

Anal. Real Acad. Farm., 67:

Radiactividad y Salud*

VALENTÍN GONZÁLEZ

RESUMEN

La radiactividad es una propiedad de algunos elementos químicos que, al tener el núcleo atómico desequilibrado, se desintegran, emitiendo materia y energía, para alcanzar el equilibrio.

Las radiaciones tienen multitud de aplicaciones a la medicina y la salud, la investigación, la industria, la producción de energía, la desinfección y conservación de alimentos, etc. Estas aplicaciones han supuesto beneficios muy importantes para la salud de la humanidad en farmacocinética, diagnosis, terapia, radiofarmacología, etc.; sin embargo, estos efectos no han sido suficientemente valorados social, técnica, ni siquiera científicamente.

Por otra parte, las radiaciones al interactuar con la materia producen cambios y modificaciones, que en el caso de las células vivas pueden devenir en cáncer. Este efecto es determinista, cuando se consideran dosis altas de radiación. Cuando las dosis de radiación son bajas, los efectos son probabilistas. Además, es difícil separar los efectos de las radiaciones de otros impactos provocados por causas naturales o tecnológicas.

Es importante hacer un balance de beneficios frente a daños potenciales, de forma racional y no con respuestas emocionales.

Palabras clave: radiactividad, aplicaciones de los radisótopos, impacto de las radiaciones, generación de cáncer.

SUMMARY

Radiactivity and health

* Toma de posesión como Académico Correspondiente

Some chemical elements are radioactive, due to a lack of equilibrium in its nucleus; to reach the equilibrium they have to desintegrate emitting matter and radiations.

Radiations have many applications in medicine and health, research, industrie, production of energy, food desinfection and conservation, etc. These applications have provided important benefits for the health of humankind in pharmacokinetic, diagnosis, therapy, radiopharmacology, etc. Nevertheless, those applications have yet not been social, technological and scientificaly valorated.

When radiations interact with matter induce changes and modifications which in the case of live celules could prodece cancer. This effect is deterministic in the case of high radiation doses. In the case of low radiation doses the effects are stocastics. It is still difficult to separate the low doses effects from other effects induced from natural or technological variables.

Humankind has to make a balance between benefits and potential prejudices in a rational way, instead of an emotional one.

Key words: radioactivity, radioisotop applications, radiation impacts, cancer generation.

1. LA RADIATIVIDAD

Hoy en día se conocen 112 elementos químicos, entre los existentes en la naturaleza y los generados experimentalmente. Experimentos recientes han detectado los elementos 114, 116, 117 y 118, aunque este último ha sido borrado de la tabla periódica, por sus descubridores, al encontrar resultados espurios cuando volvieron a analizar sus datos.

Algunos elementos tienen su núcleo inestable, debido a las interacciones entre los nucleones (Figura 1) Para alcanzar el equilibrio, han de desintegrarse, es decir, emitir materia o energía hasta alcanzar el equilibrio nuclear. A este fenómeno, natural, se le denomina radiactividad y a los isótopos, cuyo núcleo está desequilibrado, se los denomina radisótopos.

La radiactividad es, por tanto, un fenómeno físico por el cual, los radisótopos emiten materia o energía hasta convertirse en un isótopo estable, es decir, hasta que su estructura nuclear ha alcanzado una situación de equilibrio. Existen 274 isótopos estables en la naturaleza, y casi 3.000 radiactivos.

La desintegración radiactiva consiste en la emisión de radiaciones, que pueden ser de tres tipos: radiación alfa, que es particular, - núcleos de

He^4_2 -, beta - electrones - y gamma, radiación electromagnética, análoga a los rayos X, pero de longitud de onda menor. Además, algunas reacciones nucleares, emiten neutrones que son, también muy penetrantes. La desintegración de un radisótopo está caracterizada, entre otras propiedades, por el período de semidesintegración, definido como el tiempo necesario para que una cantidad del radisótopo decaiga a la mitad, con lo que la otra mitad se habrá convertido en isótopo estable, o no, pero con un núcleo con mayor equilibrio.

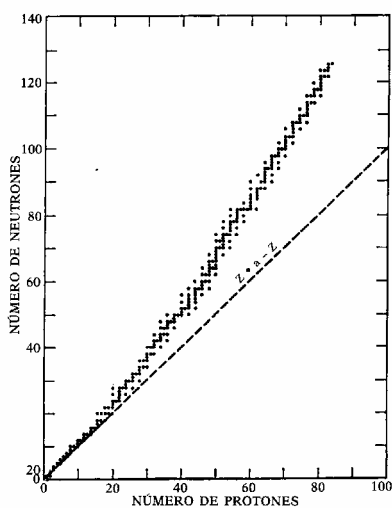


Figura 1

La radiactividad se ha venido midiendo en Curios, en honor a Piere Curie, unidad que corresponde, aproximadamente, a la actividad de un gramo de Ra^{226} equivalente a $3,7 \cdot 10^{10}$ dps (desintegraciones por segundo). Actualmente se utiliza la correspondiente al Sistema Internacional (SI), el Bq (Bequerelio), que es una dps.

Los elementos radiactivos están muy extendidos en la Naturaleza, y aunque pueden encontrarse yacimientos con altas concentraciones en sales de uranio y torio, se encuentran presentes en multitud de mallas cristalinas, como en las zirconitas, el granito, en terrenos sedimentarios, etc. Las leyes suelen ser bajas y oscilan entre el 1000 y 1 ppm, y menos. Incluso, el uranio se encuentra disuelto en el agua del mar en proporciones de 10^{-3} mg/l. Hace unos años se desarrollaron procedimientos para extraerlo; dada la baja demanda actual de concentrados de uranio, el coste que supone dicha extracción es mayor que el que resulta de su explotación minera, por lo que no ha pasado a escala industrial.

La existencia de la radiactividad en la naturaleza se debe a que, en la creación del universo, y la Tierra, se generaron un conjunto de radisótopos iniciales, denominados nucléidos primordiales, algunos de los cuales han desaparecido, al ser sus períodos de semidesintegración tales que, transcurridos más de 30^1 , son analíticamente indetectables.

Cuando la cadena de desintegración se encuentra en equilibrio secular, es decir, cuando el período de semidesintegración del nucléido primordial es mucho mayor que el de sus hijos radiactivos, se alcanza un equilibrio en el que, cada uno de los elementos de la cadena tiene la misma radiactividad total; en este caso, el nucléido primordial y sus hijos, permanecen.

Los nucléidos primordiales, que aún se encuentran en la naturaleza son: U^{235} , U^{238} , Th^{232} , Ra^{226} , Rn^{222} y K^{40} . Ha desaparecido el nucléido primordial Np^{237} y los hijos de su cadena radiactiva.

En la naturaleza, existen cuatro cadenas de desintegración de elementos pesados, cuyos radisótopos de partida son el U^{238} (cadena del Uranio-Radio), el U^{235} , (cadena del Actinio), el Th^{232} y el Np^{237} (Figura 2) También hay otros radisótopos como el K^{40} , Tritio - H^3 -, Be^7 , C^{14} , etc., algunos resultado de la interacción de la radiación cósmica con los elementos de la atmósfera. Además, hay elementos radiactivos, procedentes de los reactores nucleares naturales que se formaron hace miles de millones de años, cuando la composición isotópica del uranio era diferente a la actual y se dieron determinadas condiciones geológicas. Estos últimos, dado el período de tiempo transcurrido, se han convertido, en su mayor parte, en isótopos estables. Su composición, y el lugar en que se encuentran, permiten deducir que proceden de la desintegración de otros elementos generados por fisión y activación.

¹ De acuerdo con la ecuación de decaimiento radiactivo, $A_T = A_0 / 2^T$, en la que A_0 es la cantidad inicial de radisótopo y A_T la cantidad que queda, al cabo de un tiempo T; resolviendo, resulta que $1 / 2^{30}$ es aproximadamente igual a 10^{-9} . Si el periodo de desintegración es mucho menor de este valor, el elemento será indetectable.

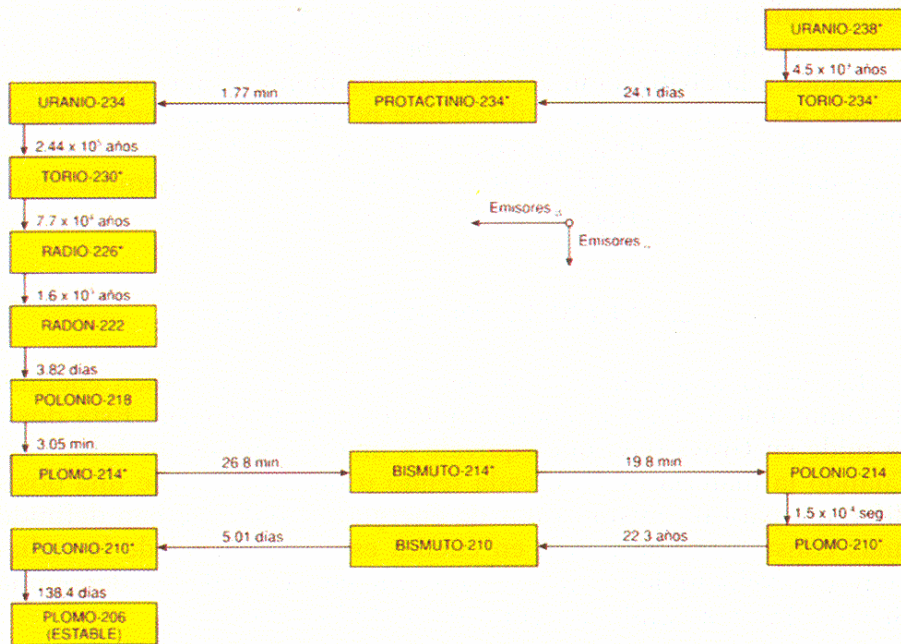


Figura 2

Un ejemplo, es el conjunto de reactores nucleares de Oklo, en Gabón, en los que se inició la fisión del uranio hace 1.800 millones de años, en una mineralización de uranio formada 200 millones de años antes. El fenómeno tuvo lugar cuando circuló agua sobre la mineralización, moderando los neutrones, lo que permitió la fisión del U^{235} , cuya composición en el uranio natural era del 3%, mientras que hoy día es del 0,7%².

La operación de ese conjunto de reactores, durante más de medio millón de años, dio lugar a algunas toneladas de productos de fisión y activación neutrónica, resultado de la fisión de unas 6 t de U^{235} .

² El periodo de semidesintegración del U^{235} es menor, en casi un orden de magnitud, que el U^{238} por lo que su proporción en el uranio natural disminuye más deprisa, con el tiempo.

Esta generalmente aceptado el término radiactividad artificial, a pesar de que los elementos radiactivos pueden provenir, solamente, de las reacciones de formación del universo y la Tierra, o de la activación o fisión nuclear de radisótopos fisionables. Resulta más exacto hablar de fuentes de radiación generadas por el hombre, ya que las radiaciones recibidas se deben a las tecnologías y los usos asociados a la civilización actual. Probablemente, el término radiactividad artificial continúa utilizándose porque los reactores nucleares de Oklo se descubrieron hace unos 25 años y, hasta entonces, se suponía que la fisión había sido realizada solo por el hombre, aunque se preveía la existencia de reactores naturales.

