependen en gran medida de la velocidad de división celular durante y después de la irradiación. Existe una gran variación en el tiempo de vida para las diferentes células; por ejemplo, hay células que viven pocos días, como las formadoras de glóbulos rojos en la médula ósea, o las que recubren las paredes del intestino y la piel, mientras que otras células, como las nerviosas, pueden acompañar al individuo toda su vida.

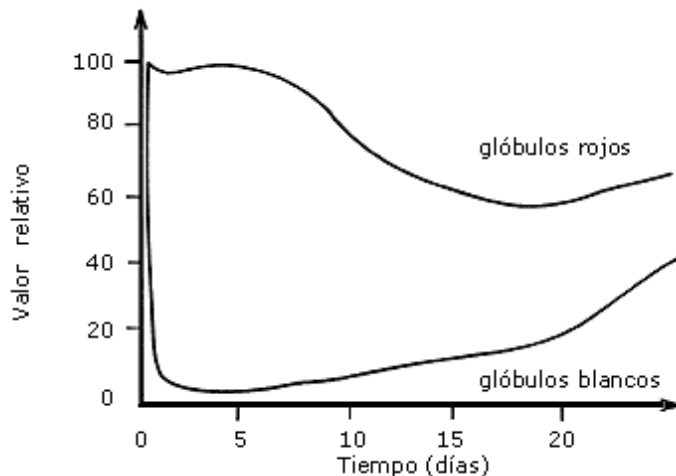
Debido a la complejidad del proceso de replicación celular y a la necesidad de precisión al transmitir el código genético, una célula es más sensible a los efectos de la radiación durante la mitosis que en otras etapas de su ciclo celular. A continuación se discuten los efectos específicos de la radiación en tejidos con diferente radiosensibilidad.

Efectos en órganos vitales

La *piel* fue el primer tejido que se estudió al analizar las alteraciones producidas por la radiación. Dosis cercanas a los 100 rads producen reacciones de eritema (enrojecimiento de la piel) transitorio, que desaparecen al cabo de una semana, y que pueden dejar pigmentación transitoria en la zona irradiada. Cuando la dosis es mayor, varios cientos de rads, las células de la epidermis se destruyen y se forma una zona denudada, en la cual aparecen lesiones semejantes a una quemadura. Dosis de miles de rads producen necrosis (muerte del tejido) que puede curarse si el área afectada es pequeña, ya que es posible la migración de células vecinas a la zona dañada. Si el área irradiada es amplia, la herida necrótica no cicatrizará y solamente un injerto de piel repondrá la parte dañada.

La *médula ósea* es un tejido ubicado en el interior de los huesos y se encarga de producir las células sanguíneas. Estas son los glóbulos rojos y los glóbulos blancos. Los rojos están encargados de transportar al oxígeno desde los pulmones hasta cada una de las células del organismo. Los blancos protegen al individuo de las infecciones y participan en la defensa contra cualquier agresión, incluyendo los tumores malignos. En la sangre también existen corpúsculos denominados plaquetas, de gran importancia en los procesos de coagulación sanguínea.

Todos estos componentes sanguíneos tienen una vida limitada y son formados continuamente en la médula ósea por células progenitoras. Son estas células las más sensibles a la radiación. Cuando ocurre una exposición seria (superior a 100 rads), parte de las células circulantes resultan dañadas y el número de glóbulos blancos disminuye de inmediato. Éste es uno de los primeros síntomas que aparecen cuando hay una exposición muy por encima de los valores ambientales. Las células progenitoras pueden resultar dañadas por la exposición y, entonces, bajará la producción de nuevos glóbulos rojos y blancos, lo que será evidente algunas semanas después de la irradiación. Una baja en el número de plaquetas impide la coagulación sanguínea y en estas condiciones cualquier hemorragia podría resultar fatal. La escasez de células sanguíneas puede provocar la muerte del individuo. Se ha advertido que después de 60 días, con dosis entre 300 y 600 rads, se puede producir la muerte de un ser humano.



Cambio en la cuenta sanguínea de ratas irradiadas con 500 rads al cuerpo entero. Los valores se muestran en relación con los anteriores a la irradiación. Se observa una tendencia a la recuperación.

Cuando se observa el daño agudo causado por radiación en sangre periférica, manifestado por alteraciones en la cuenta sanguínea, se debe aislar a la persona irradiada para evitar infecciones, en caso necesario transfundir plaquetas y, para casos severos, el único tratamiento posible será el trasplante de médula ósea.

Posibles consecuencias tardías de la exposición a radiación son la destrucción del tejido medular (aplasia medular) y la leucemia (tipo de cáncer desarrollado en las células precursoras). Estos efectos se discuten ampliamente en el capítulo VI.

La pared interna del *intestino* está recubierta de células que se renuevan continuamente. Como respuesta inmediata a la irradiación se reduce el número de estas células y se deteriora el proceso de absorción que normalmente ocurre en él. Si el daño es limitado (menos de 100 rads) es posible que después de leves trastornos intestinales (náusea y diarrea) el organismo repare el daño y regrese a la normalidad. Esto no

sucede si la dosis es superior a 700 rads. En este caso se producen ulceraciones en la pared interior, con riesgo de infección, pudiendo presentarse perforación intestinal y severas hemorragias. El tratamiento en estos casos consiste principalmente en el equilibrio hidroelectrolítico y de proteínas, tratando de controlar las posibles infecciones. En las situaciones de mayor gravedad es indispensable la cirugía para remover los tejidos dañados. Este procedimiento resulta muy peligroso por la limitada capacidad de coagulación causada por la destrucción de las plaquetas y la reducida capacidad de defensa debida a la falta de glóbulos blancos, así como por el estado anémico en que seguramente se encontrará el paciente. Estas complicaciones causan la muerte por irradiación a los pocos días, cuando la dosis sobrepasa los 700 rads.

Como efecto tardío de una irradiación se puede producir la fibrosis intestinal, que es la sustitución de las células precursoras por tejido fibroso, disminuyendo así la elasticidad y reduciendo la luz del intestino (esto es, el diámetro interno), lo que en ocasiones causa la oclusión intestinal.

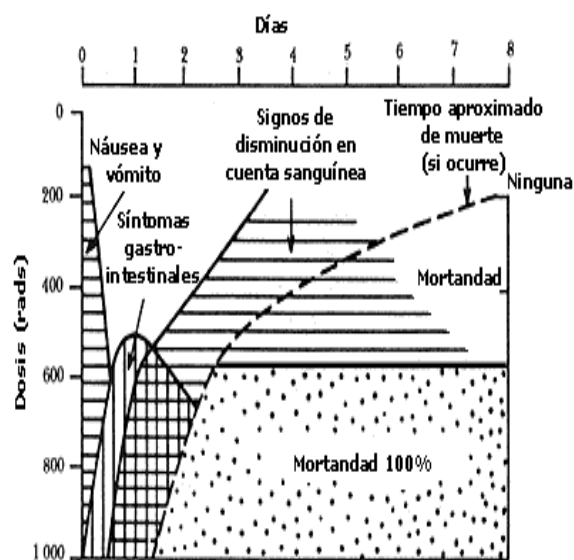
El *pulmón* es el órgano intratorácico más sensible a la radiación. Después de una irradiación del pulmón con dosis cercanas a 2 000 rads, se produce el adelgazamiento y pérdida de la permeabilidad de la pared alveolar debido a la muerte de células alveolares, y aparece una secreción que favorece el desarrollo de infecciones pulmonares. En estos casos, el tratamiento consiste en ayudar a desalojar las secreciones, evitar el desarrollo de infecciones y propiciar la recuperación de los tejidos dañados. Todo esto se logra con el empleo de medicamentos adecuados y por medio del suministro de aire u oxígeno a presión al pulmón. Como efectos tardíos, 3 o 4 meses después de la sobreexposición, se puede desarrollar una neumonitis caracterizada por alteraciones en los tejidos, colapso del equilibrio osmótico en los capilares, expansión irregular de las paredes del pulmón y paso de sangre al alveolo. Cuando se sobrevive la fase de la neumonitis, por lo general se presenta una fibrosis pulmonar que puede conducir a la falla respiratoria y ocasionalmente a la muerte.

La *médula espinal* es el conjunto de nervios ubicado en el interior de la columna vertebral que conecta al cerebro con el resto del cuerpo. El tejido nervioso de la médula espinal consta de células nerviosas y células de sostén. Un primer efecto de la irradiación de la médula con dosis mayores de 500 rads es la pérdida de la mielina que cubre las prolongaciones de las células nerviosas, lo que causa a las pocas semanas de la irradiación pérdida de insensibilidad y adormecimiento de las extremidades. Si la médula recibe dosis cercanas a 2 000 rads, se produce la parálisis, un daño irreversible.

Efectos en el organismo

Después de esta revisión de los efectos en órganos aislados, vamos a referirnos a las consecuencias de exposiciones en que *todo el cuerpo* resulte irradiado. A las pocas horas de ocurrida una exposición excesiva a la radiación, el individuo afectado puede presentar dolor de cabeza, náuseas, falta de apetito, vómito, diarrea, pereza, disminución en la cuenta sanguínea y mala coagulación. Posteriormente puede sobrevenir la pérdida del pelo. Estas alteraciones son reversibles si la dosis es menor de 100 rads. Si la dosis es mayor, la severidad de estas alteraciones aumenta y la recuperación del individuo se dificulta. Con una sola dosis de 400 a 500 rads el 50% de los individuos expuestos muere por alteraciones en la sangre. La probabilidad de que sobrevivan dependerá de la efectividad con que se les administre el tratamiento adecuado.

Si se incrementa la dosis más allá de los 700 rads, disminuyen las esperanzas de sobrevivir y cambia el mecanismo de muerte. Así, cuando la dosis es de 1 000 rads se puede producir la perforación del intestino en uno o varios sitios, lo que hace que el contenido intestinal pase a la cavidad del abdomen llamada peritoneal, produciéndose una infección e inflamación conocida como peritonitis, que es sumamente grave. En estas condiciones es fácil que la infección pase a la sangre y cause la llamada septicemia, que todavía en la actualidad es un cuadro extraordinariamente grave que conduce a la muerte de un gran número de enfermos. Cuando la dosis alcanza los 5 000 rads hay shock nervioso, edema y hemorragia en el sistema nervioso central y la muerte viene en unas cuantas horas.



Secuencia temporal de los principales efectos biológicos inmediatos en un ser humano, causados por una irradiación aguda y de cuerpo entero.

En general, las exposiciones accidentales irradian todo el cuerpo del individuo y los efectos resultantes son los arriba mencionados. Con dosis superiores a unos 100 rads se presentan los primeros síntomas y se requiere de un seguimiento médico, mientras que dosis por encima de los 200 rads hacen indispensable la hospitalización. La recuperación será más probable mientras mayor sea la posibilidad de recibir los tratamientos adecuados, tales como transfusiones, conservación del equilibrio hidroelectrolítico, protección contra infecciones y en casos extremos, transplante de médula ósea.

Efectos durante irradiaciones médicas

Las exposiciones médicas durante la radioterapia son controladas, pues la zona y el tiempo de irradiación han sido cuidadosamente planeados para minimizar los efectos negativos para el paciente. Sin embargo, aún no existe un método para irradiar solamente el tejido canceroso por lo que, en todo tratamiento, una parte de los órganos sanos del paciente recibirá una dosis alta de radiación. Los efectos que se pueden presentar en el nivel sistémico son: falta de apetito, náuseas, vómito, diarrea, sensación de malestar, dolor de cabeza, cansancio, somnolencia y disminución de la cuenta de glóbulos rojos y blancos. Habitualmente estos trastornos son transitorios y bien tolerados por los pacientes.

Durante un tratamiento de radioterapia, puede producirse enrojecimiento de la zona irradiada, comezón, pigmentación de la piel o formación de una capa blanco-amarillenta en la mucosa y formación de vejiguillas en la piel. Estas pueden romperse y dejar salir un poco de líquido, con lo cual se origina una secreción constante, en ocasiones con sangre. Hay caída del pelo localizada en la zona irradiada.

Con la radioterapia moderna estas reacciones son ligeras y se ha evitado el daño severo de necrosis en los tejidos. Habitualmente no se requiere un tratamiento especial para estas reacciones y basta con aplicar cremas con esteroides para aliviar los síntomas. En raras ocasiones hay que suspender el tratamiento para evitar un daño severo. Es necesario comentar que todos estos malestares se pueden justificar cuando el objetivo es salvar la vida de un paciente con cáncer que, sin estos tratamientos, estaría sentenciado a muerte.

Efectos tardíos de una exposición a la radiación:

LOS efectos biológicos de una exposición a la radiación que más preocupan al público son posibilidad de daño genético y el cáncer. Los estudios científicos han mostrado que estos efectos son poco probables y aparecen varios años después de ocurrida la exposición. En el caso de daño genético en seres humanos, no se ha demostrado ningún caso de enfermedad hereditaria causada por una exposición a la radiación. Por el contrario, en casos de cáncer se ha comprobado la aparición de ciertos tipos de esta enfermedad, algunos años después de la irradiación con dosis altas, superiores a los 100 rads.

Podría pensarse que los efectos tardíos producidos por dosis bajas de radiación son bien conocidos, ya que un gran número de individuos (todos los seres humanos) están expuestos. Sin embargo, los efectos causados por dosis inferiores a 10 rads son imposibles de aislar de las frecuencias espontáneas o de las que son originadas por factores químicos o virales. Esta falta de conocimiento ocasiona que el público reciba una información incompleta, incomprensible, e incluso errada. En ocasiones se llega al extremo de adjudicar el nacimiento de monstruos con tres cabezas y colita de cerdo a una exposición a la radiación, cuando la realidad es que tales seres no han sido jamás observados y sólo son productos de la imaginación. Este capítulo describe la información científica que existe del tema, incluyendo aquella que ha sido obtenida con animales de experimentación.

Efectos genéticos

Los efectos genéticos de cualquier agente externo que actúe sobre una célula son el producto de las alteraciones (mutaciones) que el agente pueda causar en el ADN de las células reproductivas del individuo, espermatozoides u óvulos. Los descendientes de este individuo son portadores de la mutación y pueden sufrir las consecuencias de ésta e incluso transmitirla a sus propios hijos, tal como se explicó en el capítulo IV.

Diversos estudios experimentales que utilizan sistemas biológicos de prueba como bacterias, roedores y cultivos de células humanas, han demostrado que la radiación, las sustancias químicas y los virus, son posibles agentes mutagénicos, es decir, causantes de mutaciones. Con respecto a las mutaciones reproductivas (mutaciones que ocurren en el óvulo o el espermatozoide), la evidencia científica se limita a los estudios en roedores, en los que se han medido la inducción de muerte fetal, las alteraciones en el color del pelo, en el esqueleto, en la estructura de los ojos y en los cromosomas de la descendencia. Los agentes conocidos capaces de producir estos efectos son algunas sustancias químicas de uso poco frecuente (por ejemplo, el metil–metano–sulfonato) y la radiación. La inducción de estos efectos es tan poco probable que para poderlos cuantificar, se requiere exponer a miles de animales al agente mutagénico estudiado.

