

# Desarrollo sostenible y generación de electricidad: Comparación de las repercusiones de la evacuación de desechos

*El OIEA y otras organizaciones están evaluando enfoques para comparar los desechos y los métodos de evacuación de las cadenas energéticas*

por Roger Seitz

Las repercusiones en la salud y el medio ambiente que pueden derivarse de la evacuación de desechos constituyen un problema cada vez mayor para el desarrollo sostenible de la sociedad humana. Los desechos que suponen peligros potenciales para la salud humana y el medio ambiente se generan en diversos sectores industriales (explotación de minas y canteras, agricultura, rama manufacturera, generación de electricidad, medicina, etc.). Cuando se someten a una gestión adecuada, estos desechos plantean riesgos mínimos para la salud humana y el medio ambiente.

Sin embargo, las preocupaciones sobre el medio ambiente se deben a que la cantidad de desechos que se genera está aumentando (y se prevé que continúe así) como resultado de los aumentos que se registran en la población, la industrialización y la urbanización a nivel mundial. Por ende, un problema que se enfrenta al elaborar una estrategia para el desarrollo sostenible es prestar los servicios necesarios para apoyar el crecimiento económico y mejorar la calidad de la vida, y al mismo tiempo limitar los riesgos potenciales y las cantidades de los desechos generados, así como sus repercusiones en la salud y el medio ambiente.

A medida que el desarrollo sostenible mejore las condiciones de vida de una población mundial cada vez mayor, se requerirá un mayor uso de la energía, especialmente de electricidad. Hasta tanto se encuentre una opción adecuada que permita afrontar la creciente demanda de electricidad, una gran parte de la demanda futura de electricidad se tendrá que satisfacer con combustibles convencionales como carbón, gas natural, petróleo, uranio y torio. Por tanto, en las estrategias para el desarrollo sostenible habrá que tener en cuenta los desechos generados a lo largo de las cadenas energéticas basadas en esos combustibles.

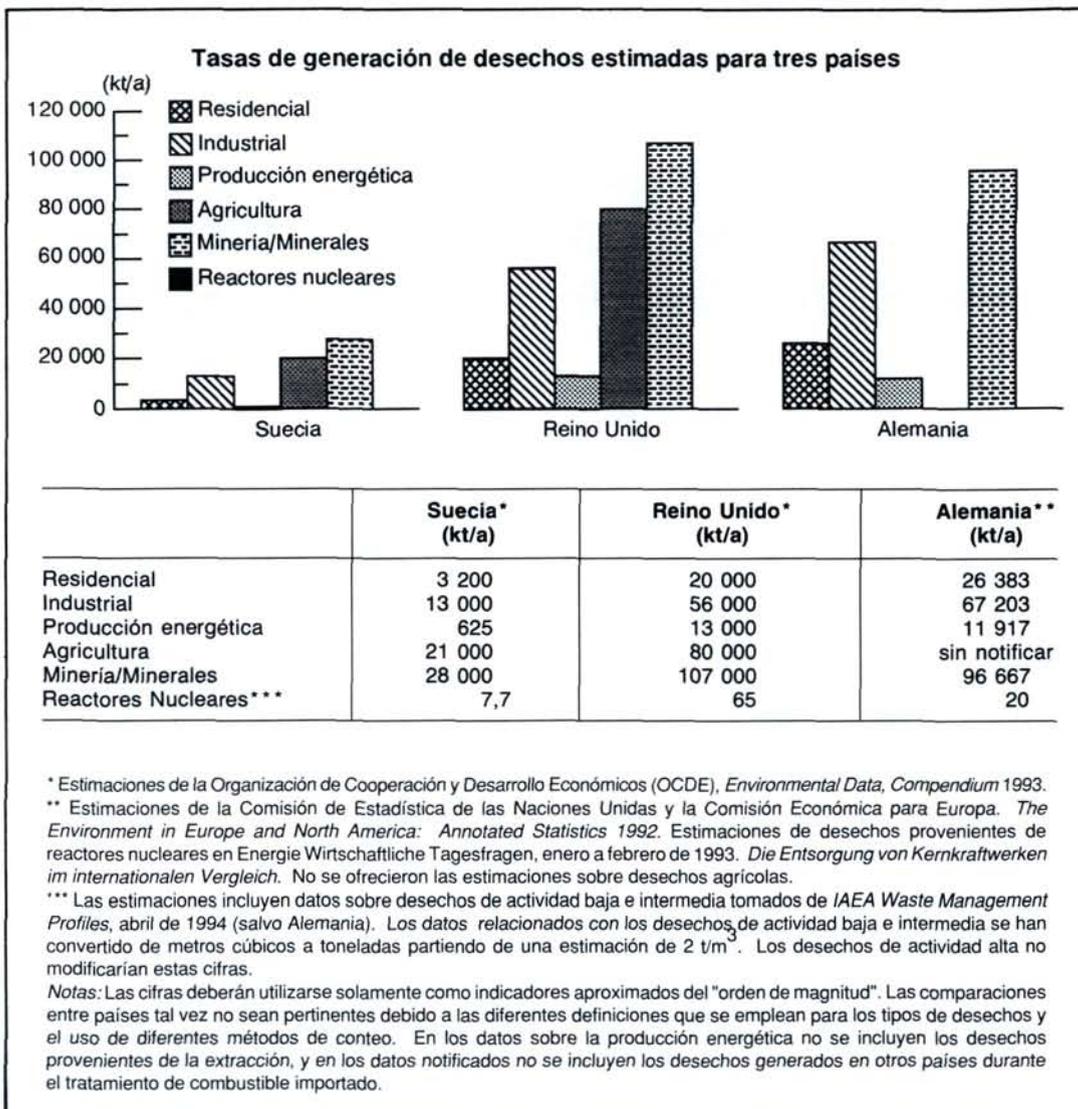
En el presente artículo se ofrece un panorama de las etapas iniciales de un proyecto del OIEA encaminado a comparar los desechos y los métodos de