2. FUENTES DE RADIACIONES

Las radiaciones, al interactuar con la materia, ceden energía, denominándose dosis la energía que absorbe la materia. Esta dosis se mide en Grays (Gy) que equivale a una energía de un Julio / kg. Cuando la materia es viva, cada tejido u órgano absorbe una dosis diferente para un mismo valor de energía recibido. Se han definido unas constantes que tienen en cuenta esta efectividad de la radiación. El producto del Gy por la constante de efectividad se denomina Sievert (Sv) y se mide, así mismo, en Julios / kg.

Las causas de exposición a la radiación para el hombre moderno, tienen cuatro orígenes fundamentales:

- Ocupacionales: relacionadas con los trabajadores del ciclo del combustible nuclear y con la población de las inmediaciones a las instalaciones nucleares y radiactivas: supone para la población total menos del 0,1% de la radiación total que se recibe.
- Uso y consumo de productos, por ejemplo, tabaco, debido a su contenido en polonio radiactivo, o bien otros productos, como plátanos, frutos secos, patatas, zanahorias, agua de bebida, etc., que toman la radiactividad del suelo de cultivo, o del camino por el que discurren (caso del agua) Su aportación media es del orden del 3% de la dosis total, sin

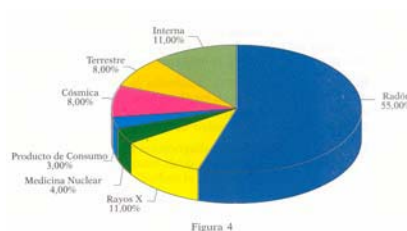


Figura 4

embargo, en el caso del tabaco, la dosis en algunas zonas de los pulmones, puede ser de hasta 160mSv.año.

- El ambiente en el que se desarrolla la vida a causa de la radiactividad contenida en los elementos de construcción (granito, cemento, arenisca, yeso, arcilla, etc.) Su aportación es también muy baja, del orden de 0,001%.
- El uso de los Rayos X para diagnóstico y la medicina nuclear, es responsable del 15% de la dosis total recibida por el hombre, correspondiendo el 11% al radio-diagnóstico y el 4% a la medicina nuclear.

En general todas las fuentes naturales, así como los gases contenidos en el aire, la radiación cósmica, etc., son responsables de las dosis de radiación recibidas por el hombre, estando representadas, en la figura 3 las dosis que recibe el hombre actual de fuentes naturales, y en la figura 4 la distribución total, considerando las fuentes debidas a aplicaciones de la Tecnología.

Cuando se habla del riesgo nuclear se pone el énfasis en el ciclo del combustible y se olvidan otras fuentes menos conocidas, que afectan en mayor medida a determinados colectivos, como es el caso de núcleos de población a gran altura sobre el nivel del mar, donde disminuye el blindaje de la atmósfera, frente a la radiación cósmica. O el de los habitantes en zonas circundantes a las plantas de producción de energía, por la combustión del carbón, la acumulación de radisótopos que supone para los suelos el abonado con compuestos fosfatados, el vivir en zonas

cuya radiactividad es particularmente alta por el contenido en elementos radiactivos del suelo (monacitas en la India, minerales de uranio en Poços de Caldas en Brasil, etc.), o como resultado de las propiedades del entorno vital. Por ejemplo, los esquimales, reciben unas dosis unas 35 veces mayores a las de otras poblaciones, por consumir carne de renos y caribús, que se alimentan de unos líquenes que concentran el Po^{210} . También, la población australiana recibe dosis 75 veces mayores, a través de la carne de ovino y canguro que se alimentan con forraje de suelos con contenidos de uranio superior al de otras zonas de la tierra.

El carbón, al igual que otras muchas rocas, contiene uranio en pequeñas cantidades. Una planta térmica de carbón de 1.000 megavatios eléctricos (Mwe) quema unos cuatro millones de t/año de carbón, que contiene entre 1 y 10 ppm de uranio y unas 2,5 veces más de torio. Una parte de estos elementos radiactivos, más sus descendientes de las cadenas de desintegración, junto al K^{40} que también contiene el carbón, salen por chimenea o se quedan en cenizas, expuestas a los agentes atmosféricos (viento y agua)

Teniendo en cuenta la cantidad de carbón que se quema en el mundo, se estima que el impacto de estas radiaciones pueden ser unas 100 veces mayor a las que corresponden al ciclo del combustible nuclear.

Por su parte, la roca fosfática, que se utiliza para producción de ácido fosfórico, base de los abonos fosfatados, contiene uranio, en proporciones que oscilan entre los 8 y 400 ppm, que se reparte entre el ácido fosfórico y los fosfoyesos resultantes del ataque sulfúrico de la roca. El abonado de los campos hace que se incremente, gradualmente, el contenido del suelo en radisótopos, ya que el ácido sulfúrico disuelve una gran parte del uranio contenido en la roca fosfática, así como algunos de sus hijos de la cadena de desintegración, mientras que el Ra^{226} permanece en los fosfoyesos y, en general, los elementos insolubles en forma sulfato.

Hay también fuentes de radiactividad, incorporadas al organismo, que aportan dosis apreciables. Así, el hombre tiene como componente de sus huesos potasio y, por tanto, K^{40} que es uno de los nucléidos primordiales. Una persona de 70 Kg tiene en sus huesos 140 g de potasio e, ineludiblemente $3,7 \cdot 10^3$ Bq (0,1 uCi) de K^{40} . Este elemento, aporta a

las dosis naturales 0,2 mSv/año en gónadas y 0,15 mSv/año en huesos, por desintegración beta con una energía de 1,3 MeV.

3. APLICACIONES DE LA RADIATIVIDAD

Cuando Becquerel descubrió la radiactividad, de forma fortuita, a la espera de un día soleado, después de varios nublados, para realizar ensayos de "fosforescencia", no podía imaginarse el impacto que la tecnología derivada de este fenómeno físico, llegaría a tener medio siglo después.

En efecto, en 1.945 tuvieron lugar las explosiones atómicas de Hiroshima y Nagasaki. Esta forma de iniciar sus aplicaciones, le creó una imagen pública de tecnología peligrosa y negativa, que no se ajusta exactamente a la realidad. El uso de la radiactividad ha tenido y tiene unos impactos positivos en la salud y la vida humana que no están suficientemente valorados, social, económica e, incluso, científicamente.

Entre sus diversas aplicaciones hay que resaltar sus usos en farmacia, medicina, producción de energía eléctrica, industria, investigación, desinfección y conservación de alimentos, como los más importantes.

Durante el desarrollo de las investigaciones que permitieron conocer el nuevo fenómeno físico, se construyeron fábricas en las que se producían sales de Radio²²⁶ empleadas, fundamentalmente, con fines diagnósticos y terapéuticos, pues, desde el principio se inyectaron sales diluidas de Ra, para atajar algunas enfermedades.

En los años 1.940-1.950, se vendía en Alemania crema de dientes con Th²³², para lograr encías sanas y en Francia forraje para ganado con Ra²²⁶ para mejorar su salud (Figuras 5 y 6) y hasta bien entrados los años 1970, se usaba el uranio natural, y empobrecido, como componentes de la porcelana para prótesis dentales.

El devenir de la Ciencia y la Tecnología ha permitido que las aplicaciones de la radiactividad, hayan reportado unos servicios muy

positivos a la humanidad. Pero, también se ha descubierto que la radiactividad puede tener impactos negativos sobre los seres vivos y sobre la salud presente y futura en el planeta Tierra. El debate que tiene planteado la opinión pública es determinar si los impactos positivos dominan sobre los negativos, o al contrario. Los partidarios y detractores no se ponen de acuerdo, por lo que parece de interés pasar revista a las diversas aplicaciones que tiene la radiactividad en la sociedad actual, que reportan beneficios sociales, y a los impactos negativos de su utilización, es decir, sin las medidas de protección adecuadas y en caso de accidente.

Entre las diferentes aplicaciones de la radiactividad, la producción de energía es, con gran diferencia, la que mayor cantidad de elementos radiactivos maneja; sin embargo, desde el punto de vista de las dosis a los individuos, suelen tener más importancia las restantes aplicaciones pues, por ejemplo, los accidentes con fuentes radiactivas, encapsuladas o no son, relativamente, frecuentes.



Figura 5



Figura 6

3.1. FARMACIA Y MEDICINA

La aplicación de la radiactividad a promover la salud humana ha tenido un valor añadido muy importante, pues no existen alternativas a su empleo, que proporcionen resultados comparables, en tiempo, cuantía y precisión.

De las diferentes formas de empleo de la radiactividad, en la salud humana, las más significativas son sus aplicaciones a la farmacocinética, la fabricación de radiofármacos para radiodiagnóstico y la radioterapia.

3.1.1. *Farmacocinética*

En el desarrollo de fármacos, se aprovecha la radiactividad de ciertos radionucleidos para establecer las cuatro bases cinéticas esenciales de esta disciplina: absorción, distribución, metabolismo y excreción, ya sea en un cuerpo vivo o en un determinado compartimento. Para ello se "marca" la molécula base del preparado, con radisótopos que puedan medirse mediante instrumentación nuclear.

Las condiciones más importantes que deben cumplir los radisótopos son:

- Que sean fácilmente insertables en moléculas orgánicas, fundamentalmente, hidrocarbonadas
- Que tengan actividades específicas bajas, o con energías que no provoquen tasas de dosis elevadas a sus manipuladores y operadores.
- Que sean, fundamentalmente, emisores de radiación gamma, es decir, evitar los emisores de partículas (emisores alfa o beta); esta condición no siempre es posible, al no existir, en algunos casos, el emisor gamma que cumpla las condiciones requeridas; en esos casos, se utilizan emisores beta. En ningún caso deben utilizarse emisores alfa, ya que, por el tamaño de las partículas emitidas, son los que mayor daño pueden causar a los tejidos.

- Que sus períodos de desintegración no sean muy elevados, pero tampoco hipercortos, pues los ensayos de laboratorio, o la dosificación a un enfermo, precisan tiempos de actuación de horas, o días.

Desde el punto de vista químico, los radisótopos ideales son el C y el H, pues son los componentes fundamentales de las cadenas hidrocarbonadas. Se usan el C^{14} y el H^3 , prácticamente en todos los casos. Son emisores β puros, con energías relativamente bajas, del orden del 0,2 y 0,02 MeV y con períodos de desintegración de 5.730 y 12,3 años, respectivamente. El período de desintegración del C^{14} resulta excesivamente largo, pero el del resto de los radisótopos del C varía de algunos minutos a milisegundos, por lo que no son adecuados para su utilización en farmacocinética. Estos radisótopos garantizan las mismas propiedades farmacogenéticas del principio activo durante la fase de investigación.

Durante el desarrollo, el procedimiento de trabajo con los radisótopos, es el habitual en farmacocinética, adecuándose los métodos analíticos a sus propiedades físicas. Así, las muestras de sangre se toman, de forma programada, mediante un catéter en la vena yugular, o en la arteria abdominal. Para determinar el contenido en radisótomo y, por tanto de fármaco en plasma, se centrifuga, para separarlo de la sangre, y se analiza mediante contaje gamma, previa su mezcla con un líquido escintilador adecuado, normalmente mezclas de tolueno y xilenos. La cantidad necesaria es muy pequeña, unos 10 ul. Una correlación simple entre el número de cuentas, en la unidad de tiempo, y la concentración de fármaco, resuelve el análisis.

Para establecer el balance global, se analizan orina y heces y para estudiar su distribución se realizan autorradiografías de tejidos y órganos de animales, sacrificados en tiempos fijados previamente, así como tomografías.

Al final del ensayo, se puede hacer, también, autorradiografía y tomografía de cuerpo entero, determinando la distribución cuantitativa.

