

Evacuación de desechos radiactivos: Experiencias y retos mundiales

Con la vasta experiencia adquirida en la evacuación de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia, los países enfrentan nuevos retos

Desde la primera vez que en el mundo se evacuaron desechos radiactivos en Oak Ridge, Tennessee, en 1944, se ha adquirido considerable experiencia en esta esfera. El primer emplazamiento de evacuación —previsto para “fragmentos de vidrio muy contaminados o materiales insuficientemente limpios como para poder ser utilizados en otros trabajos” — era un simple foso relleno con desechos sin acondicionar, ubicado en Oak Ridge. Durante las primeras etapas del desarrollo de la energía nucleoelectrica, se adoptaron enfoques similares en otras instalaciones nucleares y generadores de desechos de los Estados Unidos y otros países.

A nivel mundial, los actuales emplazamientos de evacuación de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia (LILW) abarcan desde instalaciones cerca de la superficie hasta repositorios geológicos artificiales. Más de cien instalaciones de evacuación de LILW están o han estado en funcionamiento, y más de 42 repositorios se encuentran en alguna etapa de desarrollo en los Estados Miembros del OIEA. (Véase el cuadro de las páginas 38 y 39.)

A la par de estos progresos, ha surgido una serie de problemas y retos en los países que buscan opciones para la evacuación de desechos radiactivos. A nivel mundial, el OIEA ha orientado su labor a prestarles asistencia en ese sentido, promoviendo la transferencia de tecnologías, particularmente a los países en desarrollo. Esa labor trae consigo la compilación, resumen y difusión de información técnica actualizada, y el apoyo a programas coordinados de investigación sobre aspectos técnicos específicos. En ese contexto, en este artículo se presenta una reseña de la experiencia internacional en los sistemas de evacuación terrestre de LILW y se abordan los nuevos problemas y retos que afrontan actualmente los países en esta esfera.

Prácticas y tendencias

Selección del emplazamiento. La selección del emplazamiento de una instalación de evacuación de desechos radiactivos se refiere al proceso de selección de un lugar adecuado que tenga en cuenta consideraciones técnicas y de otra índole. La lista de factores técnicos es extensa: geología, hidrogeología, geoquímica, tectónica y sismicidad, procesos de la superficie, meteorología, sucesos antropógenos, transporte de desechos, aprovechamiento de la tierra, distribución de la población y protección del medio ambiente. Actualmente, otro factor clave es la aceptación pública, sobre todo en los países industrializados donde la actitud “ecología, sí; en mi barrio, no”, puede obstaculizar la selección del emplazamiento de cualquier tipo de instalación de evacuación de desechos industriales y no sólo de desechos radiactivos. Esto ha hecho que los proyectistas presten mayor atención a los factores sociales en las primeras etapas del proceso de selección del emplazamiento. En algunos casos, se sitúan los repositorios en emplazamientos donde ya existen instalaciones nucleares; por ejemplo, Drigg (Reino Unido), Centre de la Manche (Francia), Rokkasho (Japón) y Olkiluoto (Finlandia). En algunos países se habla también del concepto de selección del emplazamiento para un repositorio multinacional-regional (tema en el que abundaremos más adelante). Sin embargo, factores políticos y preocupaciones públicas han frenado el desarrollo de repositorios regionales en el mundo.

Actualmente, en todo el mundo se han seleccionado al menos 17 emplazamientos para nuevos repositorios de LILW, algunos de los cuales ya están autorizados o en construcción, mientras en 17 países hay más de 25 en estudio. Uno de esos países es China, donde se proyecta la construcción de cuatro repositorios de LILW y se han seleccionado dos emplazamientos para las regiones noroccidental y meridional. El emplazamiento de evacuación de la región noroccidental está situado en una zona árida y poco poblada del Desierto de Gobi. En los Estados Unidos no se ha construido ningún repositorio

por Kyong Won Han, Jorma Heinonen y Arnold Bonne

El Sr. Bonne es Jefe de la Sección de Tecnología de los Desechos de la División de Energía Nucleoelectrica y del Ciclo del Combustible del OIEA, y los señores Heinonen y Han son Funcionarios de dicha División.

comercial nuevo para desechos de actividad baja desde que se aprobó la ley de 1980 sobre política de desechos radiactivos de actividad baja. En ocho estados de ese país, el proceso de selección de emplazamientos va avanzando. Ya se han seleccionado cuatro emplazamientos, a saber, los de Nebraska (Central Interstate compact), Carolina del Norte (Southeast Compact), California (Southwest Compact) y Texas (Texas Compact, pendiente), los cuales se encuentran ahora en proceso de concesión de licencias.

A fin de procurar la aceptación pública, los países adoptan diversos tipos de medidas. En Australia, el proceso de selección del emplazamientos de un repositorio artificial de LILW se caracteriza por un amplio proceso de consultas públicas. En Canadá, donde la oposición de la comunidad demoró la selección del emplazamiento de una instalación para la evacuación de desechos procedentes de las actividades de refinación de radio y uranio, el gobierno suspendió el primer proceso de selección de emplazamientos y estableció un programa de cooperación de cinco fases, cuya ejecución está a cargo de un grupo de trabajo independiente para la selección de emplazamientos. Este grupo trabaja en estrecha unión con los consejos municipales de las comunidades participantes, así como con grupos comunitarios de enlace que sirven de canales de información con el público en general. En Hungría, tras la interrupción de dos intentos de selección de emplazamientos, en 1992 la Comisión de Energía Atómica (CEA) de ese país emprendió un proyecto nacional de selección de emplazamientos para la evacuación de LILW. Siguiendo un criterio de voluntariedad, la CEA encontró comunidades que se ofrecieron para situar emplazamientos en sus territorios y en las cuales se han seleccionado seis de éstos. Esas comunidades participarán ahora en investigaciones minuciosas de los emplazamientos. En los Estados Unidos también se han adoptado criterios similares. Por ejemplo, en Connecticut, donde inicialmente hubo que enfrentar la resistencia pública, se modificó el proceso para que el público pudiera participar más en dos aspectos, a saber, "la selección y el control", lo que pueden influir en gran medida en la forma en que se percibe y recibe el proceso de selección de los emplazamientos.