evacuación de diferentes sistemas de generación de electricidad y examinar los enfoques utilizados para evaluar y comparar las repercusiones de la evacuación de esos desechos en la salud y el medio ambiente. Se destaca la función de la energía nucleoelectrónica en toda estrategia para el desarrollo sostenible de la sociedad humana. En este sentido, en el artículo se hace resaltar la pequeña masa de desechos generada con el uso de la energía nucleoelectrónica en comparación con la masa total de desechos procedente de todas las cadenas energéticas y otras actividades habituales. Se analizan algunos desechos y los correspondientes métodos de evacuación en todas las etapas de las cadenas energéticas para la generación de electricidad. (En el presente artículo no se incluyen los efluentes líquidos y gaseosos que se descargan directamente en el aire o en las masas de agua naturales.) Se subraya la importancia de examinar todas las etapas de las cadenas energéticas, puesto que proporciona información sobre grandes cantidades de desechos, con posibles repercusiones a largo plazo, derivadas de sistemas de generación de electricidad que suelen considerarse "no contaminantes". Asimismo, se analizan los radionucleidos presentes en muchos desechos no nucleares.

## Gestión de desechos y desarrollo sostenible

Según estimaciones de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), en 1990 sus Estados Miembros generaron aproximadamente nueve mil millones de toneladas de desechos sólidos. Pese a los esfuerzos realizados en los últimos años por reducir al mínimo los desechos de la industria nuclear y de otro tipo, esa cifra continúa aumentando. Los exámenes efectuados por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) indican que son los sectores de la explotación de minas y canteras y de la agricultura (abonos, residuos de cosechas, etc.) los que producen las mayores cantidades de desechos. Datos sobre los países miembros de la OCDE y otros procedentes de la Comisión de Estadística de las Naciones Unidas y la Comisión Económica para Europa (CENU/CEPE) corroboran la conclusión general del PNUMA, y

El Sr. Seitz es funcionario de la División de Seguridad Radiológica y de los Desechos del OIEA. Todas las referencias al presente artículo pueden solicitarse al autor.



también indican que en algunos países los sectores industrial, residencial y de la producción energética pueden dar cuenta de una gran parte de los desechos sólidos generados. (Véase el gráfico.) Es interesante observar que la masa de desechos radiactivos procedente de las centrales nucleares representa una pequeña parte de las que resulta de toda la producción energética.

El continuo aumento de las cantidades de desechos que se generan y la necesidad de contar con instalaciones adecuadas de evacuación que protejan la salud humana y el medio ambiente se han traducido en una mayor participación de diversas organizaciones de las Naciones Unidas en las cuestiones relacionadas con la gestión de desechos. La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), celebrada en Río de Janeiro en junio de 1992, sirvió de foro internacional para examinar las estrategias de desarrollo sostenible relacionadas con la gestión de desechos, además de diversas otras cuestiones ambientales. El Programa 21, plan de acción para el desarrollo sostenible acordado por los gobiernos que participaron en la CNUMAD, refleja la importancia de las preocupaciones relacionadas con los desechos. En él

se incluyen tres capítulos dedicados expresamente a la gestión de desechos, y se hace referencia a cuestiones relacionadas con ella en diversos otros capítulos.

Por conducto de la CNUMAD y el Programa 21, las Naciones Unidas y los gobiernos del mundo han señalado a la atención de la comunidad internacional la necesidad de una estrategia integral para el desarrollo sostenible de la sociedad humana. En el Programa 21 figuran diversas declaraciones que destacan que la reducción de la cantidad de desechos que se generan es parte necesaria de cualquier estrategia de este tipo. También se reconoce que, independientemente del éxito de los esfuerzos encaminados a lograr una producción menos contaminante, los desechos son consecuencia del desarrollo y continuarán generándose, por lo que es preciso seguir disponiendo de opciones de evacuación que contribuyan a proteger la salud y el medio ambiente. Los datos confirman el argumento de que las cantidades mínimas de desechos que genera la energía nucleoelectrónica pueden ayudar a convertirla en un elemento que contribuya positivamente a una estrategia mundial en favor de una producción menos contaminante y del desarrollo sostenible.