Todas las aplicaciones de las radiaciones suelen producir residuos, excepto cuando la fuente radiactiva está encapsulada, en cuyo caso la

propia fuente se convierte en residuo cuando pierde la actividad necesaria para desarrollar su función.

En las aplicaciones de los radisótopos a la farmacocinética, los residuos que se generan son las propias moléculas marcadas, así como las cobayas que se utilicen en los ensayos. La gestión de estos residuos puede ser la combustión en un incinerador adecuado, dado que la radiactividad específica y la energía de las radiaciones involucradas, no justifican un tratamiento más complejo.

3.1.2. Radiofármacos

Son compuestos radiactivos utilizados para la diagnosis y el tratamiento terapéutico de enfermedades humanas. En medicina nuclear, el 95% de los radiofármacos se utilizan para diagnóstico y solo el 5% para tratamiento terapéutico.

Los radiofármacos no tienen, en general, efecto farmacológico ya que suelen utilizarse en cantidades trazas. Un radiofármaco puede ser un radisótomo, como el Xe^{133} , o compuestos marcados, tales como una proteína iodada con I^{131} o compuestos marcados con Tc^{99m} . A estos productos, además de radiofármacos, se les suele denominar radiotrazadores, agentes para diagnóstico y trazadores marcados.

La diferencia entre los productos radioquímicos y los radiofármacos está en que los primeros no pueden administrarse a los humanos, por no ser estériles ni carecer de pirogenicidad, propiedades que han de tener los radiofármacos.

Al igual que sucede en farmacocinética, el radiofármaco ha de ser fácilmente detectable por instrumentación nuclear y las dosis de radiación, a operador y paciente, ha de ser mínima.

El radiofármaco ideal debe cumplir las condiciones, análogas a su uso en farmacocinética:

- Que tenga un proceso de producción sencillo y barato.
- Que el período de semidesintegración del radisótomo sea corto y que la vida media efectiva del radiofármaco sea igualmente corta, aunque suficiente para completar el estudio en cuestión.
- Que no emitan partículas, es decir, radisótopos emisores gamma, fundamentalmente, ya que las partículas, sean generadas por emisores alfa, o beta, siempre causan daño a los tejidos. En un gran número de aplicaciones se usa el I^{131} , que es emisor beta, al no existir un emisor gamma que pueda sustituirlo.
- Que sea muy selectivo, para fijarse en el órgano o tejido objeto de estudio, ya que si no es así, irradiará otros órganos o tejidos de forma innecesaria.

Los radiofármacos suelen utilizarse para diferentes ensayos en medicina nuclear; algunos cumplen solo una parte de las condiciones necesarias, por lo que, siempre es necesaria la investigación y desarrollo de otros nuevos, más específicos, y que mejoren la diagnosis.

En el diseño de un nuevo radiofármaco, deben plantearse las siguientes cuestiones: que información se necesita obtener del estudio, como formularemos el nuevo producto, que complejidad presenta el procedimiento de preparación y que resultados dará en los ensayos clínicos específicos.

Para definir el radiofármaco más adecuado para un ensayo determinado, resulta de gran utilidad conocer el mecanismo de fijación en el órgano o tejido en el que ha de localizarse, así como su participación en la función fisiológica de ese órgano. Por ejemplo, no es lo mismo evaluar el estado funcional del hígado, donde el radiofármaco ha de ser compatible con los hepatocitos, que determinar su situación estructural, para lo que podría utilizarse un radiofármaco coloidal, que será eliminado por los fagocitos del hígado.

Cada radiofármaco utiliza uno o más de los siguientes mecanismos de fijación en órganos o tejidos: difusión pasiva, intercambio iónico, bloqueo capilar, fagocitosis, transporte activo, eliminación celular, metabolismo, reacción con el receptor, fijación compartimental y formación de complejos antígeno - anticuerpo. El conocimiento del mecanismo dominante es el primer paso para diseñar el radiofármaco más adecuado.

El siguiente paso, sería el conocimiento de las propiedades físicas y químicas del compuesto elegido y de los reactivos necesarios. Se ha de preparar un procedimiento experimental claro y preciso, el método ha de ser reproducible, simple y no ha de alterar la propiedad deseada del compuesto marcado. Así mismo, deben definirse las condiciones óptimas de preparación (temperatura, relaciones molares, pH, potencial iónico en general) y un procedimiento de control de calidad.

Una vez formulado el radiofármaco, deben realizarse ensayos clínicos, para evaluar su eficacia, en animales y después en humanos, respetando estrictamente las regulaciones aplicables.

Hay un cierto número de factores que han de considerarse antes, durante y después de la preparación: compatibilidad entre reactivos, estequiometría necesaria, polaridad y tamaño de la molécula (pesos moleculares mayores de 60,000 pueden presentar dificultades para su filtración por los riñones), reacciones con proteínas, solubilidad, estabilidad, tanto in vitro como in vivo, y con variaciones de temperatura, pH, luz, etc. y, por último, biodistribución.

3.1.3. Aplicaciones al Diagnóstico

Los radisótopos se aplican al diagnóstico mediante dos métodos: por análisis de centelleo líquido y aprovechando su propiedad de generar imágenes, por autorradiografía. En el caso del centelleo líquido el análisis puede realizarse "in vitro" e "in vivo", sin generación de imágenes. El segundo solo puede realizarse "in vivo".

Dentro del primer grupo de aplicaciones, puede citarse, el radioinmunoanálisis (RIA), que se emplea intensivamente para determinar hormonas, enzimas, antígenos y otros componentes en cantidades mínimas (10^{-9} a 10^{-12} M) en plasma humano, para determinar condiciones varias de enfermedades. El principio general del método, tanto en sistemas inmunes como no inmunes, es el análisis de reacción competitiva.

El RIA se basa en la formación del complejo antígeno-anticuerpo y utiliza el principio de la dilución del radisótomo. El procedimiento de medida, por contaje de radiactividad, permite llegar a medir valores, inalcanzables para el análisis químico.

Otra aplicación importante es la medida del volumen de sangre mediante la dilución, cuantificando, después, la seroalbúmina marcada con I^{125} o los hematíes marcados con Cr^{51} .

Respecto al segundo grupo de aplicaciones, las técnicas para diagnóstico han de desarrollarse necesariamente *in vivo*, mediante estudio de imágenes; entre ellas cabe destacar las aplicables a órganos humanos diversos; a continuación se citan los más importantes, seguidos entre paréntesis, por los radisótopos corrientemente utilizados: cerebro (Tc^{99m} , I^{123} , F^{18}), tiroides (I^{131} , I^{125} , I^{123} , Tc^{99m}), pulmones (Xe^{133} , Xe^{127} , Kr^{81m} , Tc^{99m}), hígado (I^{131} , Tc^{99m} , Ga^{67}), páncreas (Se^{75}), riñón (I^{123} , I^{131} , Tc^{99m}), esqueleto (Tc^{99m}), médula ósea (In^{111}), corazón (Tl^{201} , Tc^{99m} , Rb^{82} , N^{13}), etc. El radisótomo ha de estar en la forma química adecuada (pertecnatato, yoduro, cloruro, citrato, gluceptato, con complejantes diversos, en forma de aerosoles o nebulizadores, etc.), y su gammagrafía una vez en el compartimento -órgano- adecuado, permite visualizar su anatomía y fisiología.

3.1.4. Aplicaciones terapéuticas

La terapia mediante radisótopos, aprovecha el efecto destructivo de la radiación, controlándola para destruir solo aquellas células que causan la enfermedad y las menos posibles sanas.

Como ejemplos pueden citarse la utilización de I^{131} para tratamiento del hipertiroidismo y del cáncer de tiroides, de P^{32} para el tratamiento de la policitemia y la leucemia. Estos procedimientos terapéuticos precisan la ingesta de los radisótopos, en la forma compuesta adecuada.

Hay otros procedimientos, fundamentalmente para tratar el cáncer, en los que se utilizan fuentes externas de radiación, como irradiadores de Co^{60} y Cs^{137} . Sin embargo, los problemas asociados a los radisótopos, y las nuevas tecnologías desarrolladas, particularmente en el campo de los aceleradores de partículas, han hecho que estos equipos hayan desplazado, en muchos casos, a las fuentes encapsuladas. La ventaja fundamental que presentan es la ausencia de radiaciones cuando no están en operación, análogamente a lo que ocurre con los tubos de rayos X. Es muy importante, como en todo aparato en el que se maneja un fenómeno físico, calibrarlo periódicamente para estar seguro de que las dosis suministradas son, realmente, las establecidas.

La terapia es una utilización de los radisótopos, que se inició al poco del descubrimiento de la radiactividad. Se basa en los efectos de las radiaciones en la materia viva. Por ejemplo, en caso de carcinomas se utilizan dosis de radiaciones altas, para destruir las células cancerosas. Al principio, se utilizó Ra^{226} , construyéndose en forma de aguja, para clavarla en el centro del foco canceroso, y así destruir las células enfermas. Posteriormente, se refinó la técnica, de manera que utilizando radisótopos emisores gamma, con gran energía, se colimaba la radiación, aplicándola directamente sobre la zona enferma. Los radisótopos utilizados suelen ser el Cs^{137} y el Co^{60} .

3.2. PRODUCCION DE ENERGIA

El primer reactor de producción de electricidad que se conectó a la red fue el de Calder Hall, en el Reino Unido, en 1.956. La producción electronuclear tuvo un crecimiento muy rápido, llegando a suministrar, en

los años 80, el 17% del consumo mundial de electricidad. Después, debido a la oposición pública y a las altas inversiones necesarias, entre otras causas, se han construido pocos reactores nucleares. Se ponen en marcha reactores de potencia en Corea, Taiwan, China e India, es decir, en países en desarrollo, con crecimientos de consumo eléctrico altos y en los que las empresas tienen asegurada la venta y el precio del kWh. También se vienen proyectando y construyendo en Rusia, en los antiguos países de la URSS y en Japón. Finlandia lleva algunos años planteándose la construcción de una tercera central nuclear y parece decidida a hacerlo.

En los países desarrollados, el peso de la energía electronuclear sigue siendo importante, aunque en los últimos años ha disminuido. A pesar de esto, los 438 reactores que funcionan en el mundo, han producido en el año 2000, el 75% de la electricidad en Francia, 58% en Bélgica, 47% en Suecia, 36% en Japón, 31% en Alemania, 31% en España, 29% en Reino Unido, 20% en EEUU, etc.

La producción de energía eléctrica, mediante reactores de fisión nuclear, es un procedimiento de producción térmico, en el que se aprovecha la energía de la fisión para calentar un fluido, generalmente agua o CO₂, que circula a través del núcleo del reactor actuando como refrigerante.

El aprovechamiento de la energía de fisión para producir calor y, por tanto, electricidad, se basa en la propiedad que tienen el uranio, y otros elementos radiactivos, como el Pu²³⁹ y el Th²³² (tras una reacción nuclear, previa) de fisionarse (partirse, romperse) por el impacto de un neutrón; además de los productos de fisión, se generan más neutrones, que pueden fisionar otros núcleos de elemento fisil. A este proceso se le denomina reacción en cadena, y al ser autosostenido, se puede utilizar para aprovechar la energía de fisión que es de 200 MeV por átomo (compárese con los 4 eV que se obtienen por la combustión de un átomo de C¹²); los productos de fisión, son elementos que conjuntamente suman el peso atómico del elemento fisionado, menos una pequeña cantidad de masa, transformada en energía, de acuerdo con la ecuación de Einstein (Figura 7).