Es evidente que los datos que se tienen de seres humanos expuestos a agentes mutagénicos no son el resultado de experimentos, sino que provienen de los casos de los individuos que han estado expuestos por razones ocupacionales, médicas, de residencia o accidentales. Los datos indican que el grupo humano más numeroso expuesto a altas dosis está formado por los sobrevivientes de los alrededores de las explosiones nucleares ocurridas en Hiroshima y Nagasaki en 1945. Estos 100 000 ciudadanos japoneses han sido evaluados a lo largo de los 44 años posteriores a su exposición a la radiación (rayos gamma y neutrones), tratando de establecer la relación dosis–respuesta correspondiente.

La dosis recibida por cada sobreviviente ha sido estimada a partir de la distancia que mediaba entre el individuo y el epicentro de la explosión. Las dosis máximas que recibieron estos individuos son de 122 rems aproximadamente (22 rads de rayos gamma y 10 rads de neutrones). Dosis mayores se produjeron en las zonas que resultaron totalmente destruidas por la acción mecánica de la explosión, donde no hubo sobrevivientes. El daño genético en la primera generación se ha determinado estudiando a los hijos de los sobrevivientes, comparándolos con las observaciones en poblaciones similares ("testigos") no expuestas a las explosiones. Los resultados de estos estudios *no han mostrado diferencias* en las frecuencias de alteraciones genéticas entre ambas poblaciones.

Esta falta de evidencia en humanos no es totalmente inesperada ya que es muy difícil establecer relaciones

causa—efecto a través de dos generaciones. Se requerirían efectos muy específicos, no causados por ningún otro agente, para poder establecer, sin lugar a duda, la correlación entre la causa y el efecto. Por ejemplo, si altas dosis de radiación causaran que los niños nacieran con dos narices, sería fácil identificar a la radiación como responsable de la mutación correspondiente. Sin embargo, la radiación solamente incrementa la frecuencia de mutaciones que se dan naturalmente en la población humana, y como este incremento es pequeño, su identificación es muy difícil.

Este es el caso del síndrome de Down (llamado popularmente mongolismo), una enfermedad genética producida por una mutación en los cromosomas de uno de los padres. Estudios epidemiológicos muestran que la frecuencia natural del síndrome de Down que es la enfermedad cromosómica más frecuente, es de 1 en 600 nacimientos, es decir que, en promedio, uno de cada 600 niños que nacen sufre la enfermedad. Esto no quiere decir que si en un hospital han nacido 599 niños sanos, el próximo tendrá que padecer este síntoma, sino que al considerar un gran número de nacimientos, por ejemplo 600 mil, lo más probable será que cerca de mil de ellos sufran la enfermedad. Y decimos "cerca" porque de 600 mil nacimientos puede haber 970 niños enfermos, o 1 025. Estas fluctuaciones son típicas de los estudios estadísticos.

Los estudios en la población japonesa irradiada encontraron tres casos de síndrome de Down entre 5 579 nacimientos en madres que habían estado expuestas a la radiación, mientras que de 9 440 nacimientos en japonesas no expuestas, 12 sufrían la enfermedad. De estos datos se puede calcular que el grupo irradiado presentó una frecuencia de un caso con síndrome de Down por cada 1 860 nacimientos, mientras que en el grupo testigo la frecuencia fue de 1 en 787. Estos datos se podrían interpretar erróneamente y sugerir que la radiación protege a la población del síndrome de Down. La explicación científica de esta aparente paradoja es que el número de casos estudiado es muy pequeño para poder extraer información precisa. Este problema de estadística se presenta en *todos* los estudios de poblaciones humanas expuestas y, se origina, en la baja probabilidad del efecto buscado.

Teniendo en cuenta lo mencionado y la posibilidad de que la radiación pudiera inducir un daño genético en la especie humana que permanezca en las generaciones futuras, los estudios experimentales se han realizado evaluando los efectos genéticos, producto de la exposición a diversas dosis de radiación en grandes poblaciones de roedores y monos, principalmente. Debemos señalar que hay diferencias notorias entre los efectos observados de una especie animal a otra y que la extrapolación de datos animales al ser humano se basa en suposiciones generalmente inciertas, ya que hay diferencias importantes en el tamaño del cuerpo, en la composición de los tejidos y en el metabolismo.

Para proteger a la población humana del posible daño genético reproductivo causado por una exposición a la radiación, sería necesario conocer cuantitativamente y con precisión el riesgo genético. Esto quiere decir, saber cuántos niños nacen con alteraciones genéticas después de que sus padres se han expuesto a una dosis conocida. Tal como lo hemos indicado, esta información no existe, por lo que estas estimaciones de riesgo se han obtenido de los experimentos con animales. Los valores calculados, y que son los que utilizan los organismos internacionales de protección radiológica, dicen que: si una población humana fuera irradiada durante 30 años (una generación) con un total de 1 rem, en cada millón de nacimientos habría entre 10 y 20 niños con alteraciones genéticas debidas a la radiación. En esta misma población nacerán 30 000 niños con desórdenes genéticos espontáneos, cuya causa es desconocida. Estos valores indican que la frecuencia natural (o basal) de enfermedades genéticas en el ser humano es del 3%, y que una exposición a 1 rem de radiación la hace aumentar al 3.002%. Esta cantidad de radiación (1 rem) es la dosis promedio que se recibiría en 30 años debido a los usos de la radiación producida por el ser humano (véase la figura 4).

Creemos necesario destacar que, si bien de los números puede concluirse que el riesgo reproductivo asociado a la exposición a la radiación es muy pequeño, el sufrimiento que acompaña a cada niño nacido con un defecto genético puede ser muy elevado. Toda exposición innecesaria a la radiación, o a cualquier otro factor mutagénico, debe ser evitada.

Efectos directos sobre el embrión

Si una mujer embarazada se expone a la radiación existe una probabilidad relativamente alta de causar serios daños al embrión que podrían llevarlo hasta la muerte y, subsecuentemente, ocasionar un aborto, o bien la aparición de malformaciones en el recién nacido (efecto llamado teratogénesis). Los estudios con animales han demostrado que la radiación produce disminución en el tamaño de la cabeza (microcefalia) y alteraciones en la formación del esqueleto del ser irradiado *in utero*. Los estudios en aquellos sobrevivientes que se encontraban *in utero* durante las explosiones de Hiroshima y Nagasaki han mostrado que tienen menor estatura, alcanzan un peso menor y sus diámetros cefálicos son inferiores a los del grupo testigo no irradiado.

Se sabe con certeza que el embrión es más sensible a los efectos teratogénicos de los virus, de algunas sustancias químicas y de la radiación, durante ciertas etapas de su desarrollo uterino. Había 22 individuos que se encontraban antes de su 18ª semana de gestación al ser irradiados en las cercanías de Hiroshima y Nagasaki. De ellos, 13 nacieron con microcefalia y 8 sufrieron retraso mental. La dosis estimada en todos estos casos fue superior a los 150 rems. Para dosis inferiores a 50 rems no se encontraron malformaciones en el grupo estudiado.

Los estudios con animales muestran que dosis tan bajas como de unos pocos rems durante etapas críticas del desarrollo embrionario pueden causar malformaciones. Ante esto, y suponiendo que los seres humanos tenemos la misma sensibilidad a la radiación que los roedores, las autoridades internacionales encargadas de la protección radiológica han recomendado específicamente que la mujer embarazada evite toda exposición innecesaria a la radiación. Si una radiografía es indispensable, deberá asegurarse que el feto reciba la mínima radiación posible usando un delantal protector de plomo. Las mujeres en edad de procrear deben tomar las precauciones necesarias para no exponerse durante las primeras semanas de un posible embarazo. Para esto, la recomendación es posponer todo examen radiográfico hasta los 10 días que siguen a la próxima menstruación, periodo en que existe la mayor probabilidad de no encontrarse embarazada.

Cáncer

El cáncer es una enfermedad que altera la división normal de las células, por lo que se producen tumores. El crecimiento descontrolado del tumor altera el funcionamiento normal del órgano en que se encuentra y puede causar la aparición de nuevos tumores en otros órganos. El factor causal del cáncer no es conocido, sin embargo, la evidencia científica indica que la producción de mutaciones en el ADN de las células desempeña un papel importante en su inicio. Como vimos en el capítulo IV, los virus, algunas sustancias químicas y la radiación ionizante, son agentes capaces de producir mutaciones.

El cáncer ocupa un lugar muy importante entre las causas de enfermedad y muerte en nuestro siglo. En México, de las 360 000 muertes que ocurren cada año, se reporta que 35 000 se deben a algún tipo de cáncer. Estos datos estadísticos indican que la probabilidad natural de muerte por cáncer en México es aproximadamente del 10 por ciento.

Altas dosis de radiación, superiores a 100 rems, pueden producir cáncer. Este efecto está bien comprobado. En el cuadro 2 se encuentra una lista de algunos de los estudios que han demostrado la asociación entre la exposición a altas dosis de radiación y el cáncer. La mayoría de estos casos ocurrieron antes que se conociera la capacidad carcinogénica de la radiación, pues actualmente ya no se realizan estas actividades o bien se encuentran reguladas por organismos de seguridad radiológica.

• Efecto de la radiación sobre el ambiente

¿Pero que daño ambiental causa la energía nuclear?

Los modelos utilizados por la industria nuclear, para estimar el impacto de las radiaciones en el cuerpo

humano, parten de un cierto nivel de daño permitido. El uso del término "nivel de seguridad" por la industria nuclear, no supone niveles de exposición inocuos para la salud, sino niveles en los cuales inversiones de prevención exceden a los gastos de curación. Es más: recientes estudios sobre poblaciones "sobrevivientes a la bomba" muestran, que la exposición a ciertas radiaciones puede ser mucho más peligrosa de lo presentado en dichos modelos oficiales.

Con frecuencia se intenta minimizar el impacto de la radioactividad artificial, comparándola con el nivel de radiación ambiental natural. El comportamiento químico y biológico de los radioisótopos artificiales provoca su concentración en la cadena alimenticia, o en ciertos órganos, en mayor grado que los naturales. Los organismos vivientes nunca tuvieron que evolucionar para soportar tales sustancias. Por tanto, su presencia supone un riesgo mucho mayor de lo que muestra una comparación simplista de su radioactividad.

En relación a la contaminación nuclear, no se puede recalcar suficientemente que lo que cuenta, biológicamente, es la suma a través del tiempo de todos los daños de todas las fuentes y eventos combinados que liberan venenos persistentes (radioactivos u otros) a la biosfera... Cada aporte a esta suma importa.

Como parte de su operación normal, la producción nuclear libera radioactividad venenosa en el aire, tierra y agua. Las sustancias radioactivas emiten partículas alfa y beta y rayos gamma, los que pueden dañar a las células vivas. Una alta dosis de radiación puede conducir a la muerte en cuestión de días o semanas, y se sabe ahora que las dosis bajas de radiación son mucho más dañinas para la salud de lo que se pensaba anteriormente. La exposición prolongada a la llamada radiación de bajo nivel puede causar problemas graves y perdurables a la salud humana, tanto para las personas expuestas como para su descendencia.

A pesar de algunas informaciones de la industria nuclear, nunca ha sido científicamente demostrada la inocuidad de ninguna dosis radiactiva, por baja que sea. En otros términos: *No existe un nivel de exposición radiactiva que pueda considerarse seguro*. Como ejemplo, la radiación natural de fondo de zonas de roca granítica, que suele ser superior a la normal, se supone causante del incremento de ciertas enfermedades. No es difícil deducir que cualquier incremento a esta radiación natural inevitable no puede producir más que riesgos añadidos. *Cuando la industria nuclear afirma que escapes nucleares no afectan a la salud, está simplemente, saltando a la verdad.*

Los trabajadores de la industria nuclear, sus hijos y los vecinos de las instalaciones nucleares en todo el mundo sufren tasas mucho mayores que la población en general de cáncer, defectos congénitos y disfunciones del sistema inmunológico. Nuevos estudios que han investigado las causas de un aumento global del cáncer de mamas en las mujeres muestran que el tejido de las mamas es particularmente propenso a desarrollar cáncer a causa de la exposición a la radiación. Esta también está reconocida como causante del cáncer a la próstata y al pulmón.

Lo trágico es que el daño genético que ocasiona la radiación puede pasar de una generación a otra, afectando potencialmente a la descendencia de todas las especies.

Con frecuencia se intenta minimizar el impacto de la radioactividad artificial comparándola con el nivel de radiación ambiental natural.

Este enfoque de la cuestión ignora las diferencias existentes entre algunos importantes radioisótopos artificiales y los de origen natural. El comportamiento químico y biológico de dichos radioisótopos artificiales es tal que se concentran en la cadena alimenticia, ó en ciertos órganos, en mayor grado que los naturales.

Los organismos vivientes nunca tuvieron que evolucionar para soportar tales sustancias. Por tanto, su presencia podría suponer un riesgo mucho mayor de lo que puede dar a entender una simplista comparación de su radioactividad.

Además existe otra diferencia entre la radiactividad artificial y la natural. Mientras que las fuentes de ésta se encuentran en cierto modo uniformemente repartidas, *la radiactividad artificial se genera de forma puntual*. Las informaciones sesgadas sobre dosis promediadas sobre la población, no dan idea de las situaciones locales, del mismo modo que las cifras de promedios de lluvia caída no permiten predecir la distribución de lluvias en los próximos días.

A pesar de que sólo una pequeña parte de la dosis promedio individual pública tenga origen en la industria nuclear, entre los miembros de ciertos *grupos de riesgo* (personas que por su lugar de trabajo vivienda, ó por alimentos que consumen, son más susceptibles de esta sometidas a radiaciones), las dosis de origen artificial pueden estar muy por encima de la media. Las dosis individuales de este origen pueden doblar, permisivamente, las de origen natural (aunque estas cifras pueden quedar diluidas dentro de los promedio sobre el total de la población). Así el riesgo de enfermedades inducidas por la radiactividad puede incrementarse hasta un 50%. Naturalmente no se incluyen los efectos de escapes radiactivos a gran escala como los ocurridos en Windscale en 1957 y en Chernobyl en 1986.

En la explotación comercial de la energía nuclear, que para las centrales de agua ligera hoy y considerar distintas fases: de las cuales, utilización del uranio es lo que produce menos efectos medioambientales.

Los tipos de contaminación que producen las centrales son dos: radiactividad y contaminación térmica.

