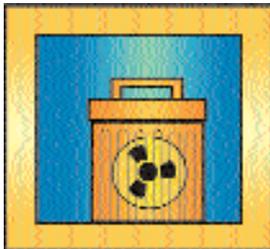


Los desechos nucleares: ¿de dónde vienen y hacia dónde van?



La tecnología nuclear, a pesar de sus grandes beneficios, también tiene riesgos y problemas. Quizá el más acuciante sea el almacenamiento de desechos nucleares, para lo que aún no se cuenta con una solución totalmente satisfactoria.

**Verónica E. Badillo-Almaraz
y Juan Antonio Pérez**

La energía es un requisito indispensable para el desarrollo seguro y durable de cualquier país. Se necesita para responder a las necesidades básicas de transporte, electricidad, actividades comerciales e industriales. El aumento en la demanda del consumo de energía va íntimamente ligado con la explosión demográfica de los últimos años. Hoy las necesidades energéticas mundiales son cubiertas en un 6.8 por ciento gracias a la energía nuclear, en 13.8 por ciento por las energías renovables y en 79.5 por ciento por las energías fósiles (carbón, petróleo y gas natural) (*Les défis du CEA*, 2003). La energía nuclear ofrece múltiples ventajas: es competitiva, segura, y garantiza el abastecimiento en energía, evitando que se acaben las reservas de combustibles fósiles y limitando las emisiones de gas carbónico. El eslabón que falta al final de la cadena es una solución confiable al tratamiento del combustible una vez que ha sido aprovechado; una solución que sea aceptada por los ciudadanos, económica y sin peligro para el medio ambiente ni para la salud.

Teniendo en cuenta que las reservas de petróleo y de gas son limitadas a mediano y largo plazos, y que además contribuyen al calentamiento del planeta por la emisión de gases de efecto invernadero, la diversidad energética se vuelve hacia las energías renovables y el reforzamiento de la energía nuclear. La energía nuclear será entonces esencial entre las fuentes de energía en el futuro, pero antes deberá resolver uno de sus grandes problemas: ¿qué hacer con los desechos nucleares?

¿QUÉ SON LOS DESECHOS NUCLEARES?

Según la definición de la Agencia Internacional de Energía Atómica, residuo o desecho radiactivo es “toda materia que contiene radionúclidos en una concentración superior a los

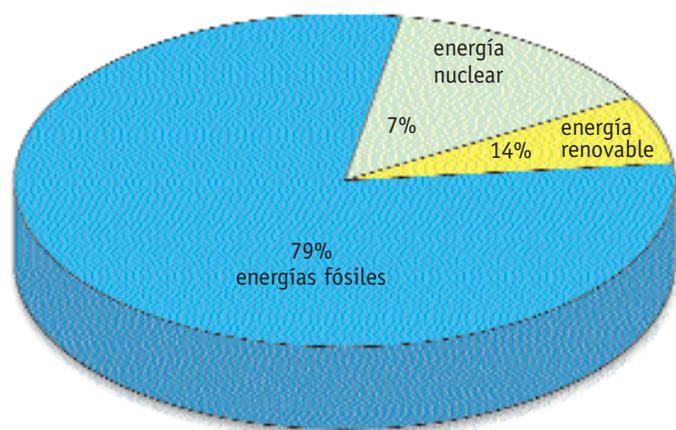


Figura 1. Abastecimiento de las necesidades energéticas mundiales.

valores que las autoridades competentes consideran admisibles en los materiales adecuados para ser utilizados sin ningún control y para la que no está previsto ningún uso”. Esta definición nos conduce al término “radionúclido”, cuyo significado es “isótopo de un elemento químico que posee la propiedad de emitir radiactividad”.

Recordemos que en el centro de todo átomo hay un núcleo formado por protones y neutrones apretados los unos contra los otros. Para un elemento químico hay un número definido de protones, pero puede variar el número de neutrones en su núcleo; un isótopo de un elemento químico tendrá pues el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones.