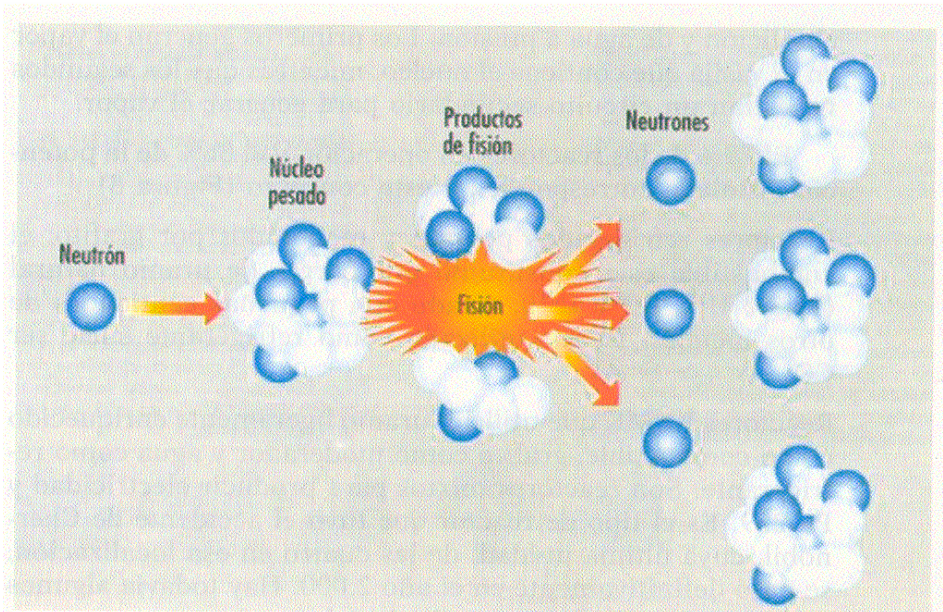


Figura 7

La fisión puede realizarse con neutrones rápidos, de alta energía, o neutrones lentos, térmicos, de baja energía; los neutrones, según se crean, pueden moderarse (convertirse en térmicos), haciéndolos interactuar con un moderador. Los moderadores más utilizados son grafito, agua, agua pesada, etc.

Para que se produzca la reacción en cadena, es necesario que el conjunto fisionable sea crítico, es decir, que tenga una masa y diseño determinados ya que, si no es en estas circunstancias, la fuga de neutrones puede impedir la reacción en cadena.

Los reactores de potencia, utilizados hoy en día, son de varios tipos:

- LWR, acrónimo inglés de los reactores de agua ligera. Utilizan como combustible dióxido de uranio enriquecido en U^{235} desde el 0,7% en que se encuentra en la naturaleza, hasta valores del 2 al 5%. El

elemento fisiónable es el U^{235} . El U^{238} , por captura neutrónica, produce Pu^{239} , que también se fisióna con neutrones lentos.

Estos reactores utilizan el agua como moderador y refrigerante, y según la forma de operación pueden ser de agua en ebullición y de agua a presión. Los primeros generan el vapor en la vasija que contiene el núcleo, mientras que los segundos necesitan un circuito secundario para generar el vapor.

El 79% de los reactores en operación y el 86% de la potencia instalada corresponden a este concepto (Figura 8)

- Reactores refrigerados por gas y moderados por grafito: el combustible está constituido por barras de uranio natural (99,3% U^{238} , 0,7% U^{235}), aleado con pequeñas cantidades de otros metales. El gas utilizado como refrigerante suele ser CO_2 .
- Reactores RBMK, que utilizan uranio ligeramente enriquecido, como combustible, grafito como moderador y agua como refrigerante. Son reactores mixtos para producir electricidad y Pu -239. Es el tipo de reactor que tuvo el accidente de Chernobil, cuya última unidad, de las cuatro en esa localización, se paró definitivamente en el año 2.000. Hay todavía algunos reactores, en operación, en Rusia y Lituania.
- Reactores CANDU, utiliza como combustible dióxido de uranio, ligeramente enriquecido, y agua pesada como moderador y refrigerante.
- Reactores de alta temperatura, para conseguir un rendimiento térmico mayor, trabajando con el gas refrigerante a unos $1000^{\circ}C$. Existían dos reactores en operación ya parados, en EE.UU. y Alemania. Hace poco se han iniciado estudios con un reactor, trabajando con ciclo del Th^{232} , análogo al que operaba en Alemania, es decir, con el combustible en forma de bolas y operación en lecho móvil. Su objetivo es, además de producir energía, transmutar ciertos productos de activación obtenidos en reactores de agua ligera, para disminuir la radiotoxicidad y el período de decaimiento de los residuos de alta radiactividad.
- Reactores rápidos, el combustible está constituido por PuO_2 , refrigerado por sodio líquido; trabaja con neutrones rápidos y cuenta con una cubierta de óxido de uranio, de manera que el U^{238} se

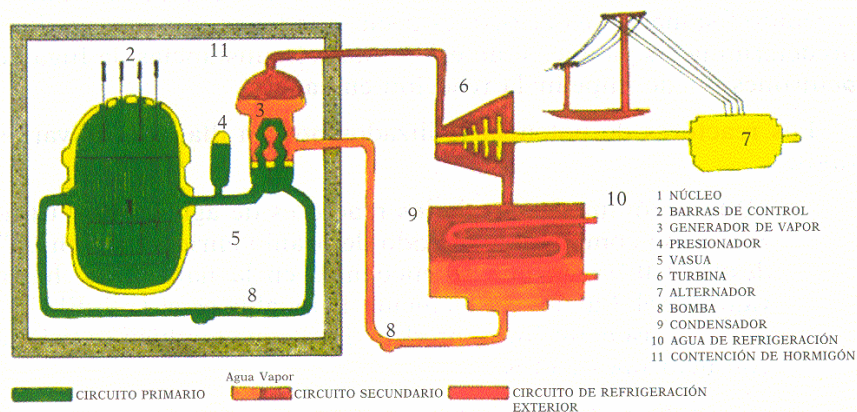


Figura 8

transforma en Pu^{239} por captura de los neutrones que escapan del núcleo; al generar nuevo combustible, es capaz de multiplicar por casi 75 la cantidad de combustible nuclear (uranio) existente en la tierra; por esta razón se llaman también reactores reproductores. Problemas técnicos han dado al traste con estos reactores, del que llegaron a funcionar cinco unidades, de las que solo se mantienen dos en operación (en Francia y Japón), ligados, fundamentalmente, a tareas de investigación.

3.3. INDUSTRIA E INVESTIGACION

En las actividades industriales, los radisótopos se utilizan, normalmente como fuentes encapsuladas, en muchas aplicaciones. Así, por ejemplo, se utiliza Co^{60} y Cs^{137} en gammagrafía industrial; y para medir niveles en grandes tanques, en el llenado de refrescos, en el control de espesores en la fabricación de papel, gammagrafía de soldaduras, etc.

Su gestión, según el período de semidesintegración de la fuente utilizada, se realiza como residuo de vida larga, o vida corta, siempre

como baja y media actividad, dado que las cantidades que se utilizan son, generalmente, pequeñas.

La inclusión de radisótopos en los pararrayos se inició en Estados Unidos, en los años 1.920, y ha sido un uso muy polémico. Su objetivo era aumentar la efectividad para atraer rayos, aprovechando el campo de ionización creado a su alrededor, por efecto de la radiación. La realidad no fue así, pues la ionización estaba limitada a un radio de un metro, que es muy poco.

Posteriormente, las recomendaciones sobre la minimización de dosis a las personas, condujeron a su retirada, o su control.

Los radisótopos que se utilizaron, para los pararrayos fueron, en más de un 95% Am^{241} y, en pequeñas proporciones, Sr^{90} , C^{14} y Ra^{226} .

Hay multitud de aplicaciones de los radisótopos, en la investigación científica y tecnológica y, en todos los casos, se aprovechan sus propiedades, radiactivas para detectarlos por procedimientos más rápidos y baratos, que el análisis convencional como se ha comentado en su aplicación al estudio y desarrollo de fármacos.

Todos los productos utilizados en estas aplicaciones, incluso las cobayas utilizadas son residuos radiactivos.

3.4. IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS

Es un procedimiento de conservación que permite alargar la vida disponible y comercial de los alimentos y aumentar sus propiedades higiénicas y sanitarias.

Mediante la aplicación de las radiaciones a los alimentos, se pueden conseguir tres objetivos: eliminar los organismos patógenos que contengan, para preservar la salud humana, neutralizar los insectos, para evitar epidemias y plagas, e incrementar el tiempo que se conservan frescos, para aumentar su periodo de comercialización y disponibilidad.

Las enfermedades más comunes, transmisibles por los alimentos, son las de origen bacteriano, las causadas por las toxinas producidas por las bacterias, las víricas y las parasitarias. Entre las primeras se

encuentran: salmonelosis, listeriosis, shigelosis, gastroenteritis y cólera. Entre las provocadas por toxinas están: estafilococosis, botulismo y gangrena gaseosa. Las provocadas por virus son: hepatitis y encefalopatía bovina espongiiforme. Por último, de entre las enfermedades relacionadas con parásitos, pueden citarse: entamebiasis, toxoplasmosis, ascaridiasis, triquinosis y helmintiasis.

Estas enfermedades pueden ser transmitidas por el agua o alimentos como las carnes de vaca, pollo, cerdo, pescado, huevos, helados, comidas preparadas, productos lácteos, alimentos enlatados, embutidos, hierbas, especias, etc. Es decir, los alimentos pueden ser transmisores de un gran número de microorganismos patógenos que llegan a ellos a través del agua, durante el proceso de manipulación o porque parasitaba al animal vivo.

Los microorganismos patógenos, pueden ser eliminados o neutralizados en los alimentos por diferentes procedimientos, como congelación, tratamiento térmico, envasado a vacío o en atmósfera inerte, adición de productos químicos, irradiación, etc. La irradiación presenta, entre todos ellos, ventajas ya que, puede aplicarse a un gran número de productos y en condiciones muy variadas. Así, pueden irradiarse alimentos que ya han sido enlatados, precocinados, envasados a vacío o congelados, lo que reduce extraordinariamente el riesgo de contaminación o reinfeción.

La irradiación causa, además, la muerte o esterilización sexual de los insectos, previniendo las pérdidas que pueden causar durante el almacenamiento prolongado de grano de cereal, frutos secos, harina, legumbres, etc., evitando la adición de insecticidas. También impide la propagación de plagas ya que, esteriliza también los huevos y larvas de insectos.

Como tecnología de conservación, la irradiación inhibe o retrasa los mecanismos de germinación y maduración de productos como patatas, cebollas, batatas, frutas en general, sustituyendo o complementando tratamientos químicos y físicos.

La irradiación ha de efectuarse con tasas de dosis establecidas experimentalmente, para no provocar efectos no deseados, entre los pueden citarse:

- Cambios organolépticos, ya que la radiación puede afectar a la calidad de los alimentos, a través de procesos combinados de rotura de moléculas orgánicas y reacciones posteriores de oxidación de la mioglobina y los ácidos grasos, dando lugar a decoloraciones, aparición de sabores rancios y olores desagradables, es decir, modificando sus propiedades. El ozono generado por las radiaciones, a partir del oxígeno presente, puede también producir esos cambios. Para reducirlos en lo posible e, incluso, evitarlos es necesario controlar las variables del proceso, como la tasa de dosis aplicada, temperatura y atmósfera presente (oxígeno, nitrógeno, vacío, etc.)