- La *contaminación térmica* es común a las centrales térmicas convencionales, pero en el caso de las centrales nucleares aún es más importante, ya que al ser menor la temperatura y la presión del vapor producido también lo es el rendimiento térmico.
- La *contaminación radiactiva* representa el principal problema de los nucleares, pero las seguridades del diseño, construcción y explotación, impiden que las radiaciones de estas plantas tengan incidencia apreciable en el medio ambiente.

Un reactor de fisión produce tres tipos de sustancias o material radiactivo: productos de fisión, de activación y actinidos. La emisión de este tipo de materiales comporta riesgos de irradiación y la seguridad de la industria nuclear depende de que estas emisiones se controlen a un nivel, de forma que no produzca una gran acción en el medio ambiente.

En resumen, el mayor problema que presenta la utilización de la energía nuclear es el del tratamiento, manejo, almacenamiento de los residuos radiactivos, especialmente el de los de alta radiactividad.

El hecho básico es que la radiactividad produce riesgos reales par la salud, las fugas rutinarias por vía aérea o acuática de las instalaciones nucleares incrementan estos riesgos, mientras que las propias instalaciones son una permanente amenaza de accidentes y de proliferación de materiales nucleares.

¿Y que pasa con los accidentes nucleares?

Los accidentes nucleares, como los de Chernobyl (Ucrania), Three Mile Island (Estados Unidos) o el más reciente de Tokaimura (Japón), han sido verdaderas advertencias de lo que puede suceder si esta energía se escapa de control.

La central nuclear de Chernobyl se terminó de construir en Diciembre de 1983 y está formada por cuatro reactores de tipo BRMK.

Actualmente existen en los países del Este 15 reactores como el de Chernobyl, del tipo BRMK, y tienen como ventajas el bajo grado de contaminación radiactiva en operación normal y el uso de el agua como refrigerante y el grafito como moderador. Pero estos dos aspectos favorables han sido los que han llevado a dos decisiones

que han influido negativamente en las consecuencias de un accidente, que no había sido postulado en la forma en que se ha desarrollado.

Las primeras noticias de que había ocurrido un accidente nuclear de importancia se tuvieron días más tarde como consecuencia de la detección en Suecia de niveles anormalmente altos en la medición de la radiación ambiental.

La primera hipótesis que se apuntó fue que los soviéticos habían realizado en secreto la explosión de algún arma nuclear, pero se descartó, ya que los sismógrafos no habían detectado ningún movimiento anormal y el análisis del aire anunciaba la presencia de isótopos de cobalto, yodo y cesio, que no se encuentran en las armas nucleares y sí en las centrales nucleares. Se realizó un análisis meteorológico para prevenir de donde podía venir la nube radiactiva y se vio que casi con total seguridad provenía de alguna de las centrales soviéticas instaladas en Ucrania. La radioactividad había volado casi 2000 Km. antes de ser detectada, cuando normalmente la nube radiactiva se extingue en 100 o a la suma 200 Km.

El suceso ocurrió en la noche del 25 al 26 de Abril de 1986. Entonces y con motivo de una revisión ordinaria de mantenimiento, los técnicos pretendieron realizar una experiencia, en el cuarto grupo de la central nuclear, que tenía como objeto comprobar cuanto tiempo podía generar electricidad una turbina a la que se hubiese cortado la afluencia de vapor. Para ello, los técnicos bajaron la potencia del reactor. Dicha bajada de potencia conlleva la posibilidad de que los sistemas automáticos de protección del reactor entraran en funcionamiento y detuvieran la experiencia, por lo que los operarios de la planta desconectaron sistemas vitales de seguridad.

En medio de la experiencia se produjo una súbita elevación de potencia que provocó fragmentación del combustible, una generación masiva de vapor y la reacción del agua de refrigeración con el circonio de las vainas de combustible produciendo un gas inflamable: el hidrógeno. La presión rompió el reactor y el hidrógeno reaccionó con el oxígeno, provocando una tremenda explosión.

Se tardaron 4 días en apagar el incendio de la instalación y evitar que se propagara hasta la unidad 3 de la central nuclear. Después de eso se resolvieron las tareas más urgentes: atajar el incendio que dispersaba más y más materiales radiactivos, evitar que el núcleo fundido entrara en contacto con aguas subterráneas y multiplicara la dimensión de la tragedia y atajar en lo posible la contaminación de las aguas de bebida. En todo esto tardaron casi 25 días.

Las cifras oficiales del gobierno ucraniano se cifraban en más de 100000 las víctimas mortales, sin embargo la conferencia de la OMS considera que la cifra de muertos se encuentra entre 8000 y 10000 personas.

La OMS distingue 3 tareas de trabajo para mitigar en lo posible los efectos del accidente:

- 1– Problemas psicológicos por el cambio de vida y el temor a las consecuencias de la radiación.
- 2– Cánceres infantiles de tiroides, que se han revelado como uno de los efectos más claros, más dolorosos y más intensos.
- 3– Los cánceres futuros en niños y adultos y enfermedades debidas a la radiactividad.

En el presente, los niveles de radiación en la zona de Chernobyl son enormes. Se han registrado mutaciones en algunos animales como vacas y ratones de campos. En el caso de estos últimos se han encontrado cambios en el ADN que habrían tardado unos 10 millones de años en producirse de forma natural. El material genético de un ratón normal se diferencia del de estos ratones mutantes más que del de las ratas. Hay que tener en cuenta que los ratones y las ratas divergieron en la evolución hace unos 15 millones de años.

Las razones de exclusión y control situadas a radios de 30 y 120 Km. respectivamente en torno a la central, se

han revelado insuficientes al encontrarse concentraciones de radioisótopos superiores a las previstas.

El número de ciudadanos considerados oficialmente como víctimas asciende a más de 3 millones de personas, de las cuales 350000 son liquidadores (las personas que trabajaron con la descontaminación) y 900000 niños. En la actividad todavía viven en zonas contaminadas dos millones y medio de personas de las cuales un 22% eran niños.

En general, la gente ha sufrido mucho, no sólo por las consecuencias del accidente en sí, sino también por el proceso de control radiológico, descontaminación y evacuación, que les ha obligado a abandonar sus casas y sus formas de vida.

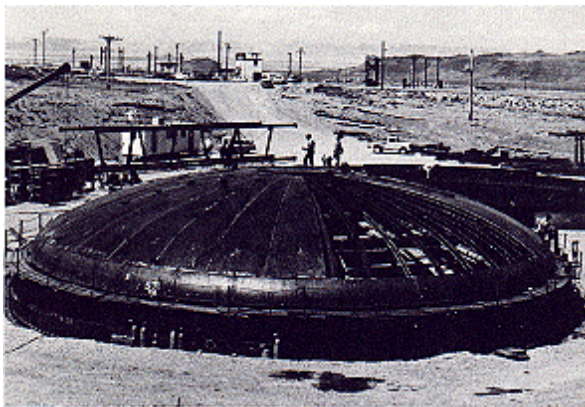
Los pronucleares justifican sus posturas afirmando que el accidente fue la culminación de un estado de carencia de información de la campaña de programa nuclear en la URSS, y que accidentes como éste sólo ocurren y ocurrirán en estas centrales nucleares, ya que las occidentales son más seguras y modernas.

Desde el punto de vista de los detractores el accidente de Chernobyl es el más grave pero no el único: Sosnovi Bor, Harrisburg, Windscale,... y Valdellós. La energía nuclear tiene poco más de 50 años y los residuos de alta actividad serán peligrosos durante más de cien mil años. No creen que haya valido la pena el cambio de estos cien mil años a cambio de 50 de obtener energía, que además se podría obtener por medios más limpios.

Los diseños de los reactores denominados intrínsecamente seguros no han superado la etapa de investigación. Las desventajas inherentes, tanto económicas como de seguridad, están todavía por experimentar, ya que aún no ha sido diseñada la versión comercial de estos reactores. Confiar toda una política a reactores, todavía sin probar, sería como volver atrás en el tiempo a los comienzos del desarrollo de la primera generación de reactores, para caer, probablemente, en los mismos errores.

Aún sin considerar la posible ocurrencia de otros accidentes nucleares, la cantidad total de desechos radioactivos producidos por la electricidad nuclear y el reprocesamiento de combustible, es ya uno de los principales problemas del medio ambiente mundial.

¿Y los desechos?



Los residuos nucleares son también un problema: ¿dónde ponerlos sin que produzcan riesgos de contaminación?

Los residuos radiactivos se pueden clasificar de muy diversas maneras: en función de su estado físico, tipo de radiación que emiten, actividad específica, etc. Lo normal es verlos clasificados en residuos de *baja, media y alta actividad*.

Los de *baja y media actividad* emiten radiactividad durante periodos de tiempo que pueden alcanzar los centenares de años. Existe una gran diversidad de materiales que pueden llegar a ser residuos de este tipo: guantes, ropa, herramientas, etc... que hayan estado en contacto con material altamente radiactivo, hasta materiales procedentes de la clausura de instalaciones nucleares.

Los residuos de *alta actividad* son mucho más peligrosos. Emiten radiaciones durante miles de años (hasta millones de años) y tienen una toxicidad muy elevada.

Entre estos residuos se encuentra el *Plutonio-239*, de una tremenda toxicidad, un gramo de este elemento es capaz de causar cáncer a un millón de personas. Además emite una radiactividad durante 2500000 años (50 veces más tiempo que la historia conocida de la Humanidad) lo cual hace pensar en las muchísimas generaciones, aún por venir, que tendrán que soportar el legado irresponsable de los residuos radiactivos.

La producción de armas nucleares en Estados Unidos ha generado cerca de cuatro millones de metros cúbicos (140 millones de pies cúbicos) de combustible usado, desperdicio de alto nivel, desperdicio transuránico, y desperdicio de bajo nivel. (No incluidos en ese total están cantidades aún más grandes de desperdicios radioactivos del minado y procesamiento de uranio y tierra contaminada por desechos en el subsuelo. Desperdicios peligrosos no-radioactivos y desperdicios sólidos han sido también generados en grandes cantidades. Por volumen, los desperdicios TRU constituyen menos del seis por ciento del legado de desperdicios nucleares y sólo alrededor de un tercio de estos desperdicios TRU almacenados son recuperables y por lo tanto pueden ser empacados y enviados a WIPP. La gran mayoría de los desperdicios fueron desechados en zanjas hasta 1970. Ya que existen tan solo algunos récords confiables de aquellos desperdicios enterrados, los volúmenes exactos y composición de aquellos materiales no es conocido. Pero algunos de los desperdicios enterrados han migrado en la tierra y en algunos casos hacia aguas subterráneas, representando una amenaza significativa porque no están resguardados.

Los sitios donde se construyen los reactores nucleares resultan contaminados en forma permanente, y los desechos radioactivos que producen contaminan cualquier lugar donde se depositen, liberen o almacenen. Tampoco es posible disponer de ellos; únicamente pueden ser almacenados o abandonados.

Los activistas antinucleares han criticado enérgicamente el traslado de estos residuos, que también han sido argumento para enfrentamientos entre el norte y el sur.

Más de una vez se han denunciado el traslado de la basura nuclear hacia países en vías de desarrollo, alimentando así la polémica y los problemas políticos de la aplicación de la energía nuclear.

Todos esos residuos, en diferente grado, presentan además riesgos graves para la salud humana. Muchos de los radio isótopos contenidos en los desechos nucleares tienen tan larga vida (cientos de miles de años) que es imposible asegurar que contenedores artificiales, o formaciones geológicas naturales evitarán su paso al ambiente habitado, hasta que se haya degradado su radiactividad a niveles naturales.

Las barras de combustible de uranio enriquecido, luego de ser utilizadas durante tres años en un reactor, se vuelven aproximadamente un millón de veces más radioactivas que cuando fueron cargadas por primera vez. La industria nuclear le llama combustible gastado y la ley exige que éste sea almacenado en forma segura para siempre. Sin embargo, los gobiernos y las empresas han continuado desarrollando y utilizando irresponsablemente la energía nuclear, aunque no se sabe cómo almacenar los desechos resultantes de una manera segura.

La producción continuada de estos residuos, está generando incalculables riesgos para la salud, y dejando tremendas responsabilidades a las generaciones futuras. Es imposible eliminar la radioactividad de dichos residuos. Tras 40 años de electricidad nuclear, la industria no ha conseguido un método que garantice un

control seguro. No existe solución técnica para el problema de los desechos radioactivos. La única alternativa es detener su producción inmediatamente.

Todos los reactores de energía nuclear y los sitios de almacenamiento de cantidades de material radioactivo podrían ser tan peligrosos como la explosión de armas nucleares. Si llegara a ser objeto de actividades terroristas, bombardeo militar o sabotaje, el material radioactivo podría ser diseminado en una vasta y devastadora escala.

Se cree que para este año, la industria nuclear habrá generado 201,000 toneladas de barras de combustible irradiadas (usadas) altamente radioactivas. Si se incluyen los residuos líquidos y sólidos, los residuos de uranio y todo aquello con que han estado en contacto, el volumen es, por supuesto, mucho mayor.

Se han propuesto muchas ideas para su disposición final, pero ninguna de ellas ha resultado ni remotamente suficiente. Uno de los problemas es que el plutonio presente en los residuos permanecerá radioactivo por hasta 240,000 años (12,000 generaciones) o más. Durante todo ese tiempo, deberá ser aislado de todo organismo viviente y del agua, suelo y aire del que éstos dependen.

La industria nuclear no sabe qué hacer con estos letales residuos que se van acumulando en las centrales y hasta de resolver su problema procurando sobre todo solucionarlo de la manera más barata para ellos, aunque resulte perjudicial para el medio ambiente.

Durante muchos años la industria nuclear estuvo vertiendo residuos nucleares al mar, lo que llevó al Greenpeace a oponerse a tal contaminación del medio marino de forma activa, durante largo tiempo hasta que en 1983 se logró imponer una *moratoria internacional* para este tipo de vertidos (generalmente aceptada, aunque ha sido violada por algunos países). Otra práctica irresponsable es exportarlas a los países del tercer Mundo.

A excepción de ciertas cantidades que enviaran a reprocesar al Reino Unido en los años 70, y del combustible utilizado por Vandellós I – cerrada definitivamente tras el accidente– que también se enviaba a Francia, los residuos de alta actividad, se almacenan de momento en las propias centrales nucleares en las piscinas de residuos.

En la actualidad la política favorita de la mayoría de los países nucleares es enterrar profundamente bajo tierra los desechos. Sin embargo, las cambiantes capas freáticas, los terremotos y otros factores geológicos podrían finalmente perturbar los desechos enterrados y conducir a una contaminación del suelo, el agua y el aire. No existe ningún contenedor que dure tanto tiempo como la radioactividad de su contenido. Tampoco podemos confiar en que nuestros descendientes no excaven en los sitios de entierro dentro de cientos de miles de años, ya sea por curiosidad o por simple falta de información.