Cuando el número de estas partículas, protones y neutrones, es muy elevado, el núcleo es inestable y “busca” la estabilidad expulsando partículas con una energía definida, o bien energía pura. Así tenemos la expulsión de partículas alfa, formadas por dos protones y dos neutrones; de partículas beta, que son electrones resultantes de la transformación de un neutrón en un protón, o de rayos gamma, que son radiaciones invisibles y muy penetrantes.

La radiactividad consiste pues en la emisión de partículas o radiaciones por parte de los átomos (isótopos) de algunos elementos. Son radiactivos aquellos elementos que tienen un número muy elevado de protones y neutrones.

CLASIFICACIÓN DE LOS DESECHOS NUCLEARES

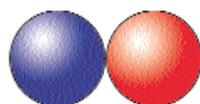
A diferencia de los desechos tóxicos industriales, los desechos nucleares se pueden clasificar en categorías bien definidas, además de que las cantidades implicadas son mucho menores que las de los residuos industriales tóxicos.

Los desechos radiactivos se caracterizan esencialmente por la naturaleza de los elementos que contienen y por su actividad por unidad de volumen o de masa (expresada en becquerels:

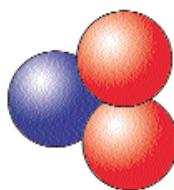
número de desintegraciones espontáneas por segundo). Esto último permite evaluar la cantidad de átomos radiactivos contenidos en el desecho). A cada uno de estos radionúclidos corresponde un *tiempo de vida media radiactiva*, el cual indica el tiempo necesario para que su actividad disminuya a la mitad.



Hidrógeno ^1_1H



Deuterio ^2_1H



Tritio ^3_1H

Figura 2. Los tres isótopos del hidrógeno. Un isótopo se caracteriza por su número atómico (número de protones: izquierda inferior) y número de masa (número de protones + número de neutrones: izquierda superior).

La clasificación de los desechos radiactivos difiere en los distintos países, pero de manera general se clasifican, según la naturaleza, el nivel de radiactividad y la *vida media* de los radionúclidos que los constituyen, en diferentes categorías:

- a) Muy baja actividad
- b) Baja actividad
- c) Mediana actividad
- d) Actividad elevada

Se les llama desechos de vida media larga cuando su periodo de desintegración (sinónimo de vida media) es superior a 30 años, y de vida media corta en el caso contrario. Por ejemplo, el cesio se produce en pequeñas cantidades durante las reacciones de fisión del uranio 235. Su isótopo 137 es muy radiactivo y tiene una vida media de 30 años. Por el contrario, el isótopo 135 es poco radiactivo y tiene una vida media muy larga (2.3 millones de años).

En el caso particular de México, los desechos se clasifican conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-004-NUCL-1994 en desechos de nivel bajo, intermedio y alto, desechos mixtos y sales de uranio y torio.

ORIGEN DE LOS DESECHOS NUCLEARES

La energía nuclear se obtiene mediante la fisión nuclear (rompimiento del núcleo), así como mediante la fusión nuclear (unión de núcleos). La fisión es la que se emplea actualmente en las centrales nucleares. La fisión nuclear la consiguió por primera vez el científico italiano Enrico Fermi en 1942. Fermi construyó el primer reactor nuclear; en él se usaba uranio para producir calor. Este tipo de reactor es el que se emplea en las centrales nucleares de producción de energía eléctrica.

El descubrimiento del uranio como el combustible de los reactores nucleares impulsó la prospección y, en su caso, la extracción del uranio natural en todo el mundo. El mineral natural contiene habitualmente una concentración de uranio comprendida entre 0.1 y 0.5 por ciento. Una vez triturado y molido, se ataca con ácido sulfúrico para disolver el uranio. La disolución resultante (algunos cientos de miligramos de uranio por litro) se concentra a continuación hasta un contenido del orden del 70 por ciento, en forma de la llamada “torta amarilla”, destinados a la fabricación del elemento combustible.

