

# COLECCIÓN DE NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

Evaluación de  
la seguridad para  
la disposición final de  
desechos radiactivos  
cerca de la superficie

## GUÍA DE SEGURIDAD

Nº WS-G-1.1



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica

# PUBLICACIONES DEL OIEA RELACIONADAS CON LA SEGURIDAD

## NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

Con arreglo al artículo III de su Estatuto, el OIEA está autorizado a establecer normas de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y proveer a la aplicación de esas normas en las actividades nucleares con fines pacíficos.

Las publicaciones relacionadas con