Ninguno de los 44 países que poseen reactores nucleares tiene una solución al problema de los desechos. Entretanto, éstos se guardan en instalaciones de almacenamiento temporales o se entierran en fosas de poca profundidad. Se han vertido residuos directamente sobre la tierra, los lagos y los océanos del mundo (por ejemplo: en el Mar Irlandés cerca de Sellafield, Inglaterra; en el Océano Pacífico cerca de las Islas Farallones frente a la costa de San Francisco, California; y en el Lago Karachay, cerca de Chelyabinsk, Rusia).

Un creciente número de sitios ha sido abandonado por los humanos debido a la contaminación radioactiva. Sin embargo el viento y el agua, los microbios, los insectos, las semillas, las aves y otras formas de vida que no pueden leer los letreros de advertencia se mueven libremente de un nicho ecológico a otro. La cuestión de cómo aislar a la radioactividad de la vida en forma duradera permanece sin respuesta.

Más aún, después de retirar las barras de combustible irradiadas, los edificios de los reactores quedan altamente contaminados. En Estados Unidos, la ley exige que las empresas energéticas dismantelen los

reactores antiguos y que limpien los sitios. Aunque se exige a las compañías que reserven fondos para este fin, hasta ahora ningún reactor ha sido completamente desmantelado. Los costos y riesgos reales de este proceso permanecen desconocidos.

La industria nuclear quiere librarse del problema de sus residuos de alta actividad construyendo cementerios nucleares en formaciones geológicas profundas.

Un **cementerio** en profundidad **de residuos radiactivos** es una instalación que se construiría a varios centenares de metros de profundidad en una formación geológica (granito, sal o arcilla) donde se encerrarían los residuos radiactivos, lo cual no es un método seguro ni fiable de inmovilizar y aislar los residuos nucleares del medio ambiente.

En un almacenamiento de residuos nucleares de este tipo aparecerán una serie de graves problemas, por ejemplo el de los gases (algunos explosivos, como el hidrógeno) que los residuos generan en un depósito subterráneo. No se conoce la forma de ventilar los gases sin que se produzca simultáneamente una vía de escape para las sustancias radiactivas.

Por otro lado, las rocas situadas bajo cualquier formación geológica tienen un gran número de fallas y nunca será posible identificarlas todas, con lo que es imposible comprender con exactitud como circula el agua subterránea o predecir como saldrán fuera del depósito las sustancias radiactivas.

La idea básica sobre el almacenamiento será un vertido hermético, que una vez cerrado no requiera posterior intervención humana. Sin embargo de esta manera sería imposible recuperar un contenedor que tuviese fugas.

La industria nuclear no puede ofrecer garantías de la conveniencia de ninguna formación geológica para el proyecto que tienen en mente. La industria admite libremente que todas las barreras construidas por el hombre para este tipo de almacenamiento fallarán con el tiempo. No pueden ofrecer garantía alguna de que la roca que los rodea puede contener la radiactividad emitida por los residuos, e impedir que ésta contamine el ambiente. No ofrecen garantías de que si algo va mal serán capaces de solventarlo.

Pero los riesgos anteriormente mencionados no son los únicos que existen. Aunque la radiactividad de los residuos enterrados pueda tardar tiempo en alcanzar el medio ambiente, existen otros riesgos mucho más inmediatos: Los derivados del *transporte de los residuos*, sin preparación y los relacionados con el *vertedero en sí mismo*.

Ningún vertedero nuclear es seguro. Al menos tres cementerios para estos residuos de baja actividad ya establecidos en los Estados Unidos han sufrido fuerte fugas.

El cementerio nuclear de Carlsbas, en Nuevo México, construido por el Departamento de Energía de Estados Unidos ha experimentado problemas geológicos, incluso antes de ser abierto.

Nuestros descendientes enfrentarán los peligros y correrán con los costos de desactivar los reactores nucleares del mundo. También tendrán que protegerse virtualmente para siempre de las miles de toneladas de residuos radioactivos que la industria ya ha producido.

Desde la primera división del átomo, ha habido ciudadanos y funcionarios públicos preocupados que han denunciado los peligros del desarrollo de la energía nuclear. Una mayor conciencia acerca del problema de los residuos nucleares ha fortalecido los esfuerzos de los grupos ciudadanos por detener la energía nuclear e implementar alternativas energéticas seguras.

No existe solución técnica adecuada para el problema de los residuos. La única respuesta es no producir más residuos.

Hoy en día existen muchas legislaciones acerca del manejo de los desechos radioactivos uno de esos es La Agenda 21, La Agenda 21 constituye un manual de referencia para la determinación de políticas empresariales y gubernamentales, así como para la adopción de decisiones personales con las que nos adentraremos en el próximo siglo. Este documento fue suscrito en la *Cumbre de la Tierra*, la más vasta reunión de dirigentes mundiales, que se celebró en (el mes de junio) de 1992, en Río de Janeiro (Brasil). Asistieron a esta reunión, organizada durante la *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*, los jefes o los más altos representantes de los Gobiernos de 179 países, junto con cientos de funcionarios de los organismos de las Naciones Unidas, de representantes de gobiernos municipales, círculos científicos y empresariales, así como de organizaciones no gubernamentales y otros grupos. Paralelamente, en el contexto del Foro Mundial '92, tuvieron lugar diversas reuniones, charlas, seminarios y exposiciones públicas sobre cuestiones relativas al medio ambiente y al desarrollo, a las que acudieron 18,000 participantes de 166 países y unos 450,000 visitantes. Cerca de 8,000 periodistas se informaron acerca de las reuniones en Río de Janeiro, y los resultados se dieron a conocer en todo el mundo por medio de la prensa, la radio y la televisión.

• Beneficios del uso de la radioactividad:

La datación.

Los métodos para la datación se fundamentan en el decrecimiento progresivo, en tiempos bien definidos, de la radioactividad de isótopos contenidos en los vestigios. El carbono 14 se utiliza especialmente para determinar la edad de los objetos de menos de 50.000 años.

Otros métodos de datación, que utilizan de forma complementaria diferentes isótopos, permiten definir una edad para los acontecimientos que describen la historia de la tierra, de su clima y de los seres vivos que la han habitado hasta nuestros días.

Principio de la datación con el ^{14}C

El gas carbónico presente en la atmósfera contiene carbono 12 estable y una proporción muy reducida de carbono 14 radioactivo, de 5730 años de período, formado continuamente por la radiación cósmica. El gas carbónico se intercambia de forma permanente entre la atmósfera y el mundo vivo (respiración, fotosíntesis).

Cuando muere un organismo, el carbono 14 ya no se renueva. Como este isótopo se desintegra, su proporción en relación con el carbono 12 empieza a disminuir y constituye así una especie de reloj. Cuando menos carbono 14 queda en la muestra, más antigua es dicha muestra.

El trazado isotópico en biología y en medicina

Los diferentes isótopos de un elemento tienen las mismas propiedades químicas. El reemplazo de uno por otro en una molécula no modifica, por consiguiente, la función de la misma. Sin embargo, la radiación emitida permite detectarla, localizarla, seguir su movimiento e, incluso, dosificarla a distancia. El trazado isotópico ha permitido estudiar así, sin perturbarlo, el funcionamiento de todo lo que tiene vida, de la célula al organismo entero.

En biología, numerosos adelantos realizados en el transcurso de la segunda mitad del siglo XX están vinculados a la utilización de la radioactividad: funcionamiento del genoma (soporte de la herencia), metabolismo de la célula, fotosíntesis, transmisión de mensajes químicos (hormonas, neurotransmisores) en el organismo.

Los isótopos radioactivos se utilizan en la medicina nuclear, principalmente en la imágenes médicas, para estudiar el modo de acción de los medicamentos, entender el funcionamiento del cerebro, detectar una anomalía cardíaca, descubrir las metástasis cancerosas, etc.

Las radiaciones y la radioterapia

Las radiaciones ionizantes pueden destruir preferentemente las células tumorales y constituyen una terapéutica eficaz contra el cáncer, la radioterapia, que fué una de las primeras aplicaciones del descubrimiento de la radioactividad.

En Francia, entre el 40 y el 50% de los cánceres se tratan por radioterapia, a menudo asociada a la quimioterapia o la cirugía. La radioactividad permite curar un gran número de personas cada año.

Las diferentes formas de radioterapia

La curioterapia utiliza pequeñas fuentes radioactivas (hilos de platino – iridio, granos de cesio) colocados cerca del tumor.

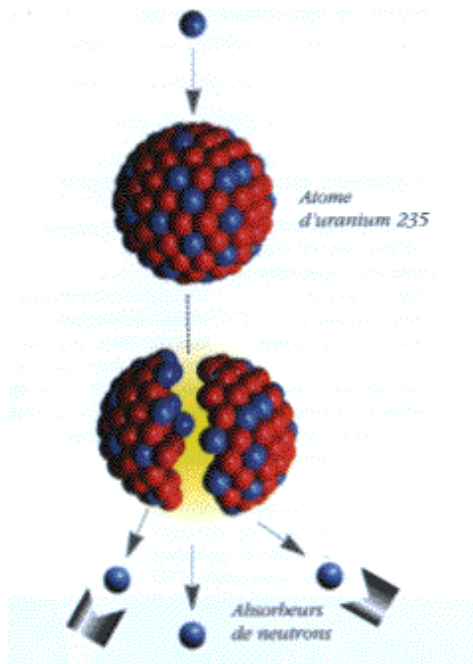
La telerradioterapia consiste en concentrar en los tumores la radiación emitida por una fuente exterior.

La inmunorradioterapia utiliza vectores radiomarcados cuyos isótopos reconocen específicamente los tumores a los que se fijan para destruirlos.

La energía nuclear

Después de haber entendido lo que es la radioactividad natural y después de haber observado la estructura muy compleja de los núcleos, los físicos han tratado de comprender de dónde procede su gran cohesión y su fuerte densidad.

El estudio de las considerables fuerzas en juego, ha demostrado que se podría extraer una gran cantidad de energía. Del mismo modo que la unión de los átomos en moléculas es la fuente de la energía química, la unión de los protones y neutrones por fuerzas nucleares es la fuente de la energía nuclear, de lejos la más concentrada. ésta puede ser liberada mediante fisión o mediante fusión.



La fisión:

Decimos que un núcleo pesado sufre una fisión cuando se fragmenta, de forma espontánea o provocada, en

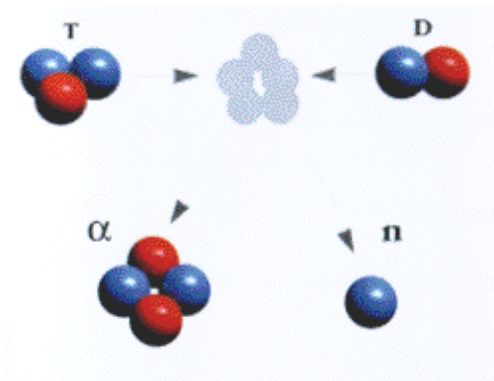
dos o varios núcleos más ligeros, emitiendo neutrones. Estos neutrones pueden a su vez provocar otras fisiones y así sucesivamente en una reacción en cadena, que libera una gran cantidad de energía. En las centrales nucleares la reacción en cadena es controlada, es decir, que no puede dispararse fuera de control. En las bombas atómicas de fisión o bombas A se busca, en cambio todo lo contrario, es decir la ampliación del efecto.

La energía de fisión

La masa total de los productos de fisión y de los neutrones emitidos es inferior a la masa del núcleo inicial. La diferencia de masa o defecto de masa ha sido transformada en energía según la célebre fórmula de Einstein $E = mc^2$. La fisión de todos los núcleos de un kilogramo de uranio 235 produce tanta energía como la combustión de 2.500 toneladas de carbón.

Núcleo de uranio 235, absorbedor de neutrones

La fusión:



Dos núcleos isótopos ligeros (isótopos de hidrógeno, por ejemplo) pueden, fusionándose uno en el otro, formar un núcleo más pesado, como el helio, liberando una gran cantidad de energía. La reacción de fusión se produce a una temperatura muy alta, del orden de 200 millones de grados. Por esta razón se dice que la fusión es una reacción termonuclear. Tales reacciones se producen en el sol y las estrellas. Son las utilizadas en la bomba H (bomba de hidrógeno).

La energía de fusión

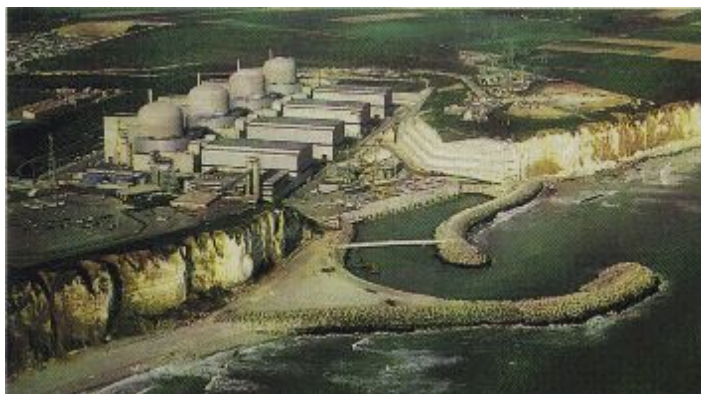
En una reacción de fusión, la masa del núcleo final es inferior a la suma de las masas de los dos núcleos iniciales. Este defecto de masa, cotejado a un mismo número de nucleones, se traduce en una liberación de energía aún más elevada que la que puede dar una reacción de fisión. La fusión de todos los núcleos de un kilogramo de una mezcla de deuterio y de tritio produciría tanta energía como la combustión de 10.000 toneladas de carbón.

La fusión controlada

Los físicos trabajan en el control de la reacción de fusión que podría constituir en el futuro una nueva fuente de energía. La fusión termonuclear controlada es un reto tan importante para la humanidad que ha sido objeto del único programa de investigación que reúne a todos los países que han alcanzado un alto nivel de desarrollo científico y técnico: el proyecto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). La fotografía representa el interior de la cámara toroidal del dispositivo supraconductor "Tore supra", construido en Cadarache (CEA) en el marco del programa EURATOM, para estudiar la fusión controlada por confinamiento

magnético.

La producción de electricidad



Las reacciones en cadena de fisión del uranio se utilizan en las centrales nucleares que, en Francia, producen más del 75% de la electricidad.

El ciclo del combustible nuclear

En un reactor, la fisión del uranio 235 provoca la formación de núcleos radioactivos denominados productos de fisión. La captura de neutrones por el uranio 238 produce un poco de plutonio 239 que puede proporcionar también energía por fisión.