El uranio no extraído, así como sus descendientes radiactivos (elementos producidos en la transformación radiactiva –emisión de partículas o radiaciones– de un radionúclido), queda en los residuos sólidos y líquidos. Se trata de residuos de muy

Se les llama desechos de vida media larga cuando su periodo de desintegración (sinónimo de vida media) es superior a 30 años

baja actividad, pero de vida media muy larga. El riesgo principal es la emisión permanente de radón, gas radiactivo cuyos descendientes se pueden fijar en los pulmones. También existe un riesgo menos importante debido al transporte del radio por el agua.

Las operaciones sucesivas en el ciclo del combustible nuclear producen desechos. La “torta amarilla” se transforma en dióxido de uranio y luego en hexafluoruro de uranio, para lograr el enriquecimiento del uranio, es decir, el aumento en el contenido del isótopo uranio-235, que es material fisionable, cuyos núcleos se pueden fragmentar. Actualmente, más del 90 por ciento del uranio natural que se somete a la operación de enriquecimiento no se utiliza (el uranio natural está constituido por un 0.71 por ciento del isótopo uranio-235, y 99.3 por ciento de uranio-238). Se trata de un residuo de muy baja actividad, pero de vida media muy larga.

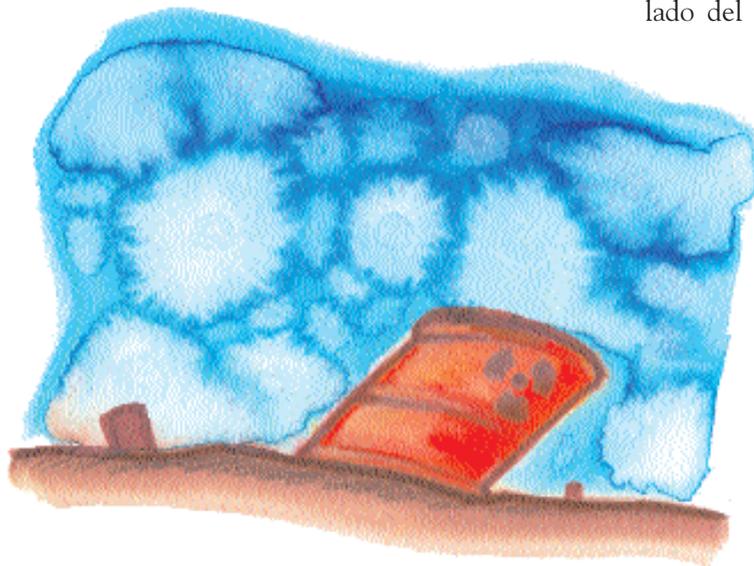
La irradiación de los combustibles en el seno del reactor dura tres años y conduce a la formación de radionúclidos muy variados, resultado de las reacciones de fisión o de captura de neutrones en las que se ven implicados los núcleos pesados (uranio y plutonio), y en menor proporción por la activación de otros elementos presentes en el combustible o en las estructuras que lo rodean. La composición inicial del combustible se ha transformado notablemente. Después de permanecer tres años en el seno del reactor, el combustible quemado es descargado del reactor. En el momento de descargar, el combustible quemado desprende mucho calor, debido a la emisión intensa de radiaciones beta y gamma. Esta es la razón por la que se deja “enfriar” durante un tiempo en una piscina que se encuentra a un

lado del reactor. Después de este enfriamiento, actualmente se practican en el mundo dos formas de tratar los combustibles irradiados:

La primera consiste en reprocesar estos combustibles para separar el plutonio y el uranio de los otros productos e inmovilizarlos en bloques de vidrio destinados al almacenamiento profundo. La segunda consiste en dejar los combustibles usados sin tratar para almacenarlos directamente. Es el reprocesamiento de este combustible irradiado el que genera la mayor parte de los residuos de actividad elevada. Efectivamente, los desechos radiactivos de actividad elevada provienen esencialmente del tratamiento del combustible quemado que sale de las plantas nucleoelectricas. Esta operación se hace necesaria para recuperar el uranio y el plutonio reutilizables que contiene, para producir energía en el futuro. Estos dos elementos representan 96 por ciento de la masa del combustible quemado (95 por ciento de uranio y 1 por ciento de plutonio). El reprocesamiento del combustible irradiado del reactor consiste en varias operaciones mecánicas y químicas cuyo objetivo es separar en disolución acuosa el uranio y el plutonio de los otros productos que componen el combustible gastado. Estos productos constituyen los llamados “desechos de actividad elevada”.