## Proyectos y programas del OIEA

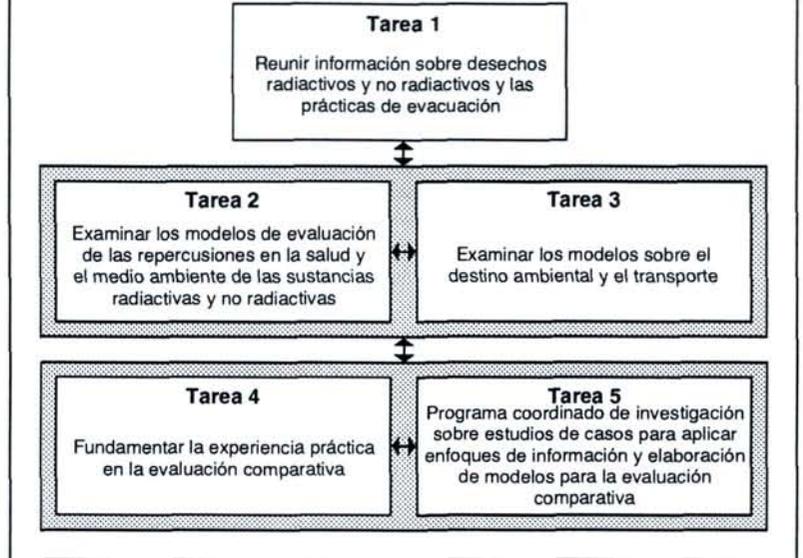
El OIEA está ejecutando un programa de evaluación comparativa para abordar la función de la energía nucleoelectrica en una estrategia mundial en favor de una producción menos contaminante y del desarrollo sostenible en el sector de la generación de electricidad. En el programa se examinan las repercusiones en la salud y el medio ambiente y los costos de muchos aspectos de la generación de electricidad, incluidas las operaciones ordinarias y los accidentes en todas las etapas de las cadenas energéticas para la generación de electricidad. El proyecto DECADES, ejecutado por el OIEA en colaboración con una serie de organizaciones internacionales, es un elemento fundamental del programa. Su objetivo es aumentar las capacidades a fin de incorporar las cuestiones sanitarias y ambientales en las evaluaciones comparativas de diferentes estrategias y cadenas energéticas que intervienen en el proceso de planificación energética y la adopción de decisiones. El proyecto destaca el desarrollo de instrumentos de computadora (bases de datos, soporte lógico (software) para la elaboración de modelos, etc.) que pueden utilizarse para facilitar este proceso de adopción de decisiones.

El tema del presente artículo es una parte del programa integral del OIEA, que se ejecuta con cierta independencia del proyecto DECADES. En 1995 el OIEA inició un proyecto que centró su interés en comparar los enfoques de evaluación de las repercusiones en la salud y el medio ambiente derivadas de la evacuación de desechos radiactivos y no radiactivos de sistemas nucleares y otros sistemas de generación de electricidad. Los objetivos del proyecto son: 1) reunir, evaluar y divulgar entre los Estados Miembros datos e información sobre las posibles repercusiones en la salud y el medio ambiente asociadas a la evacuación de desechos radiactivos y no radiactivos provenientes de la energía nucleoelectrica y otras fuentes; y 2) evaluar y comprobar los enfoques destinados a evaluar y comparar las posibles repercusiones en la salud y el medio ambiente a causa de la evacuación de desechos procedentes de sistemas de energía nuclear y otros sistemas energéticos.

Varias organizaciones —la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el PNUMA, la Secretaría del PNUMA para el Convenio de Basilea, la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) y la Organización Marítima Internacional (OMI)— han colaborado, oficial u oficiosamente, en el proyecto con su activa participación en reuniones, aportes a informes o exámenes de éstos, o sencillamente, con información útil para el proyecto.

Se prevé que el proyecto incluya cinco tareas que son, en esencia, iterativas y paralelas. (Véase el diagrama.) La primera tarea consiste en determinar y comparar las cantidades y características generales de los desechos y los

### Tareas del proyecto sobre las repercusiones comparativas en la salud y el medio ambiente de los desechos provenientes de la energía nucleoelectrica y otros sistemas de generación de electricidad



métodos de evacuación de los sistemas de generación de electricidad y otras fuentes. Se ha planificado que las tareas segunda y tercera incluyan respectivamente exámenes de los enfoques que se aplican para evaluar las repercusiones de las sustancias radiactivas y no radiactivas en la salud y el medio ambiente, y los modelos que se utilizan para evaluar el destino ambiental y el transporte de los diferentes tipos de desechos. Esas dos tareas proporcionarán la información que permitirá evaluar y comparar cuantitativamente los peligros para la salud y el medio ambiente asociados a los desechos. Se ha previsto que las tareas cuarta y quinta abarquen la experiencia práctica mediante la comprobación de los enfoques de las tareas segunda y tercera sobre las evaluaciones de los posibles efectos de los desechos procedentes de los sistemas nucleoelectricos y otros sistemas de generación de electricidad sobre la salud y el medio ambiente. En la quinta tarea se espera obtener dicha experiencia a partir de los estudios de casos de un programa coordinado de investigación con la participación de expertos de diferentes países.