Sólo una ínfima parte del combustible colocado en un reactor se quema en la fisión del núcleo. El combustible que no ha sido consumido y el plutonio formado se recuperan y se reciclan para producir de nuevo electricidad. Los otros elementos formados en el transcurso de la reacción se clasifican en tres categorías de residuos en función de su actividad, para ser embalados y luego almacenados.

La seguridad nuclear

La utilización de la fantástica fuente de energía contenida en el núcleo de los átomos implica el respeto riguroso de un conjunto de reglas de seguridad nuclear que permita asegurar el correcto funcionamiento de las centrales nucleares y la protección de la población.

Los residuos nucleares

Toda clase de actividad humana genera residuos. La industria nuclear no es una excepción a esta regla. Francia produce, de promedio, por año y por habitante:

- 5.000 Kg de residuos, de los cuales
- 100 Kg de residuos tóxicos, que incluyen
- 1 Kg de residuos nucleares del cual
- 5 gr de residuos son de alta actividad.

No sabemos aún destruir los residuos radioactivos. Su actividad disminuye naturalmente en el tiempo, más o menos rápido en función de su período. Deben utilizarse, por consiguiente, técnicas de confinamiento y de almacenamiento.

La reducción del volumen y de la actividad de los residuos radioactivos es, en Francia, un objetivo prioritario para la investigación. La amplitud del comportamiento a largo plazo de los residuos acumulados también es

un eje primordial en la investigación.

La gestión de los residuos radioactivos

Los residuos radioactivos se clasifican en función de dos criterios:

Su nivel de actividad, es decir, la intensidad de la radiación emitida, que condiciona las protecciones que han de utilizarse contra la radioactividad,

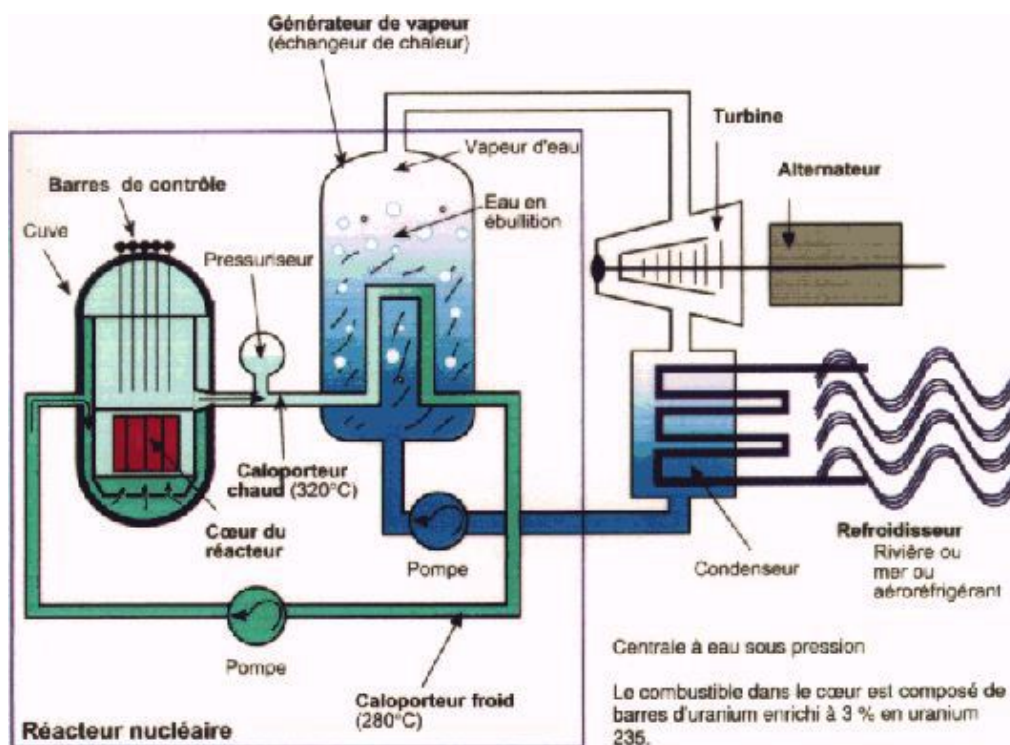
Su período radioactivo, que permite definir la duración de su efecto nocivo potencial.

Los residuos de vida corta y media actividad representan el 90% de los residuos radioactivos producidos en Francia y pierden casi toda su actividad en menos de 300 años; se envasan para reducir lo más posible su volumen y se colocan dentro de contenedores de acero o de hormigón, en los que la radioactividad está bien confinada, y luego se almacenan en la superficie.

Los residuos de vida larga y/o alta actividad sólo representan el 10% de los residuos radioactivos pero su fase de decrecimiento alcanza miles de años; se incorporan en alquitrán o vidrio; como para los residuos de vida corta, su futuro en Francia está regido por una ley votada en 1991; una de las opciones estudiadas es el almacenamiento en formaciones geológicas profundas, donde su evolución será controlada; esperando una decisión, se envasan y almacenan en superficie, en La Haga o en Marcoule, en buenas condiciones de seguridad.

Reactores de fisión:

En los reactores de agua bajo presión (REP), actualmente los más extendidos, la energía procede de las reacciones de fisión del uranio 235; el agua bajo presión del circuito primario sirve para retardar los neutrones y para evacuar el calor del centro. El agua produce vapor de agua en el circuito secundario y este vapor de agua acciona una turbina bajo presión que acciona el eje del alternador, generador de la electricidad.



En los reactores a neutrones rápidos se utiliza también como combustible el uranio 238, que representa el 99,3% del uranio natural.

- **Aplicaciones**

Medicina

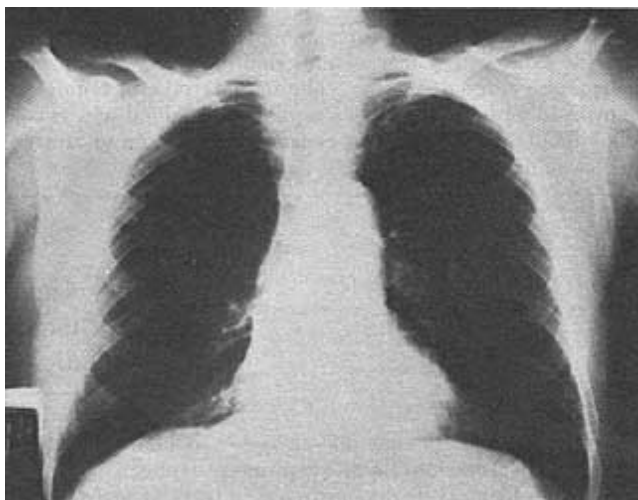
LA MEDICINA es el área que más se ha beneficiado con las propiedades de la radiación. En este capítulo se explican algunas de las múltiples técnicas de diagnóstico y de tratamiento de enfermedades en que se usa radiación. Se describen las bases físicas de las radiografías, la medicina nuclear y la radioterapia, así como sus principales ventajas clínicas. Debido a que la cantidad de radiación necesaria para la mayoría de los exámenes de diagnóstico o los tratamientos de radioterapia es mucho mayor que la de los niveles naturales, es en los usos médicos donde mejor se aprecia la necesaria evaluación que se establece entre los riesgos y los beneficios inherentes a cualquier uso de la radiación.

Radiografías

Comencemos refiriéndonos al uso más general de radiación en medicina, *las radiografías*, es decir el uso de los rayos X para exámenes de diagnóstico (conocido como radiodiagnóstico). Los rayos X son producidos en un tubo de vidrio al vacío que se encuentra en el interior del aparato metálico frente al cual se ubica al paciente. Después de que se produce la radiación, se transmite en línea recta y a la velocidad de la luz, penetra el cuerpo del paciente, lo atraviesa, sale por el otro lado, y se encuentra con una placa radiográfica (similar en muchos aspectos a una película fotográfica) donde quedará grabada una imagen anatómica del interior del cuerpo.

¿Cómo se forma la imagen del interior? Al atravesar el cuerpo del paciente, los rayos X son absorbidos más fuertemente por los huesos que por el tejido blando, de manera que al salir, aquellos rayos que en su camino encontraron huesos han sido debilitados (atenuados) más que aquellos que sólo debieron atravesar tejido sin hueso. La diferente atenuación queda registrada en la película radiográfica con diferentes niveles de iluminación y de sombra, consiguiéndose una imagen del interior.

Radiografía de tórax.



El mayor contraste (diferencia entre zonas claras y zonas oscuras) se obtiene entre la imagen de los huesos y la del tejido blando. Pero diferentes estructuras musculares no aparecen tan claramente diferenciadas y para visualizarlas se ha ideado introducir al cuerpo humano sustancias que causan fuerte atenuación de los rayos X.

Es así como se logra observar todo el aparato digestivo, el urinario, el respiratorio y el cardiovascular. Al introducir sustancias radioopacas (el bario, entre otras) al torrente circulatorio, se pueden visualizar en la radiografía los vasos sanguíneos del riñón, cerebro, etcétera.

En los últimos cuarenta años se ha logrado obtener imágenes radiográficas de sólo un plano del cuerpo, ya sea transversal o longitudinal. A esta técnica se la llama *tomografía*. Si la imagen es de un plano transversal, es decir perpendicular al eje vertical del cuerpo, y su análisis se realiza con una computadora, la técnica se conoce como tomografía axial computarizada (TAC). Para conseguir estas imágenes se utiliza un tubo de rayos X giratorio que da una vuelta alrededor del paciente, en el plano de interés, emitiendo radiación que atraviesa el cuerpo desde muchísimos ángulos. La absorción del haz para cada ángulo se mide con detectores electrónicos que giran al otro lado del cuerpo, al unísono con el tubo emisor. Hace más de diez años, un examen TAC se tardaba un par de minutos; actualmente, los modelos más avanzados de tomógrafos lo efectúan en pocos segundos.

Con la técnica TAC bien empleada, es posible lograr imágenes de planos delgados del cuerpo (un centímetro) distinguiendo en ellos estructuras tan pequeñas como un par de milímetros. Este invento ha representado otro gran avance en el diagnóstico, pues permite estudiar con precisión la anatomía de una región, así como las alteraciones propias de las diferentes enfermedades. El médico cuenta ahora con un diagnóstico más preciso que le permite seleccionar el tratamiento más adecuado y brindar un pronóstico más acertado.

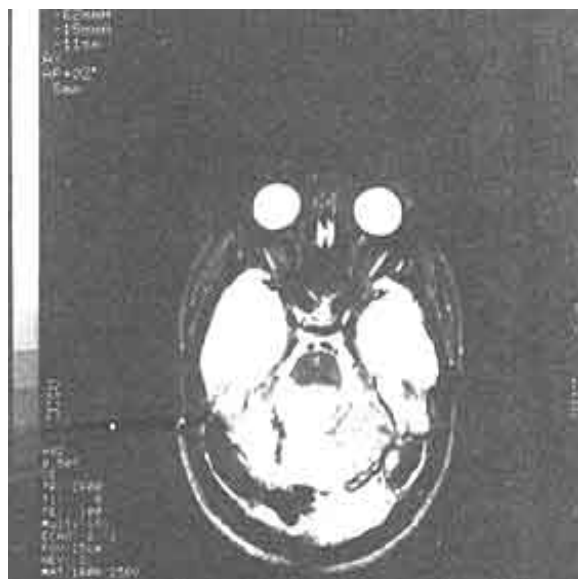


Imagen de tomografía axial computarizada que muestra un plano delgado del cerebro humano. Los óvalos en la parte superior son los ojos.

La dosis absorbida durante un examen tomográfico puede llegar a ser de algunos rads (más que toda la radiación natural recibida en cinco años), por lo que su empleo debe limitarse a aquellos casos en que sea indispensable para lograr el diagnóstico e imposible de realizar con otra técnica de menor riesgo.

Existen, además, otras técnicas que se conocen con el nombre de radiología armada, las cuales permiten introducir, bajo control radiológico, distintos equipos al cuerpo del paciente. Estos aparatos permiten realizar acciones terapéuticas o de diagnóstico sin necesidad de operar. Es posible, por ejemplo, dilatar y obliterar vasos sanguíneos, así como obtener biopsias de tejidos profundos.

Los progresos de la radiología no se deberían medir considerando solamente el mejoramiento en la calidad de las imágenes obtenidas, pues es más importante la amplia difusión de sus técnicas a todos los rincones del mundo. Debido al gran número de personas sometidas a exámenes radiográficos cada año, ha sido muy significativo desarrollar métodos para reducir la exposición de cada paciente a la radiación, sin descuidar la calidad de la imagen. Con técnicas de alto voltaje, por ejemplo, se produce radiación de mayor energía que fácilmente atraviesa el cuerpo del paciente y contribuye en gran parte a formar la imagen. Si la energía fuera menor, como ocurría con los aparatos mas antiguos, la radiación de baja energía contenida en los rayos X la absorbería el paciente y no contribuiría a que se formara la imagen. Ahora se utilizan filtros que reducen aún más la radiación poco penetrante. Otro inconveniente conocido desde los inicios del radiodiagnóstico era la exposición de grandes zonas del cuerpo que no necesariamente requerían ser visualizadas. El empleo de colimadores, cada vez mejor diseñados, permite irradiar solamente la zona de interés reduciendo así la exposición innecesaria.

Apenas se inventó la televisión, se adaptaron televisores a los equipos radiológicos, permitiendo establecer técnicas con control remoto que eliminan la irradiación del personal del gabinete radiológico y que además permiten un control más preciso de la zona por irradiar. Más recientemente, han aparecido pantallas fluoroscópicas fabricadas con elementos llamados "tierras raras", en vez del tungstato de calcio usado en un principio. La fluorescencia producida es ahora mucho mayor y se ha podido reducir la exposición al paciente hasta en un 50 por ciento.

Medicina nuclear

Existe otra especialidad médica dedicada fundamentalmente al diagnóstico y que también hace uso de la radiación. Se trata de la *medicina nuclear*, que comprende técnicas para obtener imágenes de los órganos internos o del esqueleto. Estas imágenes no representan solamente la estructura anatómica del organo visualizado, sino que también aportan datos muy importantes sobre su estado de funcionamiento.

Para lograr estas imágenes, la medicina nuclear utiliza elementos radiactivos que se producen generalmente en reactores nucleares. Cantidades pequeñísimas de estas sustancias son introducidas al paciente, ya sea por vía oral, intramuscular o intravenosa, y dependiendo del elemento utilizado van a depositarse en el órgano o tejido específico que se desea estudiar. Los núcleos de estos radioisótopos emiten espontáneamente radiación desde el interior de los tejidos, la cual atraviesa el cuerpo y sale al exterior, donde puede ser detectada por instrumentos especiales. Las imágenes se graban en película fotográfica, pero no de manera directa como en los experimentos de Becquerel relatados en el primer capítulo, sino a través de detectores electrónicos muy complejos que permiten observar cada uno de los rayos provenientes del paciente, amplificar la señal y convertirla en luz que se registrará en la placa fotográfica. Este sistema permite que la cantidad de material radiactivo (y por ende la dosis) que el paciente reciba sea extraordinariamente baja.