Estos desechos contienen radionúclidos que emiten radiaciones alfa, beta y gamma de vida media muy superior a 30 años. Representan por mucho la fuente principal de desechos en términos de actividad, pero sólo una pequeña parte en términos de volumen. Están compuestos de productos derivados de la fisión nuclear; de ahí que se les conozca como “productos de

La irradiación de los combustibles en el seno del reactor dura tres años y conduce a la formación de radionúclidos muy variados, resultado de las reacciones de fisión o de captura de neutrones en las que se ven implicados los núcleos pesados (uranio y plutonio), y en menor proporción por la activación de otros elementos presentes en el combustible o en las estructuras que lo rodean. La composición inicial del combustible se ha transformado notablemente. Después de permanecer tres años en el seno del reactor, el combustible quemado es descargado del reactor. En el momento de descargar, el combustible quemado desprende mucho calor, debido a la emisión intensa de radiaciones beta y gamma. Esta es la razón por la que se deja “enfriar” durante un tiempo en una piscina que se encuentra a un lado del reactor. Después de este enfriamiento, actualmente se practican en el mundo dos formas de tratar los combustibles irradiados:



fisión”, y de otros elementos (neptunio, americio y curio) que se encuentran en cantidades despreciables (menos del uno por ciento de la masa del combustible quemado), y que son producidos por captura sucesiva de neutrones a partir de los isótopos 235 y 238 del uranio. Los desechos de actividad elevada son altamente radiactivos y termógenos (liberan calor) durante las primeras décadas de su existencia, ya que contienen grandes concentraciones de productos de fisión de vida media corta como el estroncio-90 (28 años) y el cesio-137 (30 años). Son considerados como los desechos últimos del ciclo del combustible nuclear, ya que no tienen ningún interés energético. Otros productos de fisión de suma importancia debido a su movilidad química y a su abundancia en el combustible quemado son el yodo-129 (15.7 millones de años), el cesio-135 y el tecnecio-99; tres importantes elementos de vida media larga.

Las actividades de reprocesamiento son más abundantes en Europa y Japón que en los Estados Unidos. Francia es la nación más activa en Europa en el área de reprocesamiento, y posee un programa de investigación complementaria para la separación de radionúclidos de vida media larga.

En un reactor nuclear, además de la reacción de fisión nuclear, se producen reacciones de captura de neutrones; es decir, los neutrones liberados en cada reacción de fisión son utilizados para producir isótopos radiactivos. Estas reacciones de captura de neutrones por los distintos materiales que contienen al elemento combustible son el origen de los desechos clasificados como elementos de actividad media y vida media larga. Representan la masa más importante de desechos de vida media larga (más del 90 por ciento), pero contienen sólo una pequeña parte de la radiotoxicidad (menos del 10 por ciento). Estos desechos se presentan en forma extremadamente diversa. Se trata de trozos del encamisado metálico que contenían al combustible en un reactor de agua a presión, las extremidades de los elementos combustibles en el mismo reactor, además de desechos sólidos de naturaleza muy diversa, así como algunas matrices sólidas (cementos, asfalto) que contienen los contaminados.