Pérdidas de vitaminas, particularmente A, y en menor proporción B₁ y C. Al igual que en el caso anterior, la fracción de pérdida depende de los valores de las variables en juego y además, esa fracción no es diferente de la que se pierde con otros procesos de conservación.

- Creación de radicales libres, por efecto de la radiólisis, produciéndose recombinaciones posteriores. Se estima que se rompe un enlace de cada 10⁵, es decir, una cantidad pequeña, comparable a otros procesos de conservación.
- Por último hay que señalar la incapacidad de la irradiación para eliminar enzimas o toxinas. Para las primeras, el tratamiento térmico es más efectivo, aunque la combinación de ambas, radiación esterilizante con desactivación térmica de enzimas endógenas, da lugar a productos inalterables que no precisan refrigeración.

La radiación es útil para reducir las bacterias presentes en el alimento, previniendo entonces la generación de toxinas.

La irradiación de alimentos se viene estudiando casi desde el descubrimiento de la radiactividad. Ya en 1896 se sugiere su uso para destruir microorganismos en alimentos; en 1905 se registra la primera patente para irradiar cereales; en 1929 se ensaya el primer prototipo para irradiar hojas de tabaco y en 1957 se inicia en Alemania la irradiación

comercial de alimentos, aunque con corto éxito, pues un año después se prohíbe por ley.

Las dosis necesarias para irradiar alimentos están perfectamente establecidas, para conseguir el objetivo propuesto, evitando en lo posible las desventajas del procedimiento. Así, se utilizan dosis bajas, menores de 1 kGy, para inhibir la germinación, esterilizar insectos, así como sus huevos y larvas, destruir parásitos y retrasar el proceso de maduración de frutas. Las dosis medias, entre 1 y 10 kGy, reducen las poblaciones de bacterias, mohos y levaduras y previenen la formación de tóxicos debidos a organismos patógenos. Las dosis altas, entre 10 y 45 kGy, destruyen o reducen los organismos patógenos y esterilizan los alimentos envasados, precocinados y congelados.

Cuando se irradian alimentos envasados es importante conocer la resistencia del envase frente a las radiaciones. Estos envases suelen ser de polímeros y se han clasificado en degradantes, cuando sufren roturas de enlaces y pérdida de propiedades mecánicas, y no degradantes, que no solo no pierden propiedades mecánicas si no que, incluso, parecen mejorar, efecto que se atribuye a la unión de cadenas poliméricas adyacentes. El primer tipo de polímeros incluye al poliisobutileno, politetrafluoretileno, policloruro de vinilo y celulosa; como es natural, no es recomendable utilizar esos polímeros en envases si se prevé irradiar. El segundo tipo de polímeros, incluye al polietileno, polipropileno y poliestireno.

Esta tecnología de conservación está muy implantada en América. En Europa, mientras Francia, Bélgica y Holanda permiten la irradiación de numerosos productos, Alemania no lo permite e Inglaterra solo en casos excepcionales. España fue pionera en la legislación, pues ya el código alimentario de 1967 autorizaba la irradiación, entre otros procedimientos, para la conservación de alimentos, aunque posteriormente no fue plenamente utilizado o, al menos, de la manera que el decreto hacía prever. España cuenta hoy día con dos instalaciones de irradiación para la esterilización de material médico y quirúrgico, y se

empieza a pensar en irradiar hierbas y especias, para la eliminación de gérmenes.

Probablemente su baja utilización se deba a las connotaciones negativas que tienen, para la población, las radiaciones y su desconocimiento de la diferencia entre contaminación e irradiación. El hecho es que, incluso en los países en los que se utiliza para conservar alimentos, como es en EE.UU., la venta de estos productos se realiza en áreas comerciales especiales y con etiquetado específico.

La irradiación es un procedimiento de conservación, suplementario al frío, y evita la adición de algunos gases tóxicos (óxido de etileno, óxido de propileno, etc.) Desde luego, no quedan restos de radiactividad después de la irradiación, como no quedamos radiactivos después de una radiografía.

Se cree que la utilización generalizada de esta tecnología es cuestión de tiempo e información del público. Hoy día, al menos 37 países irradian alimentos y se venden en 28, desarrollados y en vías de desarrollo. En la UE es habitual irradiar los alimentos para enfermos inmunosuprimidos, en Finlandia, Reino Unido y Holanda, ya que se reduce considerablemente el riesgo de infección externa y, por tanto, de mortalidad.

3.5. RESIDUOS RADIATIVOS

En cualquiera de las utilizaciones de los radisótopos se generan residuos radiactivos, que son cualquier material de desecho, para el que no se prevé una utilización posterior, que esté contaminado con radisótopos, en cantidades superiores a las definidas como radiactivo por la autoridad competente, en materia de protección radiológica.

Esta definición, compleja, se debe a que, como ya se ha comentado, la radiactividad natural está tan extendida que, incluso, el ser humano contiene radiactividad. Por ello, es necesario definir valores, por debajo de los cuales un material puede usarse o gestionarse como no radiactivo, desde el punto de vista de la protección de las personas y el ambiente.

La gestión de los residuos es el conjunto de operaciones, técnicas y administrativas, que permiten aislarlos para que no causen impacto a las personas, ni al ambiente. La gestión de estos residuos se lleva a cabo según sus características radiactivas. Así, se dividen en residuos de vida corta y de vida larga, según el tipo de radisótopos que contienen.

Convencionalmente, se consideran de vida corta, y baja radiactividad, a los que contienen radisótopos con períodos de semidesintegración iguales o menores a 30 años y su actividad específica es tal, que no generan calor apreciable, por efecto de su desintegración. Este tipo de residuos son el 95% del total y, a su vez, el 95% de ellos se generan en la operación, mantenimiento y desmantelamiento de los reactores nucleares de potencia y el resto en las aplicaciones de los radisótopos a la farmacia, medicina, industria e investigación.

Por su parte, los residuos de vida larga y alta radiactividad, son los que contienen radisótopos con períodos de desintegración mayores de 30 años y que tienen una actividad específica alta, de forma que generan calor por efecto de la desintegración.

Para cada tipo de residuos se ha desarrollado un sistema de gestión diferente. Así, para los de vida corta se utilizan, con gran frecuencia, instalaciones de almacenamiento superficial con barreras de ingeniería. El tipo de radisótopos que contienen, permite asegurar que, en un período máximo de 300 años la radiactividad del conjunto habrá decaído suficientemente, por lo que, en ese momento, podría dedicarse a cualquier uso el emplazamiento del almacenamiento. Es decir, la gestión consiste en aislar los residuos de la biosfera el tiempo suficiente, para aprovechar su propiedad de convertirse en elementos inactivos, por efecto de la desintegración radiactiva.

Para los residuos de vida larga, que constituyen el 5% del total, se ha desarrollado un procedimiento de aislamiento análogo, pero realizado a profundidades de 500 a 1.000 metros en formaciones geológicas adecuadas, que permiten garantizar su aislamiento durante mucho más tiempo.

En EE.UU. ha iniciado la operación un almacenamiento en una formación salina (WIPP, Waste Isolation Pilot Plant) para los “residuos de defensa”, que son los procedentes del desarrollo y fabricación de armas nucleares, que contienen transuránidos, que son de vida larga. Este almacenamiento, fue autorizado en 1999 e inició la recepción de residuos un año después. Está situado en Carlsbad, Nuevo Méjico.

Los criterios de seguridad y protección que suele fijar la autoridad competente en estas materias, para la operación de los almacenamientos, garantizan que las exposiciones potenciales a las personas o el posible impacto al ambiente, tanto en condiciones de operación como en accidente, no son significativas y, de hecho, serían en todo caso cientos de veces inferiores, a las que hoy en día se están recibiendo, de forma natural, por el hecho de vivir sobre la Tierra.

La oposición del público a la gestión de los residuos, por los procedimientos descritos, ha llevado a los gobiernos a potenciar otros procedimientos complementarios de gestión; así, hoy día se investiga la transmutación de los radisótopos, por bombardeo con aceleradores de partículas, para convertirlos en otros con menores períodos de desintegración e, incluso, no radiactivos. Si estos desarrollos dieran resultado, se conseguiría disminuir la radiotoxicidad de los residuos de vida larga, con lo que, el tiempo de espera para su decaimiento, podría disminuir en algunos órdenes de magnitud.

4. INFLUENCIA DE LAS RADIACIONES SOBRE LA MATERIA VIVA

La Tierra contiene desde su formación elementos radiactivos, razón por la que el hombre ha estado expuesto, durante su evolución sobre el planeta, a las radiaciones ionizantes. De hecho, cuanto más nos remontemos en la antigüedad, mayores serían las dosis que se recibían, ya que el fondo radiactivo natural ha ido disminuyendo, con el tiempo, a causa del decaimiento radiactivo. Además, la civilización actual utiliza la radiactividad en aplicaciones diversas, que dan lugar a que el hombre reciba dosis adicionales, como resultado de esas aplicaciones.

Las radiaciones emitidas por los radisótopos, al desintegrarse, son ionizantes, e interaccionan con la materia, de manera que producen cambios y modificaciones en su composición y estructura. Su energía y tipo de radiación determinan su efecto sobre la materia. La radiación alfa, debido a su gran tamaño, puede detenerse con cierta facilidad; incluso la piel es capaz de absorber su energía, sin que suponga un deterioro considerable, dado el carácter protector que tiene la epidermis.

Las radiaciones beta y sobre todo la gamma, son más penetrantes, aunque la piel sigue siendo eficaz frente a la beta, lo es mucho más una lámina de aluminio. Sin embargo, la radiación gamma, puede atravesar espesores variables de agua, hormigón o plomo. La capacidad de blindaje contra las radiaciones de los diferentes materiales está en razón directa con su peso específico.

La interacción de la radiación con la materia viva, origina cambios, que se pueden manifestar por dos vías diferentes, dependiendo de las tasas de dosis puestas en juego. Para tasas de dosis bajas, los efectos sobre la materia son estocásticos, es decir, existe una cierta probabilidad de que el efecto sobre los tejidos pueda devenir en cánceres de etiología diversa. Por otra parte, en los casos de altas tasas de dosis, los efectos son deterministas, es decir, se produce una destrucción de los tejidos que, según la magnitud de la dosis, puede provocar la muerte del individuo. Está perfectamente establecida la relación causa - efecto a partir de 200 Sv, o sea para dosis de radiación muy altas.

Esos efectos deterministas han podido establecerse mediante el seguimiento de la salud de las personas que han sufrido daños por la aplicación bélica de la energía nuclear, en Hiroshima y Nagasaki, en accidentes catastróficos, como Chernobyl, o el ocurrido el pasado año en Japón, en una instalación de reproceso de combustible nuclear. En esos casos, se ha podido estimar, con bastante precisión, las tasas de dosis recibidas, según la distancia a la que estaban de la fuente de radiación.

Por otra parte, cuando se estudian las dosis bajas de radiación, por debajo de 20 mSv, existe un consenso internacional, muy amplio, de que el impacto de un solo bequerelio puede provocar un daño en las células.

Esto puede expresarse, mediante una correlación dosis – efecto, denominada de relación lineal sin umbral, es decir, la línea que representa la relación es recta y parte del origen de coordenadas.