Los datos sobre los desechos y los métodos de evacuación se pueden utilizar para complementar las bases de datos que se están estableciendo como parte del proyecto DECADES. Ahora bien, dada la diversidad de desechos, métodos de evacuación y condiciones ambientales en los emplazamientos, y los singulares problemas relacionados con la elaboración de modelos de las emisiones a largo plazo y el transporte de desechos desde las instalaciones de evacuación, los enfoques de evaluación de este proyecto se están examinando con cierta independencia de los más tradicionales enfoques de evaluación de los riesgos atmosféricos y operacionales. En estas tareas se hace hincapié en revisar y compro-

### Contenido de radionucleidos en materiales seleccionados

Material	Concentraciones de radionucleidos (valor medio o máximo según se indica)
Incrustaciones y lodos en tuberías y equipo para el manejo de aguas producidas	hasta 5000 Bq/g (Ra-226) (promedio uno a cientos de Bq/g)
Lodos en equipo de suministro de gas natural	hasta 100 Bq/g (Ra-226)
Lodos de estanques de agua producida	hasta aprox. 40 Bq/g
Carbón/lignito	0,001 - 100 Bq/g (uranio)
Turba	hasta 50 Bq/g (uranio)
Desechos geotérmicos	aprox. 5 Bq/g (Ra-226)
Sobrecarga de la extracción del uranio	aprox. 1 Bq/g (Ra-226)
Desechos del tratamiento de agua potable	lodos- aprox. 1 Bq/g (Ra-226) resinas- aprox. 1000 Bq/g (Ra- 226)
Fertilizante fosfatado	aprox. 5 Bq/g (U-238)
Desechos del tratamiento de rocas fosfatadas	polvillo- aprox. 1 Bq/g (Ra-226) incrustaciones- aprox. 40 Bq/g (Ra-226)
Desechos del tratamiento del mineral	aprox. 1 Bq/g (Ra-226)

*Notas:* Estos valores incluyen los valores máximos, los promedios de conjuntos específicos de datos o rangos generales de valor. En muchos de los valores se consigna la radiactividad asociada a un solo radionucleido, cuando se sabe que también estarán presentes varios otros radionucleidos. Por tanto, los datos deberían utilizarse como indicadores aproximados de los niveles de radiactividad que se encontrarían en estos materiales.

bar los enfoques de elaboración de modelos independientes con miras a evaluar y comparar las repercusiones a corto y largo plazos relacionados con la evacuación de desechos de diferentes cadenas energéticas y ofrecer retroinformación acerca de la eficacia de diversos enfoques de elaboración de modelos en diferentes situaciones, lo que ayudará a los Estados Miembros a seleccionar y aplicar enfoques para evaluar las repercusiones de la evacuación en sus condiciones concretas.

Los resultados de las evaluaciones comparativas de los efectos de diferentes tipos de desechos sólidos en la salud y el medio ambiente pueden tener varias aplicaciones. Se pueden utilizar 1) como parte de una comparación general de la repercusión de diferentes sistemas energéticos; 2) como ayuda en la adopción de decisiones sobre políticas de gestión de desechos, ya que permite la comparación de las repercusiones de diferentes tipos de desechos y de otras estrategias de gestión/evacuación; y 3) en la evaluación de las posibles repercusiones de la evacuación de desechos que contienen radionucleidos, elementos/compuestos tóxicos no radiactivos, o ambos.

### Desechos procedentes de las cadenas energéticas para la generación de electricidad

Se utilizan diversas fuentes de energía para generar electricidad, que por lo general se clasifican en "convencionales", incluidos combustibles como el carbón, el petróleo, el gas natural, el uranio y el torio, o en "renovables", que abarcan fuentes de energía como la radiación solar, el viento, las aguas de superficie, la biomasa y la energía geotérmica. Si bien algunas de estas fuentes de energía (como por ejemplo, la radiación solar, el viento y el agua) no necesariamente generan desechos en operaciones distintas del mantenimiento y otras actividades generales, sí existen desechos que plantean peligros a largo plazo vinculados a la extracción y tratamiento de materias primas, y la producción y el desmantelamiento de células solares, máquinas eólicas y embalses.