Los desechos radiactivos también provienen de las aplicaciones de los isótopos radiactivos en medicina e industria, así como de los laboratorios de investigación científica y tecnológica. Se trata de desechos de actividad baja o mediana y de vida media inferior a 30 años, emisores de radiaciones beta o gamma. Los desechos radiactivos generados por las instituciones y empresas de investigación y aplicaciones comprenden fuentes radiactivas selladas y gastadas, desechos sólidos (guantes, filtros, resinas

Francia es la nación más activa en Europa en el área de reprocesamiento, y posee un programa de investigación complementaria para la separación de radionúclidos de vida media larga

intercambiadoras de iones) piezas metálicas utilizadas en los laboratorios o provenientes del reprocesamiento del combustible nuclear, así como otros materiales (cables, aparatos diversos, tierras, etcétera). Los desechos líquidos comprenden soluciones acuosas producidas en los laboratorios de investigación, en los reactores y en las instalaciones de reprocesamiento del combustible quemado (soluciones que contienen diferentes sales, nitratos, boratos, fosfatos, sulfatos), así como líquidos orgánicos (aceites o líquidos de centelleo) con isótopos de actividad muy baja o totalmente decaídos.

DESTINO DE LOS DESECHOS NUCLEARES

Al preguntarse qué hacer con los desechos nucleares, cada país responde con una solución muy particular. Desde hace varios años, algunos países, entre ellos Francia, han optado por el ciclo cerrado del combustible nuclear (un conjunto de etapas del combustible (uranio) desde la extracción del mineral, pasando por la

CUADRO 1.

Principales desechos y su clasificación

	Vida media corta (menos de 30 años)	Vida media larga (más de 30 años)
Muy baja actividad	Desechos orgánicos (aceites o líquidos de centelleo).	Residuos del mineral de uranio natural.
Baja actividad	Desechos que provienen de las aplicaciones de los isótopos radiactivos en medicina e investigación.	
Mediana actividad		Distintos materiales que contenían al elemento combustible (trozos del encamisado, tapones), diversas matrices sólidas (cementos, asfalto).
Actividad elevada	Cesio-137 y estroncio-90.	Productos derivados de la fisión nuclear (yodo-129, tecnecio-99), actínidos menores (neptunio, americio y curio) y actínidos mayores (uranio y plutonio).

fabricación del elemento combustible, el tratamiento del combustible quemado hasta el almacenamiento de desechos, después de su utilización en el reactor. Se le llama “cerrado” luego que el combustible se reprocessa con fines de recuperar el uranio y el plutonio para su posible reutilización).

En estos países se desarrollan procesos industriales para confinar las soluciones acuosas radioactivas que provienen del tratamiento de desechos y se realizan numerosos estudios para seleccionar materiales aptos para confinar e inmovilizar los radionúclidos y reducir de esta forma el volumen de desechos.

El objetivo de confinar los desechos es hacer que pierdan toda su nocividad y garantizar una inmovilidad efectiva y durable de los radionúclidos que contienen. Para lograr esto, se requieren dos operaciones complementarias: la *inmovilización*, que consiste en incorporar los desechos en el seno de una matriz (cemento, vidrio, asfalto), dependiendo del tipo de desechos; y el *embalaje* de esta matriz de desechos en un contenedor formado de una o varias capas de distintos materiales (por ejemplo, acero inoxidable). Al

conjunto resultante se le llama *bloque* de desechos.

En Francia, desde 1978, así como en Gran Bretaña, Japón y Rusia, la matriz industrial de referencia para confinar las soluciones de productos de fisión que se producen en el tratamiento de desechos, es el vidrio de boro y sílice. El vidrio, único mineral que permite incluir en su estructura desordenada todos los elementos presentes en las soluciones de productos de fisión y actínidos menores, ha sido seleccionado para confinar los desechos de actividad elevada. Además, por su estructura desordenada, el vidrio es poco sensible a las radiaciones.

Las investigaciones se concentran en la gestión de desechos de vida media larga, ya que la gestión de desechos de vida media corta no representa ningún problema que no se pueda resolver actualmente, y en la práctica la tecnología actual ofrece garantías sobre su control. Para la gestión de desechos de vida media larga, Francia es la nación más activa en Europa en el área de reprocessamiento, y posee un programa de investigación complementaria para la separación y almacenamiento de radionúclidos de vida media larga. Explora tres vías que son:

- La separación de desechos y su transmutación (proceso que permite la conversión de isótopos de vida media larga en isótopos de vida media corta, por medio de una reacción nuclear inducida por neutrones –captura, fisión–, que permite reducir la cantidad de desechos radiactivos de vida media larga).
- El acopio a largo plazo en laboratorios o acopio en superficie, y
- el entierro en un cementerio nuclear, también llamado almacenamiento geológico profundo.