La información obtenida a partir de estos estudios permite conocer la cantidad del radioisótopo que se depositó en el órgano, la velocidad a que ocurre esta acumulación, o bien la velocidad a que lo desecha, y así conocer detalles de la capacidad funcional del órgano estudiado. Por otra parte, la imagen permite ver la distribución del material radiactivo, comprobar si es homogénea, como ocurre en los órganos sanos, o identificar zonas de concentración irregular cuyas características permiten, por ejemplo, advertir la presencia de un tumor o un quiste.

En la actualidad existen instrumentos llamados gamma-cámaras o cámaras de centelleo, que cuentan con un gran número de detectores que operan simultáneamente. Estos detectores están controlados por un sistema computarizado que permite registrar procesos dinámicos como, por ejemplo, la función de los riñones. En este caso se puede medir la capacidad de eliminación de orina de cada riñón, su paso hacia la vejiga, las condiciones en que ésta se llena, etc. Otros estudios similares son la observación del paso de la sustancia radiactiva por las cavidades del corazón, con lo que se puede medir su volumen y eficacia para impulsar la sangre. Igualmente se puede medir la cantidad de sangre que circula por minuto por alguna parte del cerebro.

Estas imágenes que combinan datos tanto estructurales como funcionales hacen que, en algunos casos de padecimientos vasculares, cardiacos, respiratorios, cerebrales y hepáticos, la medicina nuclear entregue al médico información más precisa que la que se podría obtener con rayos X u otras formas de diagnóstico.

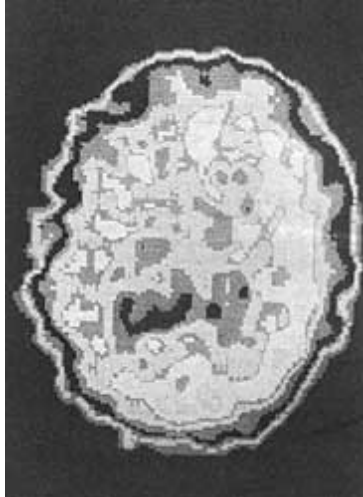


Imagen de medicina nuclear que muestra el cerebro de un paciente que sufre una oclusión en la arteria carótida. La zona negra interior corresponde a la lesión.

Otro empleo de los átomos radiactivos en medicina nuclear es en el *tratamiento de algunas enfermedades*. Desde los inicios de esta especialidad médica, hace poco más de cuarenta años, se ha utilizado el yodo radiactivo en el tratamiento de algunas enfermedades de la glándula tiroides. Poco tiempo después se encontró la enorme eficacia de este elemento en el tratamiento de algunos tipos de cáncer de la glándula.

Actualmente se investiga la preparación de un gran número de moléculas, en especial del tipo de los anticuerpos, capaz de fijarse en forma específica a diversas clases de tumores. A estas moléculas se les puede agregar radioisótopos que emiten radiación beta, con un procedimiento llamado "marcado". Las partículas de la radiación, electrones, son poco penetrantes y por lo tanto depositarán su energía en la cercanía de la molécula marcada, es decir en el tumor. De esta manera se conseguiría destruir al tumor en su ubicación original sin dañar los tejidos vecinos.

Una tercera rama de la medicina nuclear es el *radioinmunoanálisis*, en que no se administran radioisótopos al paciente sino a muestras de su sangre u orina. Como lo indica su largo nombre, se trata de técnicas que utilizan la radiación para analizar sustancias dependiendo de sus propiedades inmunológicas. Las sustancias radiactivas son incorporadas a un anticuerpo específico para la sustancia que se desea analizar, que puede ser una hormona, una vitamina, un medicamento, una enzima, o incluso un virus. Cuando estos anticuerpos marcados se agregan a la muestra de sangre u orina, el anticuerpo se dirige hacia la hormona, droga o enzima correspondiente y la detección de la radiación emitida permite medir las cantidades de la sustancia de interés. En vista de que los detectores de radiación son capaces de notar la presencia de unos pocos núcleos radiactivos, estos métodos de análisis se caracterizan por su extrema sensibilidad y pueden cuantificar cantidades tan pequeñas como billonésimas de gramo (¡la milésima parte de una millonésima de gramo!). Hoy, éste es el método de diagnóstico que utiliza radiactividad más usado en el mundo (y no se expone al paciente a la radiación). Tan sólo en Estados Unidos, cada año se realizan 40 millones de radioinmunoanálisis.

Radioterapia

Estas técnicas de diagnóstico, radiografías y medicina nuclear, aprovechan la capacidad que tiene la radiación de atravesar el cuerpo y entregar información en el exterior. Una filosofía opuesta es la que rige el uso de la radiación como herramienta terapéutica. La *radioterapia* intenta maximizar la absorción de la radiación dentro del cuerpo, de modo que la energía originalmente transportada por los rayos se deposite en una zona del cuerpo ocupada por un tumor, ocasionando tanto daño local como sea posible.

La ionización, mecanismo por el cual la radiación entrega parte de su energía al medio que atraviesa, se produce en cualquier parte de las células irradiadas. Se acepta que ocurrirá daño letal si la ionización ocurre en el núcleo celular, lo cual ocasiona el rompimiento de los cromosomas. Ahora bien, debido a que el daño letal es más aparente durante la etapa de mitosis (capítulo IV) y los tumores malignos presentan mayor número de mitosis que los tejidos normales (pues son de rápido crecimiento) es de esperar y de hecho así ocurre, que el daño mayor se produzca en el tejido enfermo.

La limitación en la cantidad de radiación usada en radioterapia se debe al hecho inevitable de que el tejido sano que rodea al tumor también resulta irradiado, por lo cual se produce, de modo paralelo al efecto deseado, un efecto negativo para la salud del paciente. La radioterapia busca entonces el óptimo equilibrio entre una máxima irradiación al tumor y una mínima irradiación al tejido sano vecino. Este es el único caso en el que, al aplicar gran cantidad de radiación a un ser vivo, se produce un beneficio.

La práctica de la radioterapia se ha visto enriquecida por los logros del radiodiagnóstico, pues ahora es posible conocer con precisión el sitio, el tamaño y la extensión de la enfermedad a irradiar. El plan terapéutico puede realizarse con gran detalle y así concentrar la radiación en el volumen de tejido enfermo, reduciendo la dosis a los tejidos sanos.

La radiación más utilizada en radioterapia es la que proviene del elemento cobalto-60. El núcleo de cobalto-60 es inestable y al decaer se emite radiación electromagnética (rayos gamma) de alta energía. Son estos rayos los que se orientan hacia el tumor durante el tratamiento. Otro elemento utilizado en radioterapia es el cesio-137, que también decae y produce rayos gamma, pero de menor energía que aquellos del cobalto-60. La vida media de estos núcleos es de algunos años, lo que quiere decir que la actividad (rayos gamma emitidos en cada segundo, ver capítulo II) disminuye apreciablemente con el transcurso de los años (Figura 1). Las fuentes radiactivas deben ser reemplazadas periódicamente en los hospitales y clínicas para asegurar que los tratamientos brinden la dosis apropiada en un tiempo de irradiación no demasiado largo.

Ha habido un gran avance en radioterapia desde sus comienzos, a principios de siglo, hasta la fecha. Los primeros equipos utilizados emitían radiación de energía relativamente baja, lo que producía una dosis más elevada en piel y era difícil alcanzar valores suficientemente altos para curar el tejido enfermo profundo. Por esto se ideó la terapia de movimiento, en donde se multiplican las puertas de entrada y se logra concentrar una dosis suficiente en la zona ocupada por el tumor.

Además de los rayos gamma existen otras técnicas de radioterapia que usan diferentes radiaciones para lograr una mejor localización de la dosis en la zona del tumor, una mejor penetración, o una mayor efectividad biológica (ver capítulo II). Los principales departamentos de radioterapia cuentan hoy en día con aceleradores de electrones (llamados linacs) que producen haces de estas partículas y también rayos X de alta energía. Los electrones son partículas que penetran débilmente el cuerpo humano, por lo que su uso es ideal para el tratamiento de tumores superficiales, en que se desea concentrar la dosis en unos pocos centímetros bajo la piel. La modalidad de rayos X de un linac presenta varias ventajas respecto de los rayos gamma del cobalto. Los primeros pueden ser mucho más intensos que los segundos, acortando el tiempo de tratamiento; debido a su alta energía son más penetrantes y depositan una dosis mayor en profundidad; su excelente definición geométrica permite proteger mejor las estructuras vitales vecinas al tumor. Aunque se reconozcan las ventajas de un linac respecto de una fuente de cobalto, hay que estar conscientes de la gran simplicidad del manejo de esta última, en comparación con el trabajo que requiere la operación de un acelerador dentro de un ambiente hospitalario. En países desarrollados, la operación de un linac requiere la presencia permanente de un físico

médico, que es un profesional interdisciplinario especializado. En países tercermundistas, este tipo de profesional no siempre existe.

En unos pocos centros hospitalarios del mundo se usan otras partículas nucleares en radioterapia: neutrones, protones, partículas alfa, piones, o iones pesados. Cada técnica tiene ventajas y desventajas, dependiendo del tipo de tumor que se trate, pero todas comparten una característica: un altísimo costo económico. Los centros que las utilizan están generalmente asociados a un laboratorio de física nuclear o de altas energías, con el que comparten el uso de un acelerador. Los tratamientos con estas partículas todavía se consideran en una etapa de investigación.

El desarrollo de la energía nuclear también ha repercutido favorablemente en el campo de la radioterapia, pues aumentó el número de elementos radiactivos posibles de usar en implantaciones internas, procedimiento llamado braquiterapia. Esta técnica consiste en introducir la sustancia radiactiva, contenida dentro de semillas o agujas selladas, al interior de una cavidad del paciente donde se encuentra un tumor y dejarla durante un tiempo. El efecto que se aprovecha es la corta distancia entre la fuente radiactiva y el volumen por irradiar, lo que proporciona dosis relativamente altas en la zona cercana a la fuente y dosis bajas en regiones alejadas. Su uso en particular es indicado para los casos de cáncer en cavidades del cuerpo humano, como el cáncer en el útero, en la cavidad oral, o bien en lesiones accesibles a ser implantadas por ser superficiales; o bien en tumores profundos, utilizando la cirugía como vía de acceso. En este último caso es deseable implantar isótopos radiactivos de vida media corta, como el oro-198 (vida media de 3 días), ya que las semillas depositadas pueden quedarse en forma permanente. Si se usara un elemento radiactivo de vida media más larga, el material debería extraerse una vez liberada la dosis deseada.

Desde comienzos de este siglo, el radio ha sido el elemento más usado en braquiterapia, pero debido a que en su decaimiento pasa por un elemento gaseoso (el radón), es posible que las agujas selladas que contienen el material radiactivo presenten fugas (causadas por rupturas producidas durante la inserción y remoción de las agujas del cuerpo del paciente) que pueden ocasionar exposiciones innecesarias para el paciente y el personal hospitalario.

Hoy en día, los organismos internacionales recomiendan no adquirir nuevas cantidades de radio para tratamientos de braquiterapia. Los hospitales que ya lo posean deberán sustituirlo, dentro de sus posibilidades económicas, por otra sustancia. Entre éstas, el cesio-137 es el que tiene mejores cualidades. Los organismos internacionales recomiendan que no se done el radio sustituido a otros países o instituciones para uso médico, pues así se conseguiría dentro de algunos años la total eliminación del radio en los hospitales del mundo. Con esto se brindaría un servicio de mayor seguridad a los pacientes y al personal. Este es un ejemplo de cómo el propio uso de técnicas y elementos logra que se perfeccione el conocimiento de sus limitantes y que se aumente la seguridad asociada. Nadie podrá negar el beneficio del uso del radio en la primera mitad de este siglo, de igual manera, nadie podrá, en esta etapa final del siglo XX, estar a favor de que se continúe adquiriendo radio para aplicaciones médicas.

Con mucho menor riesgo que el radio se pueden usar en braquiterapia otros isótopos como el yodo-131, que con una vida media de 7 días es ampliamente utilizado en los problemas de la glándula tiroides. El fósforo-32 tiene una vida media de dos semanas y ha sido usado en el tratamiento de problemas hematológicos, en las cavidades abdominal y pleural, en cáncer de la próstata, etc. Estos dos isótopos, por su vida media tan corta, son introducidos directamente al organismo y ahí residen hasta que terminan de decaer.

Aplicaciones agrícolas, industriales y científicas.

ADEMÁS de las aplicaciones médicas ya descritas existe una infinidad de actividades agrícolas, industriales y científicas en que se utiliza la radiación. Estas técnicas se basan generalmente en los mismos principios que las aplicaciones médicas: la propiedad de los radioisótopos de emitir radiación penetrante que permite "seguirle la pista" al elemento radiactivo y la propiedad de las dosis altas de radiación para producir cambios

en la estructura celular de los organismos irradiados. Este capítulo describe algunos de los logros obtenidos con el uso de la radiación en agricultura, hidrología, industria, investigación biomédica, esterilización de material médico e irradiación de alimentos. Al final del capítulo se discute el uso de la energía nuclear en la generación de electricidad.

Uso de trazadores

Cuenta la historia que la primera utilización práctica de un elemento radiactivo como trazador ocurrió en 1911, en una pensión de Manchester, Inglaterra. Uno de los huéspedes, llamado George de-Hevesy, trabajaba como ayudante en un laboratorio en que se experimentaba con los radioisótopos, recientemente descubiertos. Cada noche, al servirse la comida que preparaba la dueña de la pensión, al parecer con esmero, a De-Hevesy le asaltaba la sospecha de que le estaban dando sobras de los días anteriores.

Conociendo las propiedades de los radioisótopos, se le ocurrió agregar una pequeña cantidad de un elemento radiactivo a los restos de su comida. Al día siguiente llevó a la pensión un electroscope, instrumento sensible a la radiación; cuando el menú se repitió, acercó el electroscope al plato y comprobó que la comida emitía radiación. Entusiasmado, intentó explicarle su descubrimiento científico a la dueña quien desgraciadamente fue poco receptiva a las palabras entusiastas y... De-Hevesy tuvo que buscarse inmediatamente otra pensión. George de-Hevesy continuó trabajando en el tema y en 1943 obtuvo el premio Nobel de Medicina por sus aportes al campo del uso de radioisótopos como trazadores.