Factores de diseño. El tipo de repositorio que finalmente se seleccione dependerá de las condiciones geológicas de cada país, así como de los requisitos específicos de evacuación y los métodos de reglamentación. Todos estos factores están vinculados al diseño de la instalación. En general, el diseño se propone limitar la liberación de contaminantes o radionucleidos a la biosfera; reducir al mínimo la exposición de los trabajadores y del público; y lograr que el mantenimiento durante la fase posterior a la clausura sea el menor posible. Esos objetivos pueden lograrse mediante componentes técnicos como los bultos de desechos, las estructuras artificiales, el emplazamiento en sí, o una combinación de éstos.

Algunas tendencias notables del diseño se relacionan con los adelantos tecnológicos en la esfera de la evacuación de desechos y las preocupaciones del público en materia de seguridad. Una tendencia general consiste en confiar más en la utilización de un sistema de barreras artificiales múltiples para contener los desechos. Dicho sistema incluye bóvedas de hormigón, materiales de relleno, barreras químicas, y medidas para la salida de los gases, el drenaje y las zonas tapón.

En el mundo se han diseñado diferentes tipos de instalaciones para LILW. Aproximadamente el 62% de los repositorios de LILW son instalaciones técnicas cerca de la superficie, es decir, a unos diez metros de la superficie terrestre; el 18% son instalaciones más simples cerca de la superficie; el 7%, cavidades subterráneas excavadas; y el 4%, repositorios geológicos. El tipo de instalación que finalmente se seleccione y diseñe dependerá de las características de los propios desechos, así como del emplazamiento, y de las estrategias nacionales y los factores sociales y económicos. A continuación se presentan breves reseñas de los diferentes diseños:

Instalaciones simples cerca de la superficie. Entre los ejemplos de este tipo de instalaciones se incluyen Barnwell (EE.UU.) y Vaalputs (Sudáfrica), las cuales se benefician de la baja tasa de permeabilidad de la capa de arcilla y/o la baja tasa de precipitaciones en el emplazamiento. En Barnwell, el sistema de evacuación consta de fosos cuyo fondo presenta un ligero declive y está cubierto por una capa de arena para facilitar la recogida del agua que se infiltra en un drenaje del foso. Este drenaje termina en un sumidero que se mantiene bajo vigilancia. Los desechos, embalados en cajas, bidones y cofres, se depositan en los fosos. Los desechos de actividad más alta se acondicionan con hormigón, betún u otros materiales de baja lixiviación o se colocan en contenedores de gran integridad para lograr la estabilidad estructural. El espacio entre los contenedores de desechos se rellena con tierra seca, y luego se cubre el foso con arcilla y tierra. En Vaalputs los fosos, largos, anchos y de cerca de ocho metros de profundidad, se cubren con varias capas de arcilla compactada, así como con arena y vegetación del lugar.

Instalaciones técnicas de evacuación cerca de la superficie. En este caso, entre los ejemplos se incluye la instalación de Drigg (Reino Unido), donde se eliminó paulatinamente el concepto de fosos simples a favor de las bóvedas artificiales. La instalación está diseñada para recibir bultos de desechos radiactivos de actividad baja en contenedores de desechos muy compactados colocados en sobreenvases de acero que después se depositan en las bóvedas de hormigón mediante elevadores de horquilla. Las bóvedas, situadas al nivel del suelo o por debajo de éste, constan de una base y paredes de hormigón con una capa subyacente para el drenaje. Cualquier drenaje procedente del interior o debajo de la bóveda puede vigilarse por separado y dirigirse hacia un sistema de tratamiento de aguas situado en el emplazamiento,

antes de descargarse al mar por medio de un conducto.

En algunos emplazamientos, como los de Centre de la Manche y l'Aube (Francia), El Cabril (España), Trombay (India) y Rokkasho (Japón), se utilizan bóvedas de hormigón en forma de caja, cada una de las cuales tiene un diseño singular. En La Manche, los bidones que contienen los LILW de período corto y mayor actividad se empotran en monolitos con paredes de hormigón que se hallan en el fondo, mientras que los que contienen los desechos de actividad más baja se colocan en la parte superior y posteriormente se cubren. En el segundo repositorio francés, l'Aube, se aprovecha esta experiencia. Allí, todos los desechos se aíslan en el interior de bóvedas de hormigón armado (de 30 metros de ancho por 30 metros de largo y 8,5 metros de alto, con paredes de 30 centímetros de espesor). Las bóvedas se construyen por encima del nivel freático más alto y tienen otras características de diseño que las protegen de la infiltración del agua de lluvia. Asimismo, se creó un sistema para la manipulación de los bultos de desechos que los trabajadores operan por telemando, lo que reduce su exposición a las radiaciones. Sobre la base de experiencias anteriores, se creó un sistema sumamente automatizado de control de registros.

En España, en El Cabril se aplica un concepto de evacuación similar, y se incorpora la posibilidad de recuperar los bultos de desechos; también cuenta con instalaciones para el acondicionamiento y la caracterización de los desechos. En la India, donde hay seis repositorios de LILW en funcionamiento, el diseño incluye fosos de hormigón armado y pozos recubiertos de baldosas para diferentes tipos de desechos. En Trombay, donde los fosos de hormigón armado son impermeables y están revestidos de hormigón armado, se utilizan, además, otros materiales impermeables para impedir toda entrada de agua en la temporada monzónica. En pozos circulares de unos cuatro metros de profundidad recubiertos de baldosas se pueden almacenar desechos de actividad superior a la permisible en los fosos de hormigón armado, así como almacenar y evacuar desechos contaminados con emisores alfa.