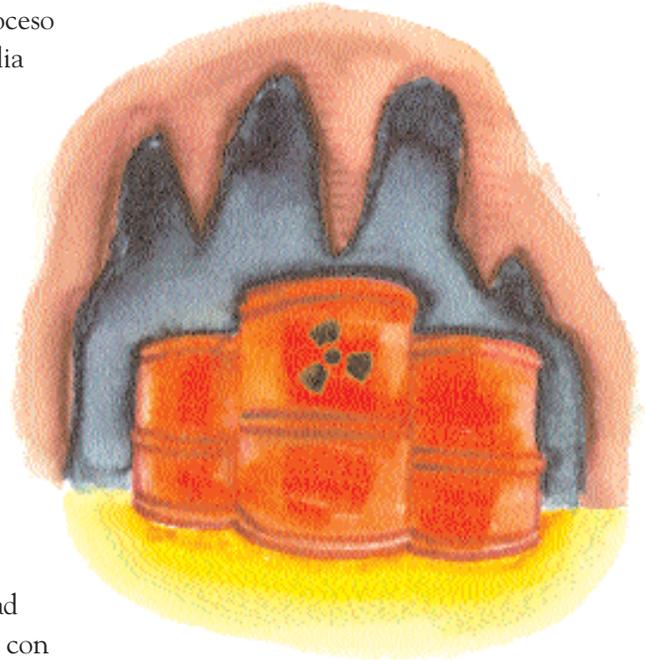
Otros países como Estados Unidos de América, Suecia y Finlandia han renunciado al reprocesamiento del combustible nuclear y lo almacenan en las piscinas de las centrales nucleares tal cual sale del reactor, en espera de una solución definitiva. Aunque se incremente la capacidad de estas piscinas, terminarán por llenarse, casi coincidiendo con el final de la vida útil de las centrales nucleares.

Numerosas investigaciones son pues dirigidas para encontrar esa solución definitiva al problema de los desechos nucleares, ya sea en forma de bloque de desechos vitrificados o bien como el combustible quemado sin reprocesar.

El almacenamiento geológico profundo constituye la solución de referencia en la mayoría de los países. Casi todos piensan enterrar los residuos nucleares de actividad media y elevada a varios centenares de metros de profundidad en formaciones geológicas estables y prácticamente impermeables. Un almacenamiento geológico profundo presenta múltiples ventajas, ya que constituye una barrera natural capaz de retardar e incluso detener la migración hacia la biosfera de los radionúclidos liberados luego que la corrosión de los contenedores metálicos se haga inevitable. Existen diferentes formaciones geológicas interesantes como son la sal, la arcilla, el granito y algunas rocas volcánicas, dependiendo de la situación geográfica de cada país.

El almacenamiento en una formación geológica profunda se ha instaurado en un solo país. Los Estados Unidos de América aprobaron (2001-2002) el proyecto de almacenamiento geológico profundo en rocas volcánicas en el sitio de Yucca Mountain (desierto de Nevada) para el almacenamiento definitivo del combustible quemado. Muchos otros países se preparan para seguir este ejemplo.

En Finlandia se autorizó la construcción de un centro de almacenamiento desde el año 2000 en el granito para los combustibles quemados (considerados como desechos últimos). Este centro deberá estar en operación en el año 2020. En Sue-



cia, el centro de almacenamiento definitivo de combustibles quemados, localizado en una formación de granito a 500 m bajo tierra, deberá estar en operación entre el año 2015 y 2050-2060, fecha de su clausura.