A fin de determinar los diferentes desechos radiactivos y no radiactivos asociados a un determinado sistema de generación de electricidad, es conveniente clasificar los desechos según las diferentes etapas de una cadena energética. A los fines del presente artículo, una cadena energética genérica se define como la que incluye las etapas de extracción, preparación del combustible, explotación de centrales y su clausura. Obsérvese que en cada etapa de la cadena deberán eliminarse los desechos procedentes de las actividades de construcción, mantenimiento, transporte y los procesos de tratamiento, según proceda.

Habida cuenta del centro de atención del público, suele pensarse que la mayoría de los desechos asociados a la generación de electricidad a partir de combustibles convencionales provienen de la explotación de las instalaciones (por ejemplo, cenizas, combustible nuclear gastado). Sin embargo, como se analizó anteriormente, los datos del PNUMA, la OCDE y la CENU/CEPE indican que una de las dos fuentes más grandes de desechos del mundo es la industria minera.

Esto también se refleja en el sector de la generación de electricidad. En varios sistemas de generación de electricidad se generan cantidades relativamente grandes de desechos durante la extracción del combustible (carbón, gas natural, petróleo, y uranio y torio). Por ejemplo, más del 80% de los desechos de la extracción de minerales notificados por la CENU/CEPE en el caso de Alemania provienen de la extracción del carbón. Asimismo, la extracción de minerales que se utilizan en los materiales de construcción (metales, hormigón, etc.), los procesos de elaboración (como el carbonato cálcico para la desulfuración de los gases de combustión o DGC), los fertilizantes para combustibles de biomasa y la fabricación de componentes especiales como células solares constituyen fuentes de desechos. La cantidad y toxicidad de los desechos generados varían según el método de extracción, la cantidad necesaria de combustible/mineral y la calidad del recurso.

Debido a que se requiere mucho combustible para producir una determinada cantidad de electricidad, el proceso de extracción del carbón genera casi siempre el mayor volumen de desechos. Sin embargo, la extracción de uranio y torio también puede ser fuente de muchos desechos dentro de la cadena energética nuclear.

Asimismo, el gran volumen de desechos de la extracción también se asocia a diversas otras cadenas energéticas (por ejemplo, la producción de células fotovoltaicas que se utilizan para generar electricidad a partir de la radiación solar requiere varios compuestos metálicos; el fosfato suele emplearse en los fertilizantes destinados a la producción de combustibles de biomasa; y es necesario extraer numerosas materias primas para producir los materiales necesarios en la construcción de embalses, centrales nucleares, vehículos de transporte, etc.) Otra gran fuente de desechos en la industria extractiva son las aguas subterráneas que se bombean desde las minas durante la excavación o las aguas que fluyen a través de éstas después del cierre. Estas aguas pueden contener diversos contaminantes, incluidos materiales radiactivos de origen natural, conocidos usualmente por la abreviatura NORM, (por ejemplo, torio, uranio, radio), oligometales (como aluminio, mercurio, cromo, cadmio, plomo, cinc, arsénico, etc.), sales y azufre. El agua procedente de las minas de carbón también puede contener niveles elevados de hidrocarburos.

Aunque el gas natural suele considerarse una fuente energética "no contaminante", la exploración y perforación de gas natural y petróleo son grandes fuentes de desechos. Entre los desechos generados en esas operaciones están las incrustaciones radiactivas que se acumulan en el interior de las tuberías, los barros de sondeo y el suelo contaminado por derrames de petróleo y el tratamiento del agua producida. Las incrustaciones que se acumulan en el interior de las tuberías pueden contener cantidades importantes de radionucleidos (véase el cuadro) y quizás se deban evacuar como desechos radiactivos. Los barros de sondeo pueden contaminarse con sales, oligometales (selenio, arsénico, magnesio, curio, cinc, cromo, níquel, aluminio y hierro), así como aceites y otros lubricantes. La extracción de petróleo y gas también genera grandes cantidades de agua "producida" procedente de las formaciones de gas o petróleo (hasta 3 000 000 L/día). Esa agua producida contiene diferentes contaminantes, entre ellos los NORM (especialmente radio), oligometales, amoníaco, sales, hidrocarburos de petróleo alifático y aromático, fenoles y naftaleno. Los lodos que se forman en los estanques de esas aguas están contaminados con elevadas concentraciones de los metales, las sustancias peligrosas y los radionucleidos que portaban las aguas. Las perforaciones también generan diferentes desechos peligrosos, como asbestos, plaguicidas, bifenilos policlorados y tricloroetileno.