Además de esta interpretación, fruto de años de trabajos en protección radiológica, así como de la experiencia que se ha ido acumulando en dosimetría personal, hay otras que defienden que no se producen daños para valores por debajo de un valor umbral, a partir del cual, comenzarían a manifestarse, o que asignan a la curva de relación dosis – efecto, otras formas diferentes a la lineal: supralineal y sublineal. Además, en algunos estudios, aparece el fenómeno de la hórmesis, es decir, valores de dosis, cuyo efecto en la salud, es menor que los correspondientes a valores de dosis menores. En ese intervalo, las dosis tendrían un efecto beneficioso, por lo que se ha propuesto suplementar a la población las dosis recibidas del fondo natural, con dosis bajas de radiación, para disminuir la incidencia del cáncer y provocar, de esta forma, una respuesta adaptativa de las células. La figura 9 resume las cinco hipótesis que se han manejado; las incertidumbres de los datos, podrían justificar cualquiera de ellas.

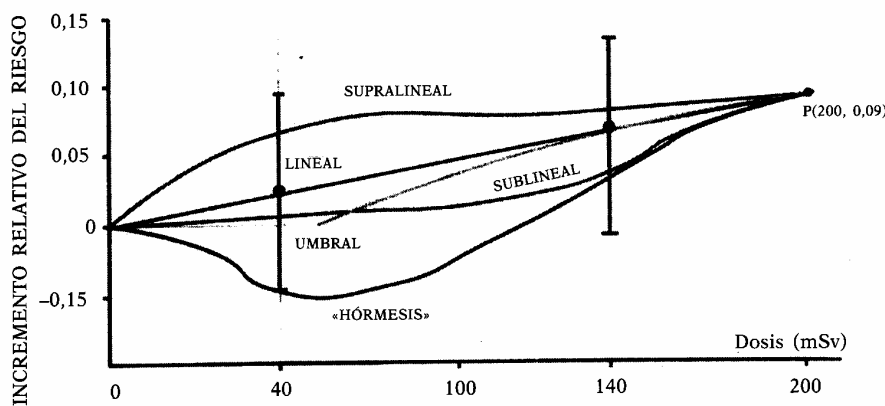


Figura 9

De lo expuesto se deduce la dificultad, según el estado del conocimiento, para establecer, científicamente, la situación real ya que, por el momento, no se tienen evidencias, a partir de los estudios de biología molecular. Ni

siquiera hay garantía de que se llegue a conocer, alguna vez, de forma fehaciente. Sin embargo, ese conocimiento exacto tampoco resulta imprescindible para operar ya que, se ha llegado a una situación, que permite desarrollar programas de protección radiológica con garantía para los trabajadores profesionalmente expuestos y para el público en general, a partir de la hipótesis básica de “relación lineal sin umbral“, que es aceptada de forma prácticamente general, como conservadora.

La dificultad para establecer la influencia de las dosis bajas se debe a circunstancias diversas:

- El hombre actual recibe multitud de impactos externos, naturales y tecnológicos que lo exponen a un riesgo, estadístico, de contraer cáncer de forma espontánea, con probabilidades más altas que las correspondientes a la radiactividad. Y cuando aparece un cáncer, no es sencillo discriminar entre las causas posibles.
- Respecto a la radiactividad, no se conoce la diferencia que puede haber, si las tasas de dosis se reciben de una sola vez, o de forma crónica o fraccionada. Se ha demostrado que las tasas pequeñas son menos efectivas que las grandes, como parece lógico, aunque no hay mucha información experimental. Se ha introducido el concepto de "factor de eficacia para dosis pequeñas", que es la relación entre los daños observados para dosis recibidas de una sola vez y los que se observan cuando la misma dosis se recibe a tasas pequeñas. Se suele utilizar, de forma conservadora, un factor dos, para la citada relación.
- El único procedimiento disponible en la actualidad, para encontrar la relación existente entre dosis y daños es el de los estudios epidemiológicos. Pero, en estos estudios no se ha podido aún separar la influencia sobre el cáncer, de otros factores, naturales y tecnológicos, distintos de la radiactividad.

El riesgo espontáneo de contraer cáncer es una función creciente con la edad del individuo, aparte de los tumores específicos de cada sexo; además, existen individuos, y grupos de individuos, en los que la

incidencia del cáncer es mayor o menor que en otros, por motivos hereditarios.

A todo lo anterior, hay que añadir, que los estudios epidemiológicos que se realizan, no siguen a las poblaciones afectadas hasta su desaparición, sino que utilizan intervalos temporales, lo que introduce nuevas incertidumbres en sus resultados.

- Los efectos de la radiación se presentan después de un período de latencia, que es el tiempo que media entre la recepción de las dosis de radiación y la aparición del daño; este período puede ser de dos años para leucemias y de diez a quince años para tumores.
- Una mortalidad espontánea solo puede definirse por la media de una distribución estadística, de modo que la significación de un resultado ha de tener en cuenta las características de la distribución. Esto obliga a que las poblaciones de estudio sean numerosas, para que los resultados sean estadísticamente significativos.
- Los estudios basados en la radiactividad natural, no han arrojado luz a la cuestión. En efecto, esta fuente de radiación supone 2,4 mSv/año de la que, la mitad, se debe al Rn²²² y sus descendientes y 0,23 mSv/año a los núclidos presentes en el cuerpo humano, fundamentalmente K⁴⁰. El resto se debe a la radiación cósmica y a los radionucleidos presentes en la tierra. No se ha podido determinar, hasta el momento, cuántos casos de cáncer se deben a esta radiación natural. Sin embargo, las variaciones geográficas de esta radiación deberían permitir observar sus efectos en diferentes puntos del planeta. Por ejemplo, la radiación cósmica, a nivel del mar, es de 0,25 mSv/año y es cuatro veces mayor en la ciudad de Quito, debido al menor blindaje de la atmósfera por su altura sobre el nivel del mar. Igualmente, la contribución de los fotones terrestres es de unos 0,5 mSv/año, pero este valor puede variar entre 0,15 y 1,5 y ser de hasta 10 mSv/año en lugares específicos (Brasil, India) Los estudios epidemiológicos no han resultado en una relación clara, en el caso de estas tasas de dosis bajas, pero crónicas.

El Rn²²², en viviendas, es el mayor contribuyente a la dosis natural anual y puede variar, de un lugar a otro, en un factor de diez. Los estudios realizados, en diferentes países, han suministrado datos contradictorios.

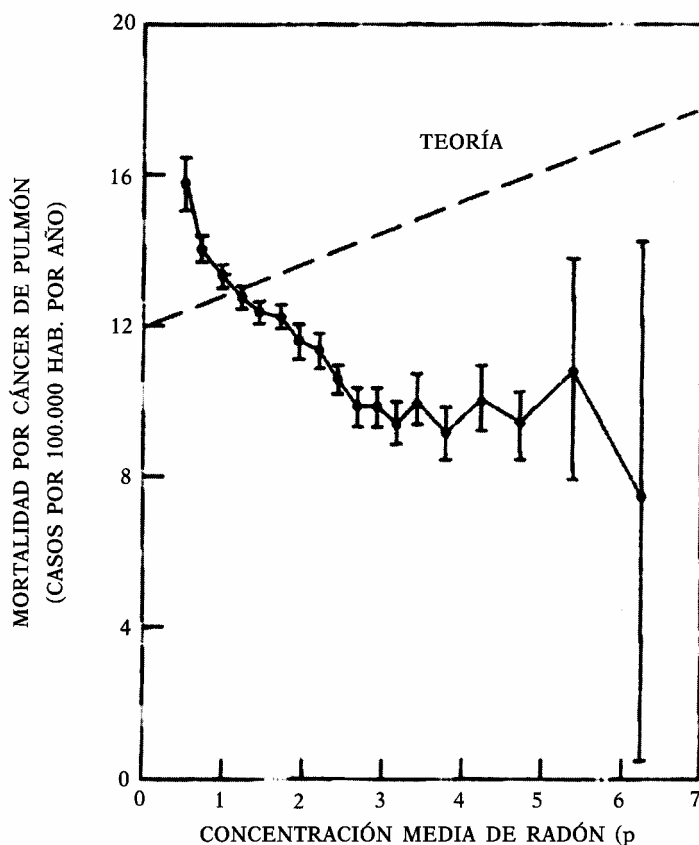


Figura 10

En

la Figura 10 se presentan los datos correspondientes a EE.UU., que contradicen la hipótesis lineal sin umbral y parecen favorecer la hórmesis. Estudios similares realizados en Inglaterra, Francia, Canadá y China no muestran correlación. En Dinamarca la correlación es positiva, pero mayor que en Suecia, a pesar de que en Dinamarca los niveles de Rn^{222} son menores.

- Por último, hay que considerar el poder de autoreparación, que tienen las células, de los daños producidos por las radiaciones ionizantes, o por otros impactos naturales y tecnológicos.

El cáncer puede desarrollarse por daños diversos a las células. Estos daños pueden provenir de múltiples fuentes: fallos en la reproducción celular, influencia de los radicales libres resultantes del metabolismo natural, de compuestos químicos nocivos, de radiación ionizante y otros, impactos químicos de los compuestos denominados carcinogénicos (casi el 95% de los compuestos orgánicos), transferencia directa de energía por las radiaciones ionizantes, inestabilidad térmica, etc.

Las células vivas han desarrollado mecanismos de defensa, e incluso de reparación, frente a esas agresiones, para restablecer la situación anterior al daño. Si a pesar de todo, el daño progresa, el sistema inhibe la capacidad de las células dañadas para que se dividan, eliminando por apoptosis a aquellas que el sistema inmunológico no haya sido capaz de reparar, o lo ha hecho de forma errónea. Cualquiera que sea el origen del daño, el sistema de defensa previene, normalmente, consecuencias serias, por lo que el cáncer tiene poca probabilidad de progresar, si se compara con el número de agresiones que sufre la célula de su entorno.

La hipótesis de la relación lineal, sin umbral, para la generación de cáncer por las radiaciones, se basa en tres argumentos:

- El carácter estocástico del daño de la radiación a las células.
- La monoclonalidad de la generación del cáncer, es decir, un tumor maligno podría desarrollarse a partir de una única célula dañada.
- La predisposición del ADN a reparar, erróneamente, las células dañadas.

Los dos últimos argumentos podrían ser discutibles ya que, los mecanismos de defensa biológica son estimulados por las bajas dosis de radiación, debido a la "respuesta adaptativa". Esta respuesta, podría modificar la pendiente de la curva dosis-efecto, pero no su linealidad sin umbral, a no ser que se tuviera certeza de que el sistema inmunológico, que previene las agresiones al ADN, actuara sin errores posibles.

Como ya se comentó, a todo lo anterior habría que añadir que, en la zona de las bajas dosis, el número de cánceres espontáneos (no motivados por la radiación) es mucho mayor que el correspondiente a las radiaciones ionizantes.

Esta revisión de conocimientos, sobre la relación causa-efecto de los daños celulares, que pueden originar cáncer, muestra la dificultad que entraña el conocimiento íntimo de los impactos, sobre las células vivas. Esto no es un problema insalvable, pues se cuenta con un sistema de protección radiológica adecuado a las necesidades, por lo que la opinión de los expertos es la de continuar con los sistemas de protección establecidos y dejar a la biología molecular y a la epidemiología, que avancen en su desarrollo.