Una de las aplicaciones más interesantes de los radioisótopos como trazadores corresponde al estudio del aprovechamiento de los *fertilizantes* en las plantas. La importancia de este conocimiento es tanto económica como ecológica. Para los países en vías de desarrollo, la compra de fertilizantes significa un desembolso anual de grandes sumas de dinero generalmente divisas pues muchos de los fertilizantes son importados. Además, el uso excesivo o inadecuado de un fertilizante puede dañar al medio ambiente. Lo ideal es conocer, con precisión, la cantidad de fertilizante que se debe aplicar a cada tipo de cultivo y en qué forma, para lograr un máximo aprovechamiento.

La técnica de trazadores radiactivos consiste en incorporar al fertilizante un radioisótopo (por lo general fósforo-32), aplicar el fertilizante y, posteriormente, detectar la radiación emitida por el fósforo-32 para seguirlo en su camino metabólico dentro del vegetal. Estas observaciones permiten determinar qué cantidad de fertilizante llega a la planta y cuánto se desperdicia en el terreno. El uso de radioisótopos es la única manera para saber cuál es fósforo proveniente del fertilizante y distinguirlo del que la planta absorbe naturalmente del suelo donde crece.

Entre los logros de la técnica del fósforo-32 como trazador se puede mencionar un estudio en que participaron varios países en vías de desarrollo. El trabajo demostró que el fertilizante fosfatado, ya fuera depositado directamente sobre la superficie del suelo, o mezclado con éste, suministraba a las plantas de arroz más del doble de fósforo que si se depositaba a 10 cm de profundidad entre las filas de plantas. Resultados como éste han permitido ahorrar grandes cantidades de fertilizante sin disminuir la productividad de cultivos esenciales para la alimentación de millones de personas.

Los estudios *hidrológicos* comprenden, entre otros, la medición de la cantidad de agua caída en forma de lluvia y nieve, las características de los depósitos acuíferos subterráneos, la determinación del flujo de los ríos y arroyos, la medición de pérdidas de agua de presas, canales o lago, y la comprensión de la dinámica de lagos y reservas. En estas investigaciones los análisis isotópicos prestan una ayuda insustituible por la información que brindan de los isótopos presentes naturalmente en el agua y acerca del uso de elementos radiactivos agregados a aquella para un fin específico.

Esta última técnica consiste en inyectar una cantidad conocida de un radioisótopo al volumen de agua que se desea estudiar y, posteriormente, seguir la pista del elemento radiactivo determinando, a partir de la evolución

de la concentración del radioisótopo, ciertas características del sistema acuífero. En el caso de fuentes de agua subterránea, el empleo de trazadores radiactivos permite conocer el contenido y el origen del agua, la velocidad y dirección del flujo, la relación entre el depósito y las aguas superficiales, las posibles conexiones entre acuíferos, etc. Uno de los radioisótopos más usados en estos estudios es el tritio (hidrógeno-3). Las técnicas actuales permiten reconocer un átomo de tritio en **10 18** átomos de hidrógeno (uno entre un millón de millones de millones), por lo que la cantidad de tritio inyectada al medio acuático durante el estudio es sumamente pequeña.

El estudio de isótopos naturales presentes en el agua se basa en la capacidad técnica de detectar pequeñísimos cambios en la concentración de deuterio (hidrógeno-2) y de oxígeno-18, ambos presentes naturalmente en el agua junto a los isótopos más abundantes hidrógeno-1 y oxígeno-16.

Existen varios procesos naturales que afectan la composición isotópica del agua (es decir, la proporción en que se encuentra cada uno de los isótopos de un elemento en la muestra). Durante la evaporación y condensación del agua, necesarias para la formación de nubes y producción de lluvias, los isótopos más pesados se hacen más escasos. Las moléculas de agua (H₂O) formadas por átomos de los isótopos livianos (hidrógeno-1 y oxígeno-16) son más volátiles que aquellas constituidas por los isótopos pesados (hidrógeno-2 y oxígeno-18), por lo que el vapor de agua formado en la evaporación de los océanos contiene una fracción menor de hidrógeno-2 y oxígeno-18 que el agua del mar donde se origina. Como consecuencia de este fenómeno, lluvias sucesivas de un mismo vapor de agua original contendrán cada vez menos isótopos pesados. Estas diferencias se pueden medir, y los resultados se usan para determinar el origen del agua en los acuíferos, identificar conexiones entre lagos y aguas subterráneas, velocidad de flujos, etcétera.

Otro proceso natural que cambia la composición isotópica del agua es la condensación del vapor en diferentes temperaturas y altitudes (el contenido del isótopo pesado disminuye con la altura). Este último efecto es muy útil pues permite identificar la zona de donde proviene el agua de un depósito. Las variaciones observadas son de un 0.3% de disminución de oxígeno-18 y 2.5% de disminución de hidrógeno-2, por cada 100 metros de aumento en la altitud del lugar donde se produce la condensación.

Un ejemplo de la aplicación de estas técnicas lo constituye un proyecto realizado en la llanura costera de Nicaragua, entre el Océano Pacífico y una cordillera con cimas de 1 700 m de altitud, situada a 20 km de la costa. Se deseaba conocer el origen de los depósitos de agua del llano, una superficie de 1 100 km², a unos 200 m de altura sobre el nivel del mar. Los estudios de concentración isotópica mostraron que las aguas poco profundas de la llanura recibían el líquido localmente, mientras que el agua de los pozos profundos se originaba en la lluvia caída en las montañas, a más de 300 m de altitud. Estudios similares dentro de América Latina se han efectuado en Brasil, Guatemala, Jamaica y México.

En la *industria* es posible agregar radioisótopos a un proceso y seguir su avance para estudiar algunos problemas industriales como el grado de mezcla de fluidos, polvos o gases, la eficiencia de la filtración en ventilación, la velocidad de flujo en tuberías, la detección de fugas en tubos subterráneos y el control de cables que transportan gases.

Investigación biomédica

En la actualidad casi todas las áreas de la investigación biomédica utilizan elementos radiactivos como trazadores; esto ha hecho que se descubran las vías metabólicas por las cuales se transportan las sustancias en el organismo. En el área de la farmacología, la posibilidad de marcar tanto los medicamentos como los tóxicos, permite seguirlos y así conocer cómo actúan, dónde se acumulan y qué tejidos pueden aliviar o dañar. Mencionamos brevemente que el estudio de los oncogenes (genes que, se piensa, pueden causar cáncer) se realiza marcando el ADN con elementos radiactivos.

Mutaciones inducidas en semillas

En el capítulo referente a los efectos genéticos de la radiación se vio que es posible inducir mutaciones en el material genético de un organismo, las que ocasionarán cambios en alguna de las características de los descendientes. Al irradiar semillas para inducir mutaciones se espera producir cambios genéticos que resulten benéficos para el cultivo de las plantas, como sería una mayor resistencia a alguna enfermedad específica, mejor adaptación a ciertas condiciones ambientales, o un mayor rendimiento en las cosechas. Como no es posible controlar una irradiación para que sólo produzca mutaciones beneficiosas, ni mucho menos escoger la característica que deseamos modificar, los experimentos en que se inducen mutaciones en semillas son extremadamente largos. Miles de semillas antes de ser plantadas, son irradiadas con rayos gamma o neutrones y, posteriormente observadas para identificar las mutaciones que podrían ser beneficiosas. Actualmente, las mejores variedades de cebada que se cultivan en Europa, el trigo cultivado en Italia y el arroz cultivado en California, provienen de mutaciones inducidas.

Un ejemplo de este uso de la radiación es el desarrollo, en Hungría, de una variedad de arroz resistente a una enfermedad altamente dañina. Se decidió comenzar a experimentar con arroz Cesariot, una variedad usada en Francia que presentaba una conocida resistencia a la enfermedad. Sin embargo, el clima húngaro no es igual que el clima francés y el arroz Cesariot se tardaba demasiado en madurar y no se conseguían buenas cosechas. Con radiación se intentó inducir en la semilla Cesariot una mutación genética que acelerara la maduración sin perder la resistencia a la enfermedad. Muestras de semillas se irradiaron con diversas dosis de rayos gamma y neutrones de alta energía. Se plantaron las semillas irradiadas y se observaron las dos primeras generaciones para seleccionar aquellas plantas que producían flores antes que el resto. Uno de los mutantes producido con irradiación de neutrones, florecía tres semanas antes que el arroz Cesariot. Estas semillas se plantaron y las plantas producidas mantuvieron esta característica. A esta línea se le llamó Cesariot temprano, unos años más tarde ya estaba comercialmente disponible en Hungría para su cultivo.

Muchos otros mutantes se utilizan actualmente para alimentar a la población mundial. Algunos de éstos son cereales de alto rendimiento que forman parte de la "Revolución verde". Las espigas de estas variedades son cortas y duras, de manera que el uso de fertilizantes se traduce en un incremento del grano, en vez de que crezcan las hojas o los tallos.

Esterilización

Las técnicas de esterilización buscan causar un efecto benéfico a través del uso controlado de una gran cantidad de radiación. Nos referiremos a la esterilización de insectos dañinos, a la destrucción de gérmenes en materiales de uso médico y a la preservación de alimentos.

Se estima que las pérdidas agrícolas debidas a la presencia de ciertos insectos alcanzan el 10% de la cosecha total. En el nivel mundial, esto equivale a perder la producción de todo un país como Estados Unidos. Tradicionalmente se han utilizado sustancias químicas para controlar las poblaciones dañinas, pero, después de algunos años de uso se ha observado que, por un lado, los insectos se han vuelto resistentes a los insecticidas, y por otro, los residuos venenosos que quedan en las frutas y hortalizas resultan dañinos para el medio ambiente.

Existe una técnica de *esterilización de insectos*, en la que se usa radiación ionizante, que ha demostrado su utilidad en varias ocasiones. Consiste en irradiar una gran cantidad de insectos con dosis suficientemente altas como para volverlos estériles, es decir, incapaces de reproducirse. Estos insectos son liberados en las zonas infestadas por sus propios congéneres, así, al aparearse con los insectos de la plaga no se producirá descendencia. La liberación repetida de insectos estériles logra reducir considerablemente el tamaño de la población. La radiación que se emplea atraviesa los insectos y los esteriliza, sin dejarlos radiactivos, por lo que las moscas liberadas no producen ninguna irradiación del medio ambiente.

Uno de los ejemplos más espectaculares del uso exitoso de esta técnica es la erradicación de la mosca del Mediterráneo, en territorio mexicano, hace unos 10 años. En 1977 llegó a México, por el sur, una de las pestes

agrícolas más serias: la mosca del Mediterráneo. Esta mosca es dañina para unas 200 plantas frutales y ha causado pérdidas cuantiosas en varios países. Apenas la hembra ha sido inseminada busca un fruto u hortaliza para depositar sus huevos. Una vez que encuentra un huésped apropiado, la mosca inserta un aparato anatómico con forma de jeringa bajo la cáscara del fruto y deja allí sus huevos. En un par de horas salen larvas de los huevos y éstas comienzan a alimentarse del fruto que rápidamente se pudre. Una semana más tarde, las larvas migran a la superficie del fruto y, finalmente, se establecen en el suelo o en desperdicios orgánicos, donde se transformarán en insectos adultos listos para reproducirse. La vida de la hembra dura un mes y a lo largo de ella pone entre 200 y 300 huevos. Tomando en cuenta las limitaciones en la cantidad de alimento disponible, se estima que unas 1 000 hembras pueden producir más de un millón de descendientes en tres generaciones. Con estas cifras, la producción agrícola en un área de 30 000 km² (aproximadamente la superficie del estado de Yucatán o la mitad de la República de Panamá) puede resultar infestada en sólo tres meses.

El programa llevado a cabo en México se llama "Moscamed" y tiene como objetivos detener el avance de la mosca hacia el norte, erradicarla de México, Guatemala y finalmente, de toda América Central. El Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) se encargó del entrenamiento del personal necesario y desarrolló un sistema para el crecimiento, irradiación con rayos gamma y liberación de millones de moscas por semana. El proyecto en que también participó la FAO (Food and Agriculture Organization), requirió construir la "fábrica" que se muestra en la fotografía, para la producción de las moscas estériles. En enero de 1981 se había detenido la migración de la mosca y finalmente fue erradicada del territorio mexicano donde ya había infestado tres millones de hectáreas (una superficie mayor que el área total cultivada con frijol en México) causando pérdidas por millones de dólares al año. Actualmente se están utilizando moscas estériles en Guatemala y México para protegerse de una reinvasión.



Edificio construido en Tapachula, Chis., para servir de "fábrica" de moscas estériles del proyecto Moscamed.

Un uso ya rutinario de la radiación en grandes cantidades es la *esterilización de productos médicos*, tales como algodón, guantes y ropa de cirugía, suturas, jeringas, válvulas cardíacas, prótesis, etc. Para algunos de estos productos, los métodos alternativos de esterilización, como el calor o el vapor, no se pueden utilizar pues destruirían las características del material. En estos casos, la técnica más efectiva y barata resulta ser la irradiación con rayos gamma de cobalto-60.

Los productos que se van a esterilizar son introducidos en paquetes herméticamente sellados, impermeables a microorganismos. La radiación gamma atraviesa el paquete e irradia todas las partes del objeto que, mientras no se abra, la esterilización durará por tiempo indefinido. Como la irradiación casi no aumenta la temperatura, los objetos hechos de plástico no sufren daño térmico. En ocasiones, éste es el único método para esterilizar

preparaciones de origen biológico y también polvos, pomadas o soluciones. El material irradiado no queda activado (la energía de los rayos gamma es demasiado baja), por lo que el usuario no recibe ninguna dosis al utilizar el material.

Un tercer ejemplo del uso de altas dosis de radiación (y que no produce ninguna actividad en el producto irradiado) se refiere a la *preservación de alimentos*. Grandes cantidades de alimentos se desperdician, debido a que se descomponen rápidamente, en particular en climas calurosos y húmedos o en comunidades que no cuentan con refrigeradores u otros métodos para prolongar la vida de un alimento, desde la cosecha hasta el consumo.

Desde hace 35 años se sabe que la radiación puede extender la vida de ciertos alimentos. Los estudios realizados en varios países no han detectado efectos nocivos asociados al consumo de esta comida, y es así como hasta ahora unos 30 países han autorizado la comercialización de productos comestibles irradiados. Los estándares internacionales han sido establecidos conjuntamente por la IAEA, la FAO y la Organización Mundial de la Salud.



Hongos irradiados con diferentes dosis de rayos gamma (los números indican las dosis recibidas, en miles de rads). Se observa que las dosis más altas mejoran la conservación del producto.