La segunda etapa de la cadena energética genérica es la preparación del combustible, que también puede ser una gran fuente de desechos. En el caso de los combustibles convencionales, la preparación del combustible incluye la limpieza del carbón bruto para eliminar las impurezas, la refinación de los productos del petróleo y el tratamiento y fabricación de combustible para la energía nucleoelectrónica. Entre los desechos provenientes de las actividades posteriores a la extracción están las colas, el agua y los sólidos contaminados con materiales similares a los desechos de la minería (por ejemplo, oligometales, sales, metales y NORM). Las refinerías generan petróleo y agua de desecho, diferentes tipos de lodos contaminados con NORM, hidrocarburos, oligometales, bifenilos policlorados y otros contaminantes. La fabricación de combustible para las centrales nucleares

genera desechos como cenizas y lodos contaminados con NORM y oligometales. La producción de células solares (fotovoltaicas) puede considerarse un proceso análogo al de la preparación del combustible en el contexto de la energía solar. La producción de células fotovoltaicas con destino a las células solares genera diversos desechos tóxicos o peligrosos contaminados con compuestos de arsénico, cobre, cadmio, galio y cinc.

La tercera etapa de la cadena energética comprende los desechos que se generan durante la explotación de la central eléctrica. Estos son los desechos más reconocidos ya que son los propensos a recibir la mayor atención. Las centrales eléctricas alimentadas con carbón generan grandes cantidades de desechos de combustión, entre ellos cenizas volátiles (productos de combustión en suspensión en el aire) y cenizas pesadas (productos de combustión más pesados) procedentes del combustible quemado, así como yeso y lodos de diferentes técnicas de DGC. Estos desechos están contaminados con NORM y oligometales. Resulta un tanto irónico que el uso de la desulfuración de los gases de combustión destinada a reducir los gases de efecto de invernadero emitidos por las instalaciones de combustibles fósiles genere más desechos que la ceniza del combustible quemado. Se está fomentando intensamente el reciclaje de la ceniza volátil y los desechos de la DGC y grandes cantidades de ellos se están utilizando para otros fines (como aditivos de cemento, material de relleno y yeso en materiales de construcción, y muchos otros usos). Sin embargo, aun con el reciclaje, las enormes cantidades de ceniza y desechos de la DGC que se generan sobrepasan significativamente la demanda (se estima que en el mundo se dejan de utilizar anualmente más de 450 millones de toneladas de estos desechos). Las centrales eléctricas alimentadas con petróleo generan menos cantidad de cenizas, pero pueden constituir una fuente importante de desechos de la DGC. Además, algunos de los desechos originados en la limpieza de calderas y el tratamiento de aguas residuales también contienen materiales peligrosos.

Probablemente los desechos más estudiados en el mundo son los resultantes de la explotación de las centrales nucleares, especialmente el combustible nuclear gastado. Sin embargo, los datos indican que la cantidad de desechos que genera una central nuclear es muy pequeña si se compara con la que producen los sistemas de generación de electricidad en su conjunto. La principal preocupación respecto de los desechos nucleares son los elevados niveles de radiactividad en cantidades mucho más reducidas de desechos de actividad alta. Varios países reelaboran el combustible gastado para reducir los riesgos a largo plazo asociados al desecho que deberá evacuarse. Asimismo, la explotación de las centrales nucleares origina desechos de actividad baja e intermedia. Estos desechos incluyen diversos desperdicios, tuberías y equipo contaminado por los radionucleidos con un período de semidesintegración relativamente corto.

El desmantelamiento de centrales eléctricas clausuradas es la última etapa de la cadena energética genérica. En el caso de las centrales alimentadas con carbón, petróleo y gas, los desechos del desmantelamiento podrían incluir los escombros de las edificaciones, el equipo viejo de la instalación y el suelo contaminado como resultado de las operaciones. Estos

materiales estarían contaminados con subproductos de la combustión y otras sustancias relacionadas con la explotación de la central. Los desechos procedentes del desmantelamiento de las centrales nucleares son diferentes a los de otras centrales eléctricas ya que los materiales que estuvieron cerca del núcleo del reactor o del refrigerante primario tal vez requieran una manipulación especial debido a los elevados niveles de radionucleidos fundamentalmente de período corto. El desmantelamiento de células solares, embalses y máquinas eólicas también genera desechos que requieren gestión. Las células solares, en particular, contienen compuestos peligrosos que plantean posibles riesgos para la salud a largo plazo.

En cada etapa de la cadena energética se generan diversos desechos como resultado de los procesos de construcción, mantenimiento, transporte y tratamiento de desechos. En la mayor parte de los casos, los desechos generales procedentes de las labores de construcción, mantenimiento y transporte serían comunes a todas las cadenas energéticas, aunque las cantidades, los tipos y los niveles de contaminación serán diferentes según la cadena energética de que se trate. Por ejemplo, los desechos asociados al transporte pueden ser muy importantes para las centrales alimentadas con carbón, dados los enormes volúmenes de combustible y de cenizas y desechos resultantes que deben transportarse a diario. Se ha estimado que diariamente se necesitarían cincuenta camiones de 40 toneladas para transportar la ceniza volátil y los desechos de la DGC desde una central eléctrica alimentada con carbón típica de 1000 MWe hasta un emplazamiento de evacuación (también se puede utilizar el transporte ferroviario u otro medio de que se disponga). Un análisis completo del ciclo vital requeriría incluir los desechos que se originan mientras se produce el combustible para los camiones o trenes y los desechos relacionados con el mantenimiento de los vehículos. En una comparación integral también será preciso tener en cuenta la evacuación de desechos secundarios resultantes de los procesos de tratamiento de muchos de los desechos.