Un aspecto nada desdeñable es la presión de la opinión pública sobre las autoridades ya que, en algunos casos hace que los gobiernos, o los científicos, tomen decisiones desproporcionadas con la realidad, aunque finalmente la cordura suele imponerse. Recuérdese la alarma que despertó el denominado “ Síndrome de los Balcanes “, sobre la influencia de la bajísima tasa de dosis debida al uranio empobrecido (U^{238}) contenido en las ojivas de proyectiles de guerra, sobre la existencia de enfermedades diversas, incluso cánceres, en los soldados de Naciones Unidas, en períodos de tiempo tan cortos como tres, o seis meses, es decir, sin período de latencia (esto parece indicar que podría no ser la radiación, sino otro efecto el desencadenante, por ejemplo, el U^{238} como metal pesado, o el Pb)

Todas estas consideraciones llevan a los organismos internacionales, gobiernos y autoridades reguladoras a utilizar la hipótesis más conservadora, en Protección Radiológica. Así, los reguladores de la Unión Europea han adoptado la hipótesis de la relación lineal, sin umbral, que se ha incorporado a la directiva 96/29 de Euratom. Esta directiva, que ha de incorporarse a la legislación de todos los países de la Unión, pone mucho más énfasis en la aplicación de los conceptos clásicos de justificación, optimización y limitación de dosis que, aunque incorporan

algunos conceptos intangibles, y difícilmente cuantificables, permiten desarrollar una protección adecuada a las necesidades.

La justificación de una práctica está ligada a sus beneficios y detrimentos potenciales y la existencia, o no, de técnicas, no radiactivas, para obtener el mismo beneficio, es decir, a la hora de aplicar una técnica radiactiva, debe estar claro su beneficio frente a opciones no radiactivas.

La optimización exige que las exposiciones se mantengan en el nivel más bajo que sea razonablemente posible, considerando factores económicos y sociales, lo que exige análisis y evaluación de intangibles.

Las limitaciones de dosis a trabajadores expuestos, mujeres embarazadas o en lactancia, estudiantes, ciertos colectivos del público y población en general, constituyen un conjunto de valores que garantizan que el riesgo se mantiene siempre por debajo de valores que se consideran no aceptables. Pero, la introducción de estos límites, supone la aceptación legal de un riesgo, a pesar de aceptarse la hipótesis lineal, sin umbral.

Como resumen de todo lo expuesto se pueden extraer los comentarios siguientes:

- Hay una relación causa-efecto, demostrada experimentalmente, entre las tasas de dosis altas y la generación de cáncer.
- Para tasas de dosis bajas no se ha podido demostrar dicha relación. La hipótesis de la relación lineal sin umbral, es la que está avalada empíricamente y adoptada oficialmente por las instituciones internacionales, al entenderla suficientemente conservadora. Además, permite llevar a cabo programas de protección radiológica, estableciendo límites coherentes.
- Es todavía difícil eliminar otras hipótesis, distintas de la lineal sin umbral, ya que no se pueden separar las variables independientes, cuando se realizan estudios epidemiológicos.
- Es evidente la necesidad de continuar investigando, para aumentar el conocimiento. Los resultados no son urgentes para una aplicación eficaz de la protección radiológica.

5. CONCEPTO Y PERCEPCIÓN DEL RIESGO ANTE LOS DESARROLLOS Y TECNOLOGÍAS RADIATIVAS

En la sociedad actual se convive con riesgos que, en unos casos, son voluntariamente asumidos y en otros se suponen impuestos por los gobiernos, las grandes empresas o algún otro ente más o menos intangible. Estos riesgos están asociados al uso de las tecnologías disponibles, así como a la forma de vida y hábitos sociales, que ha llevado a la humanidad a vivir como hoy lo hace.

Siempre se ha comentado el rechazo del público a la implantación de nuevas tecnologías, hasta que eran asumidas. Este fue el caso del ferrocarril, el automóvil y su velocidad de marcha, etc. Sin embargo, para la radiactividad el proceso fue inverso, es decir, inicialmente se utilizaron los elementos radiactivos en aplicaciones que después se demostraron erróneas e, incluso, contó con una percepción positiva en los años 50, 60 del siglo pasado.

Los problemas que aparecieron con algunos productos de la industria química, como el DDT o la Talidomida, unidos al inicio de una conciencia de defensa ambiental, en los años 70, fueron parte de los responsables del rechazo del público a la tecnología en general. Ese rechazo incluyó a las radiaciones ionizantes, considerando que pueden causar daños, sin percibir su presencia y con efectos diferidos en el tiempo. Posteriormente, se unieron a esos argumentos, los accidentes de los reactores de la Isla de las Tres Millas y Chernobil. La falta de una información adecuada hizo que las consecuencias para la salud del primero, que fueron inexistentes, pasaran desapercibidas, a pesar de que la gravedad del accidente fue similar al del reactor de Chernobil.

Esta situación ha hecho que el público rechace todo lo relacionado con la radiactividad con una base emocional, en lugar de racional, sin ser capaz de separar los beneficios que ha recibido la humanidad, de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, de los perjuicios potenciales.

Esto se debe, fundamentalmente, a la falta de información que tiene el público sobre la tecnología en general.

En efecto, el salto cualitativo, en modelo de vida, ha sido espectacular en el último siglo, para las sociedades desarrolladas. El desarrollo tecnológico ha propiciado, entre otras diferencias, el que se duplique la esperanza de vida. La humanidad ha pasado de trabajar de sol a sol, para cubrir precariamente sus necesidades elementales, a una sociedad en la que proliferan las ofertas para ocupar el ocio.

Sin embargo, esta situación, ha propiciado otros problemas, diferentes a los existentes hace un siglo: así, a la lucha de la humanidad por conseguir los medios materiales para subsistir, se ha pasado a una situación diametralmente opuesta, en la que, nuestras preocupaciones son, entre otras, el medioambiente y los impactos producidos por algunas tecnologías (radiación electromagnética, radiactividad, dioxinas, etc.) Además, se ha extendido el síndrome NIMBY, acrónimo inglés de *No detrás de mi Casa* (Not In My Back Yard) que, aunque nació contra el emplazamiento de centrales nucleares, hoy aparece en cualquier actividad industrial. Nuestra forma de vida precisa de la energía; sin embargo, no dejamos que se construyan instalaciones de producción cerca de nuestro domicilio. La pasada primavera no fue posible construir centrales de producción de electricidad en Tarragona y Valladolid, alimentadas con gas natural y de ciclo combinado, por la oposición pública. Pero a este público, que quiere seguir consumiendo electricidad, no le importa que esa central se instale en cualquier sitio, con tal de que sea alejado, incluso, aunque en lugar de una central de gas fuera una central nuclear: " Ojos que no ven, corazón que no siente ", sin considerar que sus efectos - invernadero para la combustión o contaminación e irradiación en caso de accidente nuclear- se extenderían a todo el planeta, independientemente de su localización.

Realmente, la humanidad no parece interiorizar que la sociedad actual es posible gracias a los productos químicos -petroquímica, fertilizantes, fibras artificiales y sintéticas- a los productos farmacéuticos y en general a la tecnología que, para su desarrollo, precisa la energía.

Estas preocupaciones son muy diferentes, cuando se trata de países del tercer mundo; así, en la primera Conferencia Internacional del

Medio Ambiente de Estocolmo, en 1.972, Indira Gandhi citó que el mayor problema ambiental de la India era el hambre de su población: las prioridades de los países son diferentes, según su modelo de sociedad.

Todo lo anterior es interesante a la hora de comparar el riesgo percibido con el real. El riesgo es una magnitud que se establece, matemáticamente, según:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Daño}$$

Es decir, cuando desarrollamos una actividad, el riesgo será mayor o menor, según la probabilidad de ocurrencia que tenga el suceso y la magnitud del daño. Si bien es cierto que, cuanto más tecnológica es una sociedad, mayor es el número de riesgos a los que está sometida, también lo es que la probabilidad de ocurrencia del accidente disminuye y se cuenta con más mecanismos para amortiguar los daños.

A pesar de que el riesgo tiene un valor definido matemáticamente, la valoración que hacemos del riesgo de actividades diversas, es subjetivo y sin relación con su valor real. Así, por ejemplo, puede asegurarse que si nos dan a elegir entre actividades como fumar, viajar en automóvil, en avión, vivir cerca de una central nuclear y de un almacén de residuos radiactivos, elegiríamos en este orden. La magnitud real del riesgo crece en sentido contrario al percibido: unas decenas de miles de personas mueren de cáncer de pulmón, problemas coronarios y otras enfermedades relacionados con el tabaco (riesgo de 10^{-3}), unas cinco mil personas mueren de accidente de automóvil (riesgo de 10^{-4}), unas decenas mueren de accidente de aviación (riesgo de 10^{-5}), y por último el riesgo calculado para la radiación, de acuerdo con lo citado en el capítulo 4, considerada la relación causa-efecto de generación de cáncer lineal sin umbral, está entre 10^{-6} y 10^{-7} para las centrales nucleares y los almacenamientos de residuos, algo menor para estos últimos.

Esta situación se debe a la calidad de la información que tiene el público sobre la tecnología, que, a veces, le llega tergiversada o parcial.

Además, a veces se escuchan opiniones, en medios de comunicación, con poco conocimiento sobre la materia, por lo que se puede confundir. A esto hay que añadir, como ya se ha comentado, los impactos de las aplicaciones bélicas de la energía nuclear, los accidentes de reactores nucleares, etc.

Parece obvio que estos problemas de opinión pública se resolverían aumentando la información del público sobre la radiactividad. En el caso más favorable, de que llegara a aceptarse la energía nuclear, aparecerían problemas con otras actividades humanas, ya que existe un gran número de ellas que manejan elementos cancerígenos y que no se rechazan por desconocimiento. Más del 95 por ciento de los compuestos orgánicos conocidos son cancerígenos, aunque no se utilizan la mayor parte de ellos. A veces, el problema aparece en actividades sin riesgo aparente; por ejemplo, en las combustiones de hojas y residuos vegetales, que se realizan en casas campestres, no es difícil ver los humos azulados, conteniendo antraceno y fenantreno, hidrocarburos polinucleados cancerígenos y, seguramente, dioxinas pero, como no se sabe, no preocupa.

De todo esto, se deduce la gran diferencia que existe entre la percepción subjetiva que aplicamos a los riesgos de actividades personalmente asumidas, frente a los riesgos de actividades que suponemos impuestas, como serían fábricas, de electricidad o cualquier otro producto, antenas de radio o telefónicas, etc. Además, cabe comentar un aspecto sobre esta problemática, de gran interés: lógicamente no es posible que el público esté informado de cualquier aspecto de la ciencia y la tecnología, pero sería deseable que éstas estuvieran prestigiadas; para ello, han de dar una imagen humana y accesible y poner los medios para que su imagen pública sea positiva. A este respecto, debe destacarse la labor de divulgación que realizan los nuevos museos de Ciencia, en los que el público, más que llegar a conseguir una cultura enciclopédica, situación por otra parte imposible, puede percibir los beneficios que recibe en una sociedad tecnológica y llegar a entender cuan impregnada en los desarrollos científicos se encuentra la sociedad actual.

6. CONCLUSIONES

De lo expuesto en este discurso, podrían extraerse muchas conclusiones aunque, a modo de síntesis, se recogen las siguientes:

- El uso de la radiactividad, con fines pacíficos, ha reportado gran número de beneficios a la humanidad, tanto en sus aplicaciones farmacéuticas, como médicas, industriales y de investigación y es previsible que continuará aportándolos a través de actividades, poco utilizadas, como la irradiación de alimentos y otras que puedan desarrollarse en el futuro.