El acopio en superficie o acopio provisional en laboratorios es otra opción de gestión razonable y provisional que amenaza con durar, por lo que se le da una nueva definición y ahora se menciona como “acopio en superficie a largo plazo”. Los Países Bajos prevén comenzar este año a almacenar desechos de actividad elevada en una instalación en superficie. En Noruega, un sitio de acopio y de almacenamiento de desechos de baja y de mediana actividad se inauguró en 1998. Australia prevé almacenar de manera definitiva sus desechos de actividad elevada, provenientes de un eventual almacenamiento a profundidad media (100 metros, en un sitio aún no seleccionado).

La mayoría de los países optan por explorar una sola opción, a diferencia de Francia, país que además de estudiar lugares potenciales para el almacenamiento profundo, explora

Los residuos nucleares
son considerados
por la opinión pública
como la primera
causa de riesgos
para el medio ambiente

las otras vías de acopio en superficie a largo plazo, así como la transmutación. El principio de la transmutación aplicada al tratamiento de desechos nucleares consiste en modificar los núcleos de elementos de vida media larga con el fin de transformar estos isótopos en cuerpos más estables o con una vida media muchos más corta, o bien que presenta una radiotoxicidad mínima.

La energía nuclear, al igual que las otras fuentes de energía, están obligadas a ser seguras, competitivas y deben contribuir a evitar que se acaben las reservas de combustibles fósiles y a disminuir las emisiones de gas carbónico. En la producción de energía nuclear, solo falta poner en práctica una solución al final del ciclo del combustible nuclear —el tratamiento de desechos radiactivos— que sea aceptado por los ciudadanos, que sea económico y sin peligro para el medio ambiente. A ambos lados del Atlántico, los residuos nucleares son considerados por la opinión pública como la primera causa de riesgos para el medio ambiente.

La gestión de desechos del ciclo electro-nuclear constituye la preocupación de la opinión pública y el pretexto que encuentran los opositores a esta forma de energía.

En los inicios de la aventura nuclear, el problema de los residuos radiactivos se consideró marginal; luego se consideró serio pero remediable. Actualmente se percibe como uno de los problemas más complejos y uno de los mayores desafíos de este siglo.

En México, la gestión de los desechos radiactivos la realizan la Central Laguna Verde de la Comisión Federal de Electricidad y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, de acuerdo con las licencias y autorizaciones que les otorga la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias. La Central Nuclear Laguna Verde lleva a cabo la gestión de los desechos generados en su propia central y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares tiene a su cargo la gestión de los desechos generados en todo el país por las instituciones y empresas dedicadas a la investigación y aplicación de radioisótopos.

Como puede observarse, se han dado pasos importantes en la búsqueda de una solución confiable al tratamiento de los desechos radiactivos. No obstante, hay muchos obstáculos por vencer antes de dar las respuestas definitivas a la pregunta de qué hacer con los desechos nucleares.

Bibliografía

- Les defis du CEA, *Énergie Nucléaire, des pistes pour le futur*, abril-mayo de 2003, núm. 95. Francia.
- Clefs CEA, *Les recherches pour la gestion de déchets nucléaires*, núm. 42, primavera 2002, Francia.
- “Los residuos nucleares. Introducción al debate”, *Mundo Científico* 184, noviembre 1997.
- Norma Oficial Mexicana, NOM-004-NUCL-1994.

Verónica E. Badillo Almaraz obtuvo su doctorado en radioquímica en la Universidad de París-XI, Francia, trabajando sobre el almacenamiento geológico de los desechos nucleares en el *Comissariat à l'Énergie Atomique*. Actualmente es profesora-investigadora en el Centro Regional de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas y trabaja sobre la adsorción de actínidos y productos de fisión en superficies minerales.

ebadillo@cantera.reduaz.mx

Juan Antonio Pérez tiene 28 años de experiencia como docente en la Universidad Autónoma de Zacatecas. Es doctor en Matemáticas por la Universidad de Sheffield del Reino Unido. Es autor de los libros *La herencia matemática del siglo XX* y *Galería matemática*. Actualmente trabaja en la modelación matemática de la adsorción en superficies minerales.

japerez@cantera.reduaz.mx