En los países de la antigua Unión Soviética, las instalaciones de evacuación de LILW se construyeron en general en los decenios de 1960 y 1970 y se han utilizado para desechos que contienen diversos radionucleidos. En los países de Europa oriental se construyeron repositorios similares, cuyo diseño tipo exigía ubicarlos, por lo menos, a unos cuatro metros por encima del nivel freático. En el repositorio Sergiev Posad (Rusia), se construyeron bóvedas de hormigón inmediatamente debajo de la superficie del suelo, con paredes de doble capa de hormigón y estratificadas en betún. Los bultos de desechos se colocan en compartimientos individuales que se rellenan de un mortero hecho con cemento y desechos líquidos de actividad baja. Cuando se llena un compartimiento, los desechos se cubren con una capa

de hormigón y, además, con una placa de hormigón armado, dos capas de betún y una capa final de tierra arcillosa.

En el Japón, en Rokkasho-mura, se utilizan fosos de hormigón entre los cuales se instala un sistema de drenaje como barrera artificial, ya que el repositorio está situado por debajo del nivel freático. En un foso pueden colocarse aproximadamente 5000 bidones. Una vez llenos, los fosos de evacuación se rellenan y se cubren con al menos cuatro metros de tierra.

En Canadá, los ingenieros en evacuación de desechos han diseñado lo que se denomina "estructura subterránea resistente a la intrusión" o IRUS, que, entre sus características, incluye un módulo de hormigón con una tapa gruesa de hormigón y un fondo permeable que debe construirse por encima del nivel freático en una formación arenosa. El fondo permeable está destinado a reducir al mínimo el contacto del agua con los desechos. Como los desechos contendrán pequeñas concentraciones de radionucleidos de período muy largo, los ingenieros han previsto la eventual infiltración del agua con el deterioro a largo plazo del hormigón: toda el agua drenará fácilmente por el fondo, que está formado por dos capas combinadas de arena, arcilla y zeolita natural. Las propiedades de adsorción de estas capas limitan la liberación de radionucleidos en el agua de drenaje.

Cavidades subterráneas excavadas. Este concepto se aplica, por ejemplo, en la República Checa, Suecia, Finlandia y Noruega. En la República Checa, parte de la caverna de la mina Richard II, a una profundidad de entre 70 y 80 metros por debajo del suelo, se utiliza como repositorio de desechos radiactivos (en su mayoría de período corto) generados por instituciones. Actualmente, la mina está seca y su entorno geológico es de marga caliza y piedra margosa. En Suecia, el repositorio definitivo (SFR) está construido en roca cristalina a unos 60 metros por debajo del lecho marino con acceso desde tierra. El diseño de las cavidades rocosas se ha adaptado a los diferentes tipos de LILW de período corto, su contenido radiactivo, su composición y sus requisitos de manipulación. Los bultos de desechos de actividad más alta se almacenan en cavernas en forma de silos de una altura de 50 metros con paredes de hormigón, un amortiguador de arcilla bentonítica y un sistema de salida de gases. En Finlandia, Olkiluoto es similar al SFR, pero sólo tiene dos silos —uno para desechos de actividad baja y otro para desechos de actividad intermedia generadores de calor— construidos a una profundidad de entre 60 y 100 metros por debajo del suelo. Se utiliza como relleno la roca hospedante triturada y pulverizada, y las principales zonas acuíferas que se agrietan se sellan con obturadores de hormigón.

Repositorios geológicos. Los emplazamientos Morsleben y Konrad (Alemania), así como el repositorio NIREX que se prevé construir (Reino Unido), son ejemplos de repositorios geológicos de LILW. Morsleben está situado en una mina de sal muy seca

y estable a una profundidad aproximada de 500 metros por debajo del suelo y tiene capacidad para 40 000 metros cúbicos de desechos. Los ILW se evacuan en una gran cavidad que luego se rellena por capas para su blindaje; los LLW se acumulan en cavidades excavadas. El emplazamiento de Konrad es una antigua mina de hierro excepcionalmente seca, que resulta fácil de excavar, es estable, y está limitada por otras capas y cubierta por unos 400 metros de arcilla gruesa. Según la evaluación de la seguridad, el agua tardaría 380 000 años en viajar del repositorio a la superficie. Deberán construirse túneles de repositorio horizontales a una profundidad de 800 metros aproximadamente para evacuar desechos que no generen calor, y se utilizarán dos galerías y túneles para el transporte.

Concesión de licencias. Debido a la diversidad de estructuras y requisitos jurídicos y reglamentación, el proceso de concesión de licencias difiere de un país a otro. Por ejemplo, en Alemania, con un solo proceso se cubre la construcción, explotación y clausura del repositorio, mientras que en otros países el proceso exige varias etapas. En general, la solicitud de la licencia se basa en la presentación de un diseño de repositorio que responda a las características propias del emplazamiento y en las evaluaciones de la seguridad, las cuales deben demostrar que la instalación propuesta cumple con los requisitos de reglamentación. Por lo general, el proceso de concesión de licencias presupone procedimientos jurídicos y políticos complejos, exámenes técnicos exhaustivos por el órgano regulador e interacción con el público.

En Suiza, luego de prolongadas investigaciones, se anunció en junio de 1993 que el emplazamiento de Wellenberg en el Cantón de Nidwalden podía resultar idóneo para la evacuación de LILW. El procedimiento suizo para la concesión de licencias incluye la autorización federal, cantonal y comunitaria para la construcción y ulterior explotación del repositorio. Además, el Cantón debe otorgar una concesión minera especial. En junio de 1994 se presentó la licencia general a la consideración del Gobierno Federal suizo, cuya decisión deberá ser ratificada por el Parlamento Federal. Entretanto, en 1994, la comunidad que vive en las inmediaciones del emplazamiento de Wolfenshiessen y la asamblea comunitaria votaron a favor del proyecto. Sin embargo, en junio de 1995, el voto cantonal en relación con la concesión minera no fue del todo positivo.