A modo de ejemplo, la producción de energía eléctrica, mediante reactores nucleares, sustituyendo a los procesos de combustión, ya ha evitado el vertido a la atmósfera de miles de millones de toneladas de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, además de metales pesados, hidrocarburos, cenizas, etc.

- La utilización de la radiactividad presenta riesgos, como cualquier otra actividad humana. Estos riesgos están tasados, y sus valores máximos, en las hipótesis más desfavorables, son bastante inferiores a los de otras actividades humanas, voluntariamente aceptadas.

Es de suponer que la humanidad volverá a confiar en la radiactividad cuando, con más conocimientos, sea capaz de valorar, de forma real, los impactos positivos de esta tecnología, siempre que se mantenga el modelo de sociedad, aunque es de suponer que, si esto se consiguiera, emergerán otros “fetiches” que recogerían el rechazo de la sociedad ya que, la condición humana, con sus virtudes y defectos, es difícil que cambie.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) RICHARD B. FIRESTONE. (2000) The Berkeley Laboratory Isotopes Project's. Ernest O. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- (2) RESEARCH NEWS (1999). Chemical Elements Discovered at Lawrence National Laboratory.
- (3) PHYSICSWEB. News: August 2001.

- (4) S. GLADSTONE Y A. SESONSKE (1975) “ Ingeniería de Reactores Nucleares “ Editorial Reverte..
- (5) DAVID IRVING. (1967) The Virus House. William Kimber Ed. London.
- (6) Centre de l'Aube. Disposal Facility. Andra, julio 1.996.
- (7) J.M. SÁNCHEZ RON. (1998) “Marie Curie y la Radiactividad”. Consejo de Seguridad Nuclear..
- (8) ALLAN HEDIN (1997) “Spent nuclear fuel – how dangerous is it? “ SKB Technical Report 97- 13. March.
- (9) R. CADÓRNIGA (1999) Interacciones Medicamentosas (y otros factores modificadores de la respuesta). Fundación SB,.
- (10) P. G. WELLING, L.P. BALLANT. (1994) Handbook of Experimental Pharmacology, Vol 110, Pharmacokinetics of DrugsSpringer- Verlag, Heilderberg,.
- (11) TOMÁS CALDERÓN GARCÍA. La Irradiación de Alimentos. McGraw-Hill. Madrid, 2.000.
- (12) BNFL World. Issue 11. March, 2001.
- (13) A. ALONSO SANTOS. (1998) "Problemática Actual Derivada de los Efectos de las Radiaciones". Punto de vista del organismo regulador. Madrid, 27 de noviembre de 1.998.
- (14) EIKE ROTH (1997). The Brittle Basis of Linearity. Low doses of ionizing radiations: biological effects and regulatory control. International Conference held in Seville, Spain, 17-12 Nov. 1997. IAEA-TECDOC-976.
- (15) ICPR 60: (1991) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Pergamon Press.
- (16) NRPB. Risk of Radiation Induced Cancer at Low Dose and Low Dose Rates for Radiation Protection Purposes. Vol. 6, No. 1, 1.995.
- (17) UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Annex B: Adaptative Response to Radiation in Cells and Organisms, New York, 1994.
- (18) A. GABBERD. (1998) "Coal Combustion: Nuclear Resource or Danger". ORNL, Review Paper.
- (19) IDAE. Serie Informes. Varios Autores. "Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica. Análisis del Ciclo de la Vida de Ocho Tecnologías de Generación Eléctrica. Madrid, julio 2.000.
- (20) COLEGIO OFICIAL DE FÍSICOS. (1999).Varios Autores. "Cambio Climático. Hacia un nuevo modelo energético". Madrid,
- (21) Foro de la Industria Nuclear Española. "Cambio Climático. La Energía Nuclear: Parte de la Solución". Madrid, noviembre 2.000.

- (22) Bundesamt für Strahlenschutz. "Wirkung Kleiner Strahlendosen" in Ausgewählte Arbeitsschwerpunkte des BFS. Jahresbericht 1999.
- (23) Nuclear Energy Agency. OECD. "A Critical Review of the System of Radiation Protection". First Reflections of the OECD Nuclear Energy Agency's Committee on Radiation Protection and Public Health. OCED, 2000.
- (24) Jan Olof Snihs y Gustav Åkerblom. "Use of Deplete Uranium in Military Conflicts and Possible Impact on Health and Environment". SSI News, 8, Dec. 2000.
- (25) Merill Eisenbud "Environmental Radioactivity". Academic Press. 3th Edition. 1987.
- (26) Myron Pollicove, Carl Paperiello. U.S.N.R.C. "Health Effects of Low Dose Radiation: Molecular Cellular and Byosystem Response". IAEA- CN-67/63. Low Doses of Ionizing Radiation Biological Effects and Regulatory Control, International Conference. Seville, Spain. Nov.1997.
- (27) T.D. Luckey. "Ionizing Radiation Decreases Human Cancer Mortality Rates". IAEA- CN-67/64. Low Doses of Ionizing Radiation Biological Effects and Regulatory Control, International Conference. Seville, Spain. Nov. 1997.

APÉNDICE

TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS A LA RADIATIVIDAD Y SUS IMPACTOS

La situación actual de la ciencia y la tecnología, permite que existan procedimientos alternativos, en la mayor parte de sus aplicaciones que, pueden complementar o sustituir, a los utilizados normalmente. No podía ser menos en las aplicaciones de la radiactividad.

En la mayor parte de las aplicaciones que se citan en el Capítulo 3, es posible sustituir los radisótopos. En algunos casos, se pierde la rapidez o la facilidad de medida que propicia este fenómeno físico. Así, para la farmacocinética o la diagnosis "in vitro" pueden utilizarse procedimientos analíticos convencionales. Las aplicaciones al diagnóstico, "in vivo", o terapéuticas, en muchos casos se están sustituyendo con ventaja, mediante los aceleradores de partículas y por procedimientos magnéticos.

En aplicaciones industriales, como medidas de niveles, espesores, etc., puede sustituirse midiendo otras constantes físicas como capacidad eléctrica, ultrasonidos y otros.

Por último, en las aplicaciones a la investigación, siempre existen procedimientos analíticos, alternativos, que pueden facilitar, o dificultar, la determinación necesaria.

Tiene una gran importancia e, incluso, trascendencia, la de los procedimientos alternativos de obtención de energía. Estos procedimientos pueden ser de dos tipos: mediante combustión (carbón, petróleo, gas natural) y mediante energías renovables (hidráulica, solar térmica y fotovoltaica, eólica, biomasa, etc.)

Los procesos industriales por combustión presentan problemas de emisión de residuos muy variados. Así, el carbón genera gases (CO_2 , CO , NO_x , SO_x), inquemados, cenizas volantes y fijas, metales pesados; el petróleo (fueloleo) genera los mismos gases, pero no cenizas en cantidades comparables aunque, algunos petróleos, por su contenido en ciertos metales, pueden emitirlos como es el caso, por ejemplo, del petróleo venezolano, que contiene vanadio en forma organometálica. El combustible más limpio, al no dar lugar a cenizas y mezclarse mejor con el aire comburente es el gas natural, pero siempre son inevitables los gases CO_2 , CO , y NO_x , aunque su mejor rendimiento, cuando el gas se utiliza en ciclo combinado, o en cogeneración, disminuye considerablemente el volumen final de esos gases.

El problema principal de estos emisores es que son gases de los que dan lugar al efecto invernadero, es decir, dejan pasar la mayor parte de la radiación solar pero impiden la salida de parte de su reflexión en la tierra, modificando el equilibrio, que se alcanza si $2/3$ de la radiación solar es absorbida por la tierra y $1/3$ se refleja.

El cambio climático es un fenómeno que ha preocupado a los gobiernos. Ya en el año 1.979 se celebró la primera conferencia mundial sobre el clima, que sirvió para tomar conciencia de que la combustión de los combustibles fósiles, podría generar la modificación del clima de la tierra. En 1.988 se constituyó, en el seno de Naciones Unidas, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y en 1.990 se celebró en Ginebra la segunda conferencia mundial sobre el clima, y se contó con

el primer informe del IPCC. En 1.992, 155 países firmaron, en Río de Janeiro, el Convenio Marco sobre Cambio Climático, que dio la salida a una serie de reuniones internacionales cuyo objetivo fue negociar un Protocolo que estableciese obligaciones de limitación y reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para los años 2.005, 2.010 y 2.020. En conferencias sucesivas, cinco hasta el momento, denominadas Conferencias de las Partes, se han adoptado y desarrollado los elementos del Protocolo de Kioto (1.997, 3ª Conferencia de las Partes).

El último informe del IPCC, presentado en marzo pasado en Accra (Ghana), reconoce que existen tecnologías para reducir las emisiones de GEI. Propugna la sustitución del carbón y el petróleo por otras fuentes energéticas más limpias -energías renovables, gas natural, extensión de vida de las centrales nucleares, etc.-. Además, los autores subrayan que hay disponibles tecnologías y prácticas, capaces de reducir las emisiones a la mitad, hasta el año 2.020; estas tecnologías se basan en un uso más eficiente de la energía en consumo final: edificios, transporte y fábricas.

Para potenciar el uso de estas técnicas, el IPCC propugna que los gobiernos tomen las iniciativas políticas adecuadas, incentivando a las empresas y sorteando las barreras socioeconómicas que dificultan su implantación.

Algunas energías renovables están muy desarrolladas, como es el caso de la energía hidráulica, aunque también presenta problemas de impacto, al anegar grandes extensiones de terreno y modificar los regímenes estacionales de los cauces, en los que se construyen las presas.

Por su parte, las tecnologías solar, eólica, etc., presentan dos desventajas fundamentales: su baja concentración, que obliga a ocupar grandes extensiones, lo que supone un fuerte impacto al paisaje y su irregularidad o funcionamiento no estacionario. No se tienen garantías de continuidad de flujo del viento, de días sin nubes y menos aún de mayor producción en los periodos de puntas de consumo. Estas circunstancias

conducen a previsiones de operación de algo menos de 2000 horas/año, muy por debajo de las más de 8000 horas/año que puede llegar a garantizarse con una central térmica.

La implantación de este tipo de energías, precisa sistemas de almacenamiento de energía que, además de la necesidad de desarrollarlos, aumentarían considerablemente la inversión.

Por último, toda la infraestructura que precisan, obliga a construir estructuras metálicas y productos a veces tóxicos (As para células fotovoltaicas, Pb para acumuladores, Fe para estructuras, etc.)

Se estima que, todo lo comentado anteriormente, conduce a que la aportación máxima de las energías renovables a la sociedad actual, en su aprovechamiento más favorable, estaría alrededor de un 15 % de la energía primaria.

Como resumen, cabe señalar que las tecnologías de producción energética, presentan impactos futuros para la humanidad que, de ser ciertos sus efectos (aumento de la temperatura media de la tierra, fusión de los casquetes polares, desertización, catástrofes naturales, etc.) podrían presentar unos problemas para todo el planeta, bastante más preocupantes que los reseñados en el capítulo anterior para la radiactividad, en la que se habla de impactos difícilmente detectables, para las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, cuando se considera el conjunto de riesgos de ocurrencia natural o debidos a aplicaciones de otras tecnologías.

Si a todo esto se añade, de una parte, el impacto debido al uranio contenido en el carbón, o a los elementos cancerígenos contenidos en el petróleo, carbón y generación de células fotovoltaicas, muy superior al impacto de las tecnologías basadas en la energía nuclear, el panorama podría ser muy diferente al percibido por el público.