Existen varias técnicas de preservación de alimentos que difieren según la cantidad de radiación utilizada. Se conoce como radappertización (en honor de Nicolás Appert, el inventor de las "conservas" en 1810) el método en que se usan dosis suficientes para que el número de microorganismos en el alimento se reduzca prácticamente a cero. En estos casos, la energía que recibe el producto es 10 veces menor que aquella que sería necesaria para preparar con él una conserva enlatada. Otra técnica consiste en irradiar para interferir, no los procesos microbiales, sino ciertas características fisiológicas del producto, como sería la inhibición de brotes en las papas, ajos y cebollas, y el retraso en la maduración de frutas.

Aproximadamente existen 30 irradiadores de alimentos en el mundo, cuatro de ellos en América Latina (en Brasil, Chile, Cuba y Perú), y los productos irradiados incluyen frutas y vegetales (papas, cebollas, ajos, frutas secas, champiñones, fresas y mangos), especias y condimentos, granos y harinas, carne y pescado (res semipreparada, pollo, camarones) y productos para pacientes que requieran una dieta estéril en su tratamiento médico.

Energía nucleoelectrónica

El uso de energía nuclear en un reactor constituye una tecnología totalmente diferente de las descritas previamente en este libro. Sin embargo, debido a que el funcionamiento de un reactor produce radiación que afecta a la vida, hemos considerado necesario incluir un breve análisis sobre el uso actual de plantas nucleoelectricas, sus principales ventajas y desventajas respecto a otras alternativas energéticas y las formas como la radiación de un reactor llega al medio ambiente.

El desarrollo científico y tecnológico, particularmente en los últimos 100 años, han llevado a una gran parte de la humanidad a un nivel de vida que requiere altos consumos de energía. La llamada sociedad tecnológica actual gasta 20 veces más energía de lo que se gastaba hace cientos de años para mantener a una sociedad de desarrollo primitivo basada en la agricultura. Las mayores diferencias se deben al uso de energía en el transporte, en la industria, en las técnicas agrícolas modernas y en los usos domésticos. El 76% del consumo energético actual ocurre en naciones industrializadas, y el resto, en países en vías de desarrollo. Paradójicamente, el 73% de la población mundial, vive en países aún no desarrollados.

Un análisis sencillo de esta situación nos hace concluir que el consumo mundial de energía continuará en aumento en el futuro cercano. En primer lugar, la población mundial sigue creciendo, sobre todo en los países más pobres. Estos son precisamente los países que necesitan mejorar el nivel de vida de su población y, por lo tanto, requerirán una mayor cantidad de energía disponible. Esta energía se consume diariamente en iluminación, calefacción, combustible para los vehículos de transporte y otros usos directos, y también, de manera indirecta, al gastarla para producir los alimentos y objetos de uso común. (La fabricación de un kilogramo de papel consume la energía contenida en medio kilo de petróleo, y en la construcción de una casa de 100 m² se usa tanta energía como la que se obtiene de 10 000 kilos de petróleo.) Por otro lado, los países industrializados continuarán su progreso mejorando el nivel de vida de sus sectores menos favorecidos, renovando áreas urbanas e industriales a medida que el tiempo las vuelva obsoletas y todo esto ocasionará aún mayores gastos de energía.

El 25% del uso total de energía en el mundo presente es para producir electricidad. La producción de electricidad se realiza en una planta eléctrica que utiliza un combustible para mover una turbina conectada a un generador de electricidad. Las plantas termoeléctricas queman petróleo o carbón y con el vapor producido se impulsa la turbina. En una planta hidroeléctrica se usa la fuerza de una caída de agua para mover la turbina generadora, y en una planta nucleoelectrica se aprovecha para el mismo efecto la energía que se libera al fisionarse los núcleos de uranio. Existen otras fuentes de electricidad, como es el aprovechamiento de la energía solar, de la energía del viento y de los depósitos de agua y gases calientes en el interior de la superficie terrestre, pero su contribución actual a la producción total de electricidad es muy pequeña.

Hay dos aspectos principales que han hecho necesaria la inclusión de un análisis sobre reactores en este libro. Uno es la producción de residuos radiactivos durante el funcionamiento normal del reactor y, el otro, es la posibilidad de un accidente en que se libere una gran cantidad de sustancias radiactivas al medio ambiente. Una planta nucleoelectrica produce anualmente durante su funcionamiento normal un volumen de dos metros cúbicos de *desechos radiactivos* sólidos de alta actividad y 23 mil metros cúbicos de residuos sólidos de menor actividad. Estos desechos son almacenados en contenedores especialmente diseñados y permanecen bajo control continuo. Como las vidas medias de algunas de estas sustancias llegan a los miles de años, la contención de los desechos debe ser tal, que se asegure que durante ese lapso no entrarán en contacto con ninguno de los ciclos biológicos. Pequeñas cantidades de desechos son liberados al medio ambiente durante el funcionamiento normal de un reactor, pero bajo la estricta norma de no sobrepasar en un año 5 milirems de equivalente de dosis a ningún ser que viva en las cercanías de la planta. Esta cantidad es menor que el 3% de los valores de radiación recibidos de manera natural. (Esto se discutió en el capítulo VII.)

Durante un *accidente* grave en un reactor nuclear, el interior de éste, donde ocurren las reacciones de fisión del uranio, entra en contacto directo con el medio ambiente y se libera parte del material radiactivo ahí contenido. Los reactores comerciales (usados como plantas generadoras de electricidad) han sido diseñados con múltiples barreras de contención, de modo que, en caso de un accidente en el interior, la radiactividad no

encuentre un camino fácil para salir al exterior. Durante el accidente de la Isla de Tres Millas en EUA en 1979, estas barreras ayudaron a evitar una dispersión importante del material radiactivo. En el caso del reactor Chernobil, estas barreras prácticamente no existían (el reactor se había diseñado para producir el plutonio necesario en la fabricación de bombas nucleares, no como planta nucleoelectrica) y, tal como se explicó en el capítulo VII, en esa ocasión la contaminación radiactiva fue de gran magnitud. Estos accidentes son los más graves que se conocen en la industria nucleoelectrica. Son más de 400 los reactores que hoy funcionan en 26 países que acumulan unos 4 500 años-reactor de experiencia.

Pareciera que estas características de los reactores los harían totalmente inaceptables como fuentes energéticas hoy en día. Sin embargo, antes de sacar conclusiones, es necesario preguntarse sobre la seguridad y las virtudes ecológicas de las otras fuentes de energía.

La generación de hidroelectricidad pareciera un método limpio y seguro. Sin embargo, la construcción de grandes presas para la acumulación del agua, en ocasiones representa un grave atentado al equilibrio ecológico de la zona. Además, una presa siempre corre el riesgo de colapsarse, ya sea durante un terremoto o por fallas estructurales. Miles de personas han muerto en las avalanchas que siguen a la destrucción de una presa, haya sido diseñada o no para producir electricidad.

El carbón es probablemente el combustible que cuenta con mayores reservas en nuestro planeta, a pesar de las grandes cantidades ya consumidas. Sin embargo, la extracción del carbón en las minas es sumamente peligrosa y ha cobrado miles de vidas de mineros que aún en nuestros días mueren a causa de las explosiones de gas grisú, o como consecuencia de inundaciones en el interior de los túneles. Además, la combustión de carbón es muy contaminante. Se produce humo, cenizas, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno. El 99% del humo y las cenizas se pueden eliminar con un precipitador electrostático, pero la fracción que queda, de tamaño menor que una milésima de milímetro, fácilmente se instala en los pulmones. El óxido de azufre se origina en el contenido natural de azufre del carbón quemado y a través de una serie de reacciones químicas puede transformarse en ácido sulfúrico o algún sulfato metálico que va a depositarse en los pulmones de los individuos donde ejerce una acción corrosiva. La famosa tragedia de Londres en los años cincuenta, en que miles de seres humanos perdieron la vida a causa de la contaminación, fue causada por la excesiva quema del carbón. El siguiente contaminante asociado a la combustión del carbón son los óxidos de nitrógeno que, se piensa, tienen un efecto carcinógeno cuando se asocian con otras sustancias o moléculas de nuestro cuerpo.

El uso del petróleo como combustible lleva asociado también una serie de riesgos. Explosiones como la de San Juan Ixhuatepec, México (San Juanico) ocurrida en 1985., en que murieron más de 500 personas o los graves accidentes de barcos petroleros en que vastas áreas de tierra y mar resultan gravemente dañadas con la consecuente muerte de miles de ejemplares de la flora y fauna, son noticia casi regular en nuestros periódicos. Tan sólo durante 1989 ocurrieron gravísimos derrames de petróleo, uno en Valdez, Alaska; otro en la Antártida y al menos un par en zonas altamente habitadas en el Este de Estados Unidos. Miles de kilómetros de playas se han inutilizado por el aceite derramado y miles de especies animales y vegetales resultaron afectadas. Sobre todo en Alaska y Antártida, se puede sufrir un daño que no será reparable antes de que pasen algunas décadas.

Un efecto ambiental común tanto a la combustión de carbón y de petróleo es la producción de bióxido de carbono. Este gas no es directamente dañino, pero causa el llamado efecto invernadero, debido al cual la temperatura de nuestro planeta podría aumentar, rompiendo el delicado equilibrio que mantiene a la vida tal como la conocemos. En los últimos años se ha comenzado a observar cierta evidencia climática de que el calentamiento pudiera ya haber empezado.

Los datos aportados son una confirmación de que toda tecnología que se aplique con exceso afecta al medio ambiente y lleva implícito un riesgo. El beneficio de una amplia disponibilidad de energía no es de ninguna manera gratuito y el precio que se debe pagar no se contabiliza solamente en pesos o en dólares. Nuestra civilización ha exigido del planeta recursos extraordinarios para poder llegar al nivel de desarrollo que hoy

conocemos. Pareciera que estamos comenzando a observar el deterioro inevitable que nuestro progreso ha causado en el suelo, aire, agua, flora y fauna que nos rodea. Los accidentes que, además de las víctimas humanas, causan cada vez más catástrofes ecológicas, son en su gran mayoría causados por factores humanos: operadores de un reactor que realiza pruebas que violan las reglas y medidas de seguridad, el capitán de un barco petrolero que duerme borracho en su camarote en el momento en que una mala maniobra causa el derrame del combustible transportado, el uso de equipo industrial obsoleto al que no se le brinda el mantenimiento apropiado, etc. La industria nucleoelectrica comparte la culpa con otras actividades de alto riesgo cuando ambas violan la reglamentación destinada a evitar accidentes. Pero tanto una como la otra son elementos indispensables en nuestra sociedad tecnológica. Una mayor preocupación por el medio ambiente, además de una selección rigurosa de aquellos individuos responsables de la seguridad industrial, posiblemente disminuirá el efecto negativo, y aparentemente inevitable, que nuestro bienestar causa al planeta.

- **Ética social y psicológica**

Los temores

Según Tomás Buch, del Instituto de Investigaciones Aplicadas en el Area Nuclear de Bariloche, Argentina, la energía atómica nació con un pecado original, su utilización militar.

Este hecho, de por sí, ha sido suficiente para generar rechazo y temor.

Con el tiempo, los riesgos de las grandes plantas nucleares, con accidentes ya conocidos, han hecho que esta fuente de energía esté en constante cuestionamiento.

Aplicaciones benéficas

Ambos factores, han servido para opacar los beneficios que puede traer la energía nuclear.

En efecto, la medicina, la agricultura, la industria, entre otros, se han beneficiado de la tecnología nuclear.

Disciplinas como la hidrología isotópica, que sirve para el manejo sostenible de los recursos acuíferos, se valen de la tecnología nuclear, justamente cuando el agua se convierte en un bien escaso y cada vez más valioso.

En la agricultura, las técnicas nucleares, señalan los científicos, ayudan en la lucha contra plagas que afectan a la producción agrícola y ganadera.

Las normas de calidad industriales, como la ISO 9000, están basadas en las exigencias de seguridad nucleares.

Pero tal vez un campo insospechado de gran beneficio para el ser humano, es la medicina. La energía nuclear aplicada a esta ciencia ayuda a la detección de enfermedades y tratamientos contra males como el cáncer.

El enorme poder destructivo de la energía atómica ha puesto en riesgo al planeta. Pero su aplicación pacífica ha dado frutos positivos.

Para muchos, esto demuestra que las tecnologías en sí no son ni buenas ni malas, todo depende del uso que el ser humano haga de ellas.

Activistas anti-nucleares

La Guerra Fría y la carrera armamentista impulsaron al movimiento anti-nuclear, que evolucionó hasta exigir la desaparición de esta fuente de energía no sólo del campo militar, sino de toda actividad humana.

De hecho, este movimiento se entremezcló con los pacifistas y puede ser considerado como el embrión de los movimientos ecologistas.

Apoyo de famosos.

Los críticos de la energía nuclear nacieron con la aparición misma de esta fuente. Hombres de la talla de Albert Einstein o Bertrand Russell estuvieron en estas filas.

Después de que Estados Unidos lanzara la bomba atómica sobre Hiroshima y Nagasaki, Einstein llegó a decir que si hubiera sabido que sus teorías iban a conducir a ese poder destructivo se hubiera dedicado a relojero.

Russell, por su parte un pacifista apasionado, fue uno de los fundadores de la Campaña Para el Desarme Nuclear (CND, por sus siglas en inglés), una organización nacida en 1958 que aboga por la abolición de las armas atómicas.

Los 70 y 80.

La década de los años 70 dio más impulso al movimiento, que pasó de la oposición a las armas atómicas al rechazo de la energía nuclear como fuente de poder.

Organizaciones ecologistas como Greenpeace están entre sus más activos miembros y para los años 80 el movimiento tenía miles y miles de adherentes.

El debate.

¿Hasta qué punto los argumentos del movimiento anti-nuclear son racionales y hasta qué punto pasionales?

Quienes defienden a la energía nuclear afirman que sus detractores no tiene bases científicas y que los adelantes tecnológicos han logrado disminuir los riesgos en su utilización.

Por otro lado, el tema económico se cruza en este punto, dada las inversiones que hay en las plantas nucleares y su posible contribución al desarrollo.

En algunos países, como los de Europa del Este, es la única fuente de energía disponible y es difícil encontrar alternativas.

Los activistas anti-nucleares contestan afirmando que el factor humano sigue siendo el eslabón más débil de la cadena nuclear y que nunca se podrá evitar el riesgo.

Apoyan sus argumentos en accidentes como Chernobyl o el más reciente de Tokaimura, Japón, con sus dramáticas consecuencias en el medio ambiente y los seres humanos.

Mientras en países como Japón, la utilización de esta energía está en pleno debate, varias naciones europeas ya han renunciado a ella o están en proceso de abandonarla.

Al final del Siglo XX el movimiento anti-nuclear hizo sentir su voz. Y, seguramente, dará que hablar en el próximo milenio.