En Alemania, de 1976 a 1982 se realizaron investigaciones en la mina de Konrad, en Baja Sajonia, para determinar su idoneidad como repositorio de desechos radiactivos. Una vez concluidas las investigaciones, se solicitó una licencia para comenzar a construir el repositorio. Si bien se vencieron todos los obstáculos en el nivel federal, el gobierno regional no se ha pronunciado respecto de la solicitud de licencia. En los Estados Unidos, cuatro estados (California, Nebraska, Carolina del Norte y Texas) presentaron sus solicitudes de licencia a finales de 1989, en julio

de 1990, diciembre de 1993 y marzo de 1992, respectivamente. Hasta el momento, sólo California ha obtenido su licencia, expedida el 16 de septiembre de 1993 por el Departamento de Servicios de Salud de California (DHS). Sin embargo, se puso como condición que el DHS fuera el propietario de la tierra. El 1 de junio de 1994, el DHS recibió la orden del Tribunal Superior del Estado de California de revisar su aprobación de la licencia. Dicho Departamento se halla en el proceso de apelación de esta orden. En Nebraska, el 15 de junio de 1995, la US Ecology, entidad encargada de la selección de emplazamientos, presentó la octava y última revisión del Informe sobre el análisis de seguridad y muchos otros documentos relacionados con la solicitud de licencia. En Carolina del Norte, por razones políticas, la División de Protección Radiológica del Departamento de Medio Ambiente, Salud y Recursos Naturales no aprobará la solicitud de licencia antes de febrero del 2000.

Clausura. Cuando una instalación de evacuación se llena o se suspenden sus actividades de evacuación por otras razones, comienza lo que se conoce como proceso de "clausura" y proceso "posterior a la clausura". El proceso de clausura incluye medidas para asegurar la instalación, como por ejemplo, cubrir o sellar las zonas de evacuación, reunir los documentos y realizar evaluaciones de la seguridad. En muchos países se prevén varios cientos de años de control institucional posterior a la clausura. Ello puede incluir control de acceso, mantenimiento, vigilancia del emplazamiento, mantenimiento de registros y medidas correctivas, si proceden.

En Francia, el Centre de la Manche recibió su último bulto de desechos en junio de 1994 y se están tomando medidas en estos momentos para preparar la clausura. El explotador de la instalación, el Organismo Nacional de Gestión de Desechos Radiactivos de Francia (ANDRA), ha solicitado una licencia en relación con la fase de control institucional. Una vez concedida la licencia, el emplazamiento continuará bajo la responsabilidad del ANDRA. Se prevé que la licencia se conceda en 1997, después de una segunda audiencia pública donde se darán orientaciones sobre las actividades de control institucional, incluida la vigilancia activa y pasiva.

Nuevos problemas y retos

Una serie de problemas que atraen particular atención en los niveles nacional y mundial han visto la luz, como los relativos a:

Materiales radiactivos de origen natural (NORM). El medio ambiente terrestre contiene radionucleidos de origen natural, por ejemplo, el potasio 40 y el carbono 14, así como elementos radiactivos pesados procedentes de las series de desintegración del uranio y del torio. Ellos pueden presentarse en residuos, o desechos, generados por cualesquiera actividades relacionadas con la extracción de materiales

naturales de la tierra o su elaboración (por ejemplo, la explotación minera o la producción de petróleo y gas). Asimismo, la combustión del carbón origina la concentración de radionucleidos en las cenizas, y una considerable liberación de materias radiactivas transportadas por el aire. El riesgo radiológico que entraña la presencia de NORM en los productos de desecho se debe fundamentalmente al radio y sus descendientes. Las dosis de radiación asociadas pueden ser significativas y, de hecho, a menudo sobrepasan las normas radiológicas establecidas para el control de las radiaciones derivadas del uso y la aplicación de materiales radiactivos.

Las preocupaciones en torno al tema han obligado a los reguladores a examinar los posibles riesgos asociados con la evacuación de desechos de NORM. En varios países, algunos de estos desechos se someten en estos momentos a una gestión similar a la de los desechos radiactivos, aunque el nivel de control varía muchísimo. En un estudio reciente se demostró que las concentraciones de radionucleidos en las tuberías de elaboración de petróleo y gas pueden aproximarse a niveles superiores a los que se considerarían inaceptables para la evacuación de desechos radiactivos cerca de la superficie. En algunos países, hay derivados de la producción y elaboración de petróleo y gas que ya se gestionan como desechos radiactivos de actividad baja, mientras que en otros países aún no se controlan.

Desechos de actividad muy baja (VLLW). En ocasiones, este tipo de desechos se genera en grandes volúmenes, aunque supone pocos riesgos potenciales. Ello crea un problema porque no es práctico evacuarlos en repositorios de LILW ni aceptable hacerlo como desechos industriales. Hoy día no existe una definición internacionalmente acordada de VLLW y la solución del problema depende, entre otros factores, del establecimiento de criterios de reglamentación.

En Suecia, en el emplazamiento de cada central nuclear funcionan varias instalaciones en forma de túmulos para la evacuación de VLLW. Este tipo de evacuación sólo puede realizarse en el caso de desechos que requieran menos de 100 años de control radiológico. En Francia, una gran parte de los VLLW se envía al repositorio de L'Aube mientras que el resto se mantiene en los emplazamientos. En conjunto, las autoridades industriales francesas estiman que el total de VLLW es de alrededor de 15 millones de toneladas métricas, y se han intensificado los esfuerzos por encontrar una solución más satisfactoria para su evacuación. En un estudio realizado recientemente por un grupo de trabajo industrial se examinaron cuatro tipos de instalaciones de evacuación de VLLW, tres en estructura de túmulos y una subterránea. Estos diseños están siendo objeto de examen por la autoridad expedidora de licencias. En el Japón, el Instituto Japonés de Investigaciones sobre la Energía Atómica (JAERI) ha emprendido un programa para demostrar la seguridad de la

evacuación de los VLLW cerca de la superficie. El tipo de desechos que debe ser evacuado con arreglo al proyecto de demostración comprende fundamentalmente fragmentos de hormigón de blindaje de reactor y estructuras contaminadas procedentes del Reactor de Potencia de Demostración de ese país, los cuales contienen cantidades de radionucleidos varias veces inferiores a los límites legales. Una vez obtenida la aprobación para construir la instalación de ensayo, se excavó un pozo en el emplazamiento del reactor en el que se evacuaron 1700 toneladas de los desechos entre noviembre de 1995 y marzo de 1996. El pozo de evacuación se cubrió con una capa gruesa de tierra con hierba en la superficie y el emplazamiento estará bajo control durante unos 30 años.

Fuentes de radiación selladas gastadas (SRS).

Más de medio millón de fuentes de radiación selladas se utilizan ampliamente en la medicina, la investigación, la agricultura y otras esferas. Una vez usadas, o gastadas, dichas fuentes requieren una gestión cuidadosa antes de proceder a evacuarlas en condiciones de seguridad. Se ha adquirido experiencia en todas las etapas de la gestión de las SRS gastadas, salvo en la evacuación de las fuentes de radiación de período largo. No obstante, no todos los países cuentan con los recursos necesarios para aplicar los métodos existentes.

Siempre que se emplace, construya y explote adecuadamente, toda instalación cerca de la superficie puede utilizarse sin riesgos para evacuar la mayoría de las SRS gastadas, con la excepción del americio 241 y el radio 226, así como las grandes fuentes que se utilizan en las instalaciones de teleterapia o irradiación. La posibilidad de aceptar desechos en un repositorio determinado está sujeta a criterios como los de un límite de concentración de los diferentes radionucleidos o grupos de radionucleidos en un bulto de desechos y la actividad total.

En muchos países se generan sólo pequeñas cantidades de desechos radiactivos, incluidas las SRS gastadas, que alcanzan sólo algunos metros cúbicos anuales. Estos países podrían beneficiarse de la creación de repositorios multinacionales-regionales. Otros países que cuentan con repositorios en explotación afrontan diferentes problemas en relación con las SRS gastadas. Por ejemplo, en Rusia, las SRS gastadas de período largo (como las fuentes de radio) se almacenan para su futura evacuación geológica y otras se evacúan en bóvedas de hormigón o en pozos de sondeo abiertos en suelos poco profundos. El concepto de pozo de sondeo, desarrollado por la antigua Unión Soviética desde finales de los años cincuenta hasta principios de los sesenta, se refiere al vertimiento de las SRS gastadas por un canal de entrada en espiral hacia una vasija de acero inoxidable de cinco metros de profundidad situada en pozo de sondeo revestido de hormigón. A partir de 1986, y por razones de seguridad, el espacio libre dentro de las vasijas se rellenó con matriz metálica o materiales de compuestos de polímeros

Situación de las instalaciones de evacuación de desechos de actividad baja e intermedia en diversos países en 1996

País	Repositorio (fecha de apertura/cierre)	Concepto del repositorio	País	Repositorio (fecha de apertura/cierre)	Concepto del repositorio
En proceso de selección del emplazamiento			Estados Unidos	RWMC, INEEL (1952-)	IS/ITCS
Australia		ITCS		SWSA 6 ORNL (1973-)	IS/ITCS
Bélgica		ITCS		Zona de Evacuación	
Brasil		ITCS		G LANL (1957-)	ISCS
Bulgaria		ITCS		Barnwell,	
Canadá (LLW histórico)		-		Carolina del Sur (1971-)	ISCS
China (oriental)		-		200 East Area Burial Ground,	
(sudoccidental)		-		Hanford (decenio de 1940 -),	ISCS
Corea, República de		-		200 West Area Burial Ground,	
Croacia		-		Hanford (1996-)	ISCS
Cuba		CS		Richland Washington (1965-)	ISCS
Ecuador		ITCS		Emplazamiento de la central	
Eslovenia		-		de Savannah River (1953-)	ISCS
Estados Unidos (Connecticut)		-	Hungría	RHFT Puspokszilagy (1976-)	ITCS
(Estado de Nueva York)		ITCS	India	Trombay (1954-)	IS/ITCS
(Illinois)		ITCS		Tarapur (1968-)	ITCS
(Massachusetts)		-		Rajasthan (1972-)	ITCS
(Michigan)		ITCS		Kalpakkam (1974-)	ITCS
(Ohio)		ITCS		Narora (1991-)	ITCS
(Nueva Jersey)		-		Kakrapar (1993-)	ITCS
(Pensilvania)		ITCS	Irán	Desierto de Kavir Ghom (1984-)	ISCS
Hungría		-	Israel	Desierto de Negev	ISCS
Indonesia		ITCS	Japón	Rokkasho (1992-)	ITCS
Paquistán		-	Kazajistán	Almaty	ITCS
Reino Unido		RG		Kurchatov (1996-)	ITCS
Turquía		ITCS		Ulba (1996-)	ITCS
Emplazamiento seleccionado			Kirguistán	Tschuj (1965-)	ITCS
China	Bahía de Guangdong Daya	ITCS	Letonia	Baldone (1961-)	ITCS
Chipre	Granja Ari	ISCS	México	Maquixco (1972-)	ISCS
Egipto	Inshas	ITCS	Moldova	Kishinev (1960-)	ITCS
México	Laguna Verde	ITCS	Paquistán	Kanupp (1971-)	ISCS
Perú	RASCO	ITCS	Polonia	PINSTECH (1969-)	ISCS
Rumania	Cernavoda	ITCS	Reino Unido	Roan (1961-)	ITCS
Suiza	Wellenberg	CS		Dounreay (1957-)	ISCS
En proceso de concesión de licencia			República Checa	Drigg (1959-)	IS/ITCS
Alemania	Konrad	RG		Richard II (1964 -)	CS
Canadá	Chalk River	ITCS	Rumania	Bratrstvi (1974 -)	CS
Estados Unidos	Ward Valley, California	ITCS	Rusia ²	Dukovany (1994 -)	ITCS
	Condado de Boyd, Nebraska	ITCS		Baita-Bihor (1985-)	RG
	Condado de Wake,			Sergiev Posad reg. de Moscú (1961-)	ITCS
	Carolina del Norte	ITCS		Sosnovyi Bor, reg. de Leningrado	ITCS
	Rancho Fackin, Texas	ITCS		Kazán Tatarstán	ITCS
Noruega	Himdalen	CS		Volgogrado	ITCS
República Eslovaca	Mohovce	ITCS		Nijnyi Novgorod	ITCS
En construcción				Irkutsk	ITCS
China	Gobi, Gansa	ITCS		Samara	ITCS
Finlandia	Loviisa	CS		Novosibirsk	ITCS
En funcionamiento				Rostov	ITCS
Alemania	Morsleben (1981-)	RG		Saratov	ITCS
Argentina	Ezeiza (1970-)	ITCS	Sudáfrica	Ekaterinburg	ITCS
Azerbaiyán	Bakú (decenio de 1960 -)	ITCS		Ufa Bashkortostán	ITCS
Australia	Mt. Walton East (1992-)	ITCS	Suecia	Cheliabinsk	ITCS
Belarús ¹	Ekores, reg. de Minsk (1964-)	ITCS		Habarovsk	ITCS
Brasil	Abadia de Goias (1996-)	ITCS		Pelindaba (1969-)	ISCS
Finlandia	Olkiluoto (1992-)	CS		Vaalputs (1986-)	ISCS
Francia	Centre de l'Aube (1992-)	ITCS		SFR (1988-)	CS
Georgia	Tbilisi (decenio de 1960-)	ITCS		Oskarshamn NPP (1986-)	ISCS
España	El Cabril (1992-)	ITCS	Ucrania	Studsvik (1988-)	ISCS
				Forsmark NPP (1988-)	ISCS
				Ringhals NPP(1993-)	ISCS
				Centro de Dnepropetrovsk	ITCS
				Centro de L'vov	ITCS

País	Repositorio (fecha de apertura/cierre)	Concepto del repositorio	País	Repositorio (fecha de apertura/cierre)	Concepto del repositorio
Ucrania (cont.)	Centro de Odessa	ITCS	Cerradas		
	Centro de Kharkov	ITCS	Estados Unidos	Beatty, Nevada (1962-1992)	ITCS
	Centro de Donetsk	ITCS		Maxey Flats,	
Uzbekistán	Tashkent (decenio de 1960 -)	ITCS		Kentucky (1963-1978)	ISCS
Viet Nam	Dalat (1986-)	ITCS		ORNL SWSA 1 (1944-1944)	ISCS
				ORNL SWSA 2 (1944-1946)	ISCS
Cese del funcionamiento o en proceso de cierre					
Alemania	Asse (1967-1978)	RG		Sheffield,	
Armenia	Erevan	ITCS		Illinois (1967-1978)	ISCS
Bulgaria	Novi Han (1964-1994)	ITCS		West Valley,	
Estonia	Tammiku		Hungría	Nueva York (1963-1975)	ISCS
	(a.Saku) (1964-1996)	ITCS	Japón	Solymer (1960-1976) ³	ITCS
Federación de Rusia ²	Murmansk	ITCS	Lituania	JAERI Tokai (1995-1996)	ISCS
Groznyi	Chechenia	ITCS		Maishiogala	
Francia	Centre de la Manche (1969-1994)	ITCS	México	(decenio de 1970-1989)	ITCS
			Noruega	La Piedrera (1983-1984)	ITCS
Tajikistán	Beshkek	ITCS	República Checa	Kjeller (1970-1970) ⁴	ITCS
Ucrania	Centro de Kiev (-1992)	ITCS		Hostim (1953-1965)	CS

Notas del cuadro

Abreviaturas: ISCS = Instalación Simple Cerca de la Superficie; CS = Caverna Subterránea; ITCS = Instalación Técnica Cerca de la Superficie; RG = Repositorio Geológico; IS/ITCS = ISCS e ITCS

¹Se construyeron 77 repositorios para evacuar los desechos generados por el accidente de Chernobil.

²Los repositorios de la Federación de Rusia comenzaron a funcionar entre 1961 y 1967.

³Los desechos se trasladaron a otro repositorio (de Solymer a RHFT Puspokszilagy, y de ORNL SWASA-1 a ORNL SWSA-2, respectivamente).

⁴Los desechos se trasladarán a un nuevo repositorio (Himdalen) cuando se construya éste.

Definiciones de términos seleccionados

Desechos de actividad baja e intermedia (LILW): El OIEA los define como los desechos radiactivos cuya concentración o cantidades de radionucleidos son superiores a los niveles de actividad fijados por el órgano regulador, pero cuyo contenido de radionucleidos y potencia térmica son inferiores a los de los desechos de actividad alta (es decir, aproximadamente 2 kW/m³). Los LILW suelen dividirse en desechos de período corto y desechos de período largo. Los LILW se generan en la explotación de las centrales nucleares (~500 m³/GWe por año) y otras instalaciones del ciclo del combustible (~90 m³/GWe por año de la reelaboración y ~ 60 000 m³/GWe por año de la extracción y el tratamiento del uranio), la clausura de esas instalaciones (500 a 10 000 m³ de una central eléctrica de un megavatio), y las aplicaciones de radisótopos. Estos desechos requieren una gestión adecuada mediante su tratamiento y acondicionamiento y, finalmente su evacuación.

Evacuación: Se define como el confinamiento de los desechos en una instalación especificada aprobada, sin la intención de recuperarlos. Asimismo, puede incluir la descarga directa aprobada de efluentes al medio ambiente con la ulterior dispersión (en el presente artículo no se analiza este aspecto). Por otro lado, la evacuación por confinamiento y aislamiento comprende la evacuación en tierra y el vertimiento en el mar (que algunos países aplicaban antes de que quedaran prohibido por el Convenio de Londres sobre vertimiento), entre otros métodos. (El presente artículo se centra en la evacuación en tierra, que es la práctica común actual predominante.) En este contexto, el objetivo de la evacuación es aislar suficientemente los desechos para proteger al ser humano y al medio ambiente y no imponer cargas indebidas sobre las generaciones futuras. Ello puede lograrse aplicando múltiples medidas protectoras en el sistema de evacuación, teniendo en cuenta la interdependencia entre los elementos que intervienen en el sistema (es decir, un enfoque sistemático). Las medidas protectoras requieren varios niveles de protección y barreras múltiples para aislar los desechos, limitar la liberación de materiales radiactivos, y reducir la posibilidad de que ocurran fallas o combinaciones de fallas que puedan tener consecuencias radiológicas significativas.

Instalación cerca de la superficie: Es una instalación nuclear para la evacuación de desechos situada a unas decenas de metros de la superficie terrestre. Este tipo de instalación abarca fosos y bóvedas artificiales.

Cavidades subterráneas: Son instalaciones cerca de la superficie construidas dentro de minas y cavernas.

Repositorio geológico: Es una instalación nuclear para la evacuación de desechos situada bajo tierra (generalmente a más de varios cientos de metros bajo la superficie) en una formación geológica estable con miras a garantizar que los radionucleidos queden aislados de la biosfera durante un período largo.

en dependencia del nivel de actividad y del período de semidesintegración de las SRS gastadas. Desde 1995, se ha sometido a vigilancia los pozos de sondeo para evaluar su comportamiento. En los Estados Unidos, las SRS gastadas se clasifican en diferentes clases y no todas son aceptables para su evacuación cerca de la superficie. En consecuencia, se están examinando opciones de evacuación más conservadoras, como repositorios geológicos o perforaciones proyectadas a profundidad. Independientemente de la tecnología que se utilice, el volumen de SRS gastadas para este tipo de evacuación podría no ser suficientemente grande para justificar los costos económicos o institucionales asociados con la construcción de este tipo de instalación independiente.

Mejoramiento de las instalaciones de evacuación existentes. Algunos países que cuentan con sistemas de evacuación están mejorando el funcionamiento de sus instalaciones o se están adoptando medidas correctoras en ellas para aumentar sus capacidades de protección o para cumplir con las nuevas regulaciones. Las medidas correctoras pueden incluir la recuperación de los desechos, la inmovilización *in situ* de desechos, la descontaminación *in situ* y la contención *in situ*, así como la instalación de tapas, paredes de interceptación o barreras de piso. En varios países, como Alemania, la India, Bulgaria y otros de Europa oriental, se han realizado o se realizarán evaluaciones de la seguridad en el contexto del examen general del funcionamiento de las instalaciones de evacuación existentes.

Por ejemplo, en el repositorio alemán de Morsleben se realizó una evaluación de la seguridad que propició la formulación de nuevos requisitos para la aceptación de desechos y procedimientos de garantía de calidad. En el repositorio de Puspokszilagy de Hungría, donde se aceptaban algunos desechos sin acondicionar junto con bultos de desechos, se ha establecido como norma que a partir de 1997 sólo se acepten desechos embalados en bidones de acero de 200 litros. A finales del decenio de 1980, el repositorio de Drigg en el Reino Unido fue objeto de importantes mejoras. Se dejaron cerrados los antiguos fosos simples, y se construyó una bóveda de hormigón para los nuevos tipos de bultos de desechos. Asimismo, se instalaron paredes de interceptación para limitar la entrada y salida de la corriente de agua en los fosos de evacuación existentes. En Noruega, el plan de medidas correctoras de una antigua instalación de evacuación cerca de la superficie para desechos de período largo comprende la extracción de todos los bultos de desechos y su almacenamiento en una instalación provisional en la superficie, desde donde se trasladarán hacia una instalación de almacenamiento y evacuación en una caverna rocosa que se construirá en Himdalen.

Almacenamiento a largo plazo. En algunos países está empezando a aplicarse la opción de almacenamiento a largo plazo de los desechos radiactivos. Dicha opción dilata la decisión sobre

la evacuación definitiva de los desechos con miras a ganar la confianza del público para la puesta en práctica de las actividades de evacuación. Sin embargo, ese enfoque puede requerir un examen más profundo de los aspectos técnicos y de reglamentación.

En el emplazamiento previsto en Himdalen, Noruega, se espera construir túneles horizontales para la evacuación de LILW de período corto, así como otro túnel para el almacenamiento de desechos que contienen plutonio por un período operacional de unos 30 años durante el cual los desechos almacenados no se recuperarán. Cuando se cierre el repositorio, se tomará una decisión sobre la evacuación de los desechos en el emplazamiento, sobre la base de la experiencia operacional. Un método similar se observa en Suiza, donde existe preocupación pública acerca de la irrecuperabilidad de los desechos que se evacuarán en el repositorio previsto en Wellenberg. Las autoridades del lugar analizan la posibilidad de mantener la instalación abierta y controlada por un período de dos o más generaciones hasta el momento en que se pueda decidir la clausura del repositorio.

Costos de evacuación. Los costos de evacuación han aumentado considerablemente en la medida en que se han introducido más adelantos técnicos en las instalaciones de evacuación. En algunos países existe una evidente tendencia general a reducir al mínimo la generación de desechos radiactivos como parte de los esfuerzos para reducir los costos. Además, como se observó anteriormente, se están buscando soluciones menos costosas para la evacuación de desechos radiactivos de actividad muy baja (VLLW).

Recientemente, se creó un grupo de trabajo con la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos sobre cuestiones relativas al costo de la evacuación de LILW. El grupo determinará los componentes de costo, analizará los factores que inciden en los costos de evacuación y estudiará la repercusión de los costos de evacuación en el precio global de la generación de electricidad en las centrales nucleares.

Cuestiones de aceptación pública. Como se observó anteriormente, la cuestión de la aceptación pública ha afectado en gran medida el proceso de gestión y evacuación de desechos radiactivos. En muchos países, sobre todo en los industrializados, se están realizando mayores esfuerzos para contrarrestar aquellas percepciones del público que son sumamente negativas. Estos esfuerzos comprenden programas de comunicación ampliados destinados a mejorar el diálogo con las comunidades locales y el público en general, y muestras más fehacientes de la decisión de lograr la excelencia científica, la protección del medio ambiente y la seguridad a largo plazo en la selección del emplazamiento y el funcionamiento de los repositorios.

En algunos países, se han ofrecido incentivos financieros a las comunidades que aceptan en

su territorio emplazamientos de evacuación de desechos. Sin embargo, esta compensación no debe entenderse como una prima por riesgo y antes de entrar en cualquier debate al respecto se deben examinar y resolver las cuestiones relativas a la seguridad. Los mencionados incentivos financieros son, entre otros, compensación monetaria, suministro gratuito de electricidad y mayores oportunidades de empleo.

Repositorios multinaciones-regionales. Algunos países expresan interés por establecer un repositorio multinacional-regional mediante el cual un emplazamiento situado en un país receptor aceptaría desechos radiactivos de otros países. Esta idea presenta algunas ventajas económicas, tecnológicas y de seguridad, sobre todo para los países de una misma región geográfica. Una condición previa es lograr consenso entre los países y las regiones interesados, en particular respecto del movimiento transfronterizo de los desechos radiactivos. Recientemente, el OIEA evaluó algunos de los factores fundamentales que inciden en el logro de un consenso entre los países interesados respecto de las diversas cuestiones que se desprenden de un enfoque regional como éste.

En principio, las cuestiones fundamentales que supone un repositorio multinacional-regional no difieren mucho de las relacionadas con los proyectos nacionales. Sin embargo, existen algunas diferencias cualitativas respecto de las características de los desechos aceptados, la responsabilidad de los países asociados, la división de las responsabilidades, la aplicación de las salvaguardias necesarias, así como la posesión y transferencia de los materiales de desecho.

Tales repositorios regionales, que se basarían en las mejores prácticas internacionales de gestión de desechos radiactivos, podrían ofrecer a algunos países la opción de no construir sus propios lugares emplazamientos, lo que disminuiría el número total de repositorios en el mundo. Además, podrían ser una opción para los países que no cuentan con condiciones favorables para ubicar sus propios emplazamientos de evacuación. Entre las desventajas está la posibilidad de que el repositorio regional aumente las actividades de transporte. Asimismo, quizás resulte difícil establecer un sistema duradero que sobreviva a los cambios políticos o institucionales y garantice la colaboración a largo plazo de todos los países asociados. Una de las tareas más difíciles en torno a esa idea es negociar acuerdos que aseguren a los países asociados el cumplimiento de todas las obligaciones técnicas, políticas y financieras.

la construcción y el funcionamiento del repositorio son adecuados —y se controla y limita el contenido de radionucleidos de los desechos— se podrá garantizar satisfactoriamente la seguridad de la instalación por largo tiempo. Ello puede alcanzarse aplicando múltiples medidas de protección, como las barreras artificiales y naturales, y los controles operacionales e institucionales.

En el seno de los Estados Miembros del OIEA, se está dependiendo más de las barreras artificiales múltiples para lograr la seguridad y la protección del medio ambiente y fomentar la confianza del público. Además, se hace énfasis en los sistemas de explotación seguros y fiables para la manipulación a distancia, la protección y el seguimiento de los bultos de desechos. Al mismo tiempo, se buscan soluciones viables para la evacuación segura de categorías de desechos de niveles de radiactividad muy bajos y volúmenes grandes. Asimismo, se está prestando mayor atención a las cuestiones relacionadas con la evacuación segura de desechos que contienen materiales radiactivos de origen natural, la gestión y la evacuación de fuentes de radiación selladas gastadas, los costos de evacuación, la aceptación del público, las actividades de mejoramiento o la aplicación de medidas correctoras en los emplazamientos de evacuación existentes, el almacenamiento seguro a largo plazo de los desechos, y el posible establecimiento de repositorios multinacionales-regionales.

En general, los países, sobre todo los industrializados, avanzan lentamente en la selección de emplazamientos y la concesión de licencias para nuevos repositorios. Esta gestión normalmente comprende exámenes técnicos amplios por parte del órgano regulador, audiencias públicas y procedimientos normativos y jurídicos complejos.

En los países en desarrollo, la situación es diferente. La mayoría de ellos no generan grandes cantidades de desechos radiactivos; no obstante, requieren asistencia y orientación técnicas para establecer infraestructuras y capacidades adecuadas para la gestión y evacuación de desechos en condiciones de seguridad. El Organismo, mediante sus diversos programas técnicos y de investigación, apoya los proyectos y actividades de cooperación dirigidos a esos fines. A medida que aumente el número de instalaciones de evacuación de desechos radiactivos en funcionamiento en el mundo, la transferencia de tecnología y conocimientos especializados a los países en desarrollo continuará siendo de vital importancia para ayudarlos a aumentar sus capacidades en esta esfera.

Cooperación internacional

La evacuación de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia se basa en tecnologías probadas y bien demostradas. Si el emplazamiento,