### Materiales radiactivos de origen natural

Muchos de los desechos anteriormente analizados, en especial los relacionados con la extracción, la preparación del combustible y los subproductos de la combustión, contienen materiales radiactivos de origen natural (NORM), que incluyen isótopos como carbono 14, potasio 40, uranio 238, radio 226 y torio 232. (Véase el cuadro.) Un aspecto importante de los desechos que contienen NORM es que están compuestos por radionucleidos de período largo (como el uranio 238, cuyo período de semidesintegración es de 4500 millones de años), el torio 232 con un período de semidesintegración de 14 000 millones de años, y sus descendientes, incluido el radio). El radio y sus descendientes plantean el principal problema radiológico para la salud asociado a los NORM.

Dado que la atención se centra fundamentalmente en los desechos radiactivos procedentes de las centrales nucleares, comparativamente los radionucleidos, contenidos en los desechos de otras cadenas

energéticas siempre han recibido poca atención. Sin embargo, en fecha más reciente, debido a los prolongados períodos de semidesintegración y peligros potenciales asociados a los radionucleidos presentes en los desechos que contienen NORM, las autoridades reguladoras se han visto obligadas a tener en cuenta los radionucleidos de los desechos de las cadenas energéticas no nucleares en el contexto de las reglamentaciones cada vez más estrictas que se aplican a los desechos nucleares.

Se pueden mencionar dos ejemplos de desechos NORM procedentes de la industria del petróleo y el gas. En primer lugar, las incrustaciones que se precipitan en el interior de los pozos y las tuberías de producción ahora suelen ser consideradas como desechos radiactivos. Es interesante observar que, en algunos casos, estas incrustaciones han demostrado que contienen concentraciones de radio 226 que se sitúan entre los niveles internacionales más altos de las concentraciones alfa en desechos de actividad baja e intermedia que se puedan evacuar en instalaciones poco profundas. En segundo, los estudios de las grandes cantidades de agua producida procedente de los pozos situados en los emplazamientos de perforación de petróleo y gas natural han indicado que entre el 50% y el 78% de los pozos estudiados en tres estados de los Estados Unidos generaban agua producida con concentraciones medias de radio superiores a 1,85 Bq/L (50 pCi/L). Otros datos señalan que las concentraciones medias de radio en el agua de algunos pozos pueden ascender a 111 Bq/L (3000 pCi/L). A modo de comparación, el límite de concentración de radio para las descargas de agua de las instalaciones nucleares en los Estados Unidos es aproximadamente de 2,2 Bq/L (60 pCi/L). Si bien en algunos casos es posible que se necesiten requisitos industriales específicos, es evidente que se harán comparaciones con los requisitos de la industria de energía nucleoelectrónica.

### Métodos de evacuación de los desechos procedentes de la generación de electricidad

El Programa 21 hace hincapié en la producción menos contaminante, pero hasta tanto se disponga de nuevas tecnologías, cabe esperar que las cadenas energéticas de combustible generen una cantidad notable de desechos, por lo que será menester disponer de métodos adecuados de evacuación. Las repercusiones a largo plazo en la salud y el medio ambiente de una cadena energética de combustible dependerá, hasta cierto punto, del método de evacuación que se utilice. Actualmente se emplean diversos métodos de evacuación de desechos procedentes de las cadenas energéticas para la producción de electricidad. A continuación se ofrece un breve resumen de dichos métodos.

En las etapas de extracción y preparación del combustible, los grandes volúmenes de desechos que se generan por lo general excluyen cualquier tipo de tecnología de evacuación artificial importante. En algunos casos, los escombros (roca estéril) se colocan nuevamente en las cavidades abiertas o se esparcen en la superficie terrestre. Sin embargo, en varios casos,

los escombros (desechos) de la extracción actualmente se protegen con cubiertas artificiales para desviar la infiltración alrededor de los desechos potencialmente nocivos. Los desechos de la perforación de petróleo y gas se reinyectan por lo general en la formación, se colocan en fosos ubicados en el emplazamiento de la perforación, o se esparcen sobre la superficie terrestre en el emplazamiento.

Los desechos de la preparación del combustible procedentes de las cadenas energéticas nuclear y del carbón contienen abundantes líquidos que a menudo se evacúan en presas (estanques o lagunas artificiales). Los desechos sólidos resultantes de la preparación del combustible (como las colas y los residuos de la evaporación) suelen cubrirse con un casquete de tierra artificial para reducir al mínimo la infiltración en los desechos y limitar la emisión de gases a partir de los desechos. A menudo, los desechos de las refinerías de petróleo se eliminan mediante técnicas agrícolas o evacuación en fosos. Los desechos peligrosos procedentes de refinerías o de la producción de células fotovoltaicas para la energía solar se envían generalmente a una instalación autorizada. Una instalación típica de evacuación de desechos peligrosos posee una zanja revestida con sistemas de recolección de lixiviados y una cubierta de tierra artificial para limitar el contacto del agua con los desechos. Otros desechos relacionados con la preparación del combustible normalmente se eliminan en rellenos o, en el caso de algunos desechos nucleares, en zanjas artificiales o cámaras de hormigón.

Los desechos generados durante la explotación de centrales alimentadas con carbón y petróleo, como la ceniza volátil y los desechos de la DGC, se eliminan generalmente en estanques, rellenos, cavidades abiertas o pilas superficiales de desechos. Después de la evaporación y drenaje del agua, el lodo que permanece en el fondo de los estanques de evacuación normalmente se cubre con tierra. Los desechos de la limpieza de calderas en las centrales alimentadas con carbón, petróleo y gas posiblemente deban considerarse desechos peligrosos, por lo que sería menester evacuarlos en una instalación autorizada. Los desechos de actividad baja e intermedia de las centrales nucleares suelen evacuarse en zanjas artificiales, cámaras de hormigón o cavidades abiertas. Además, estos desechos se embalan generalmente antes de la evacuación. Está previsto que los desechos de actividad alta, incluido el combustible gastado, se evacúen en formaciones geológicas profundas o se almacenen en forma recuperable.

## Direcciones futuras

El Programa 21, plan de acción para el desarrollo sostenible acordado por los gobiernos del mundo en la CNUMAD, ha definido a la producción menos contaminante (es decir, la necesidad de reducir la cantidad de desechos que se generan) como un componente decisivo de toda estrategia para el desarrollo sostenible de la sociedad humana. La generación de electricidad, esencial para el desarrollo, es una fuente de desechos cuya reducción es necesaria. A fin de evaluar la posible función de la energía

nucleoeléctrica en una estrategia mundial para alcanzar una producción menos contaminante y el desarrollo sostenible, el OIEA puso en marcha un proyecto titulado Repercusiones comparativas en la salud y el medio ambiente de los desechos sólidos procedentes de sistemas energéticos.

La primera tarea del proyecto se concentra en determinar las cantidades y tipos de desechos procedentes de las cadenas energéticas de generación de electricidad y sus prácticas de evacuación conexas. Entre las tareas subsiguientes del proyecto se incluyen, examinar y comprobar los métodos que pueden utilizarse para comparar las posibles repercusiones en la salud y el medio ambiente relacionados con la evacuación de desechos, por ejemplo, a partir de la liberación y posterior transporte en el medio ambiente de los componentes radiactivos y no radiactivos de estos desechos. Estos exámenes incluirán debates sobre otros estudios de evaluación comparativa que se han efectuado. Un elemento crucial en la evaluación comparativa sobre la evacuación de desechos serán los enfoques adoptados para comparar las repercusiones en la salud y el medio ambiente de los radionucleidos y los elementos/compuestos tóxicos no radiactivos, así como la elaboración de modelos sobre el destino y transporte de estos contaminantes en el medio ambiente subterráneo y superficial. En el presente artículo se ha resumido parte de la información obtenida hasta la fecha en relación con la primera tarea del proyecto. En este sentido, se ofrecieron algunos criterios respecto del carácter de los desechos y las masas que generan la energía nucleoeléctrica y otras cadenas energéticas. Se demostró que la masa de desechos proveniente de la energía nucleoeléctrica es una pequeña parte del total de desechos generados y también de los desechos procedentes de la generación de electricidad. Este hecho corrobora la función potencialmente conveniente de la energía nucleoeléctrica en el contexto de una producción menos contaminante y una estrategia en pro del desarrollo sostenible de la sociedad humana.

En el presente artículo también se ha subrayado la importancia de analizar todas las etapas de las cadenas energéticas para la generación de electricidad. El análisis pormenorizado de cada etapa de las cadenas energéticas demuestra que incluso las cadenas energéticas que se consideran "no contaminantes", como la energía solar (compuestos metálicos peligrosos) y el gas natural (desechos radiactivos y peligrosos en los gasoductos y resultantes de perforaciones) generan desechos con posibles repercusiones a largo plazo en la salud y el medio ambiente. Asimismo, la gran masa de desechos procedente de algunas cadenas de generación energética (como por ejemplo, las cenizas volátiles y los desechos de la desulfuración de los gases de combustión) crea problemas de evacuación.

El trabajo futuro de este proyecto se concentrará en definir y determinar con mayor precisión los desechos y prácticas de evacuación propios de las actuales cadenas energéticas de combustibles, examinar y comprobar los enfoques adoptados con miras a elaborar modelos sobre el destino y transporte de los contaminantes contenidos en tales desechos, y estimar las repercusiones conexas en la salud y el medio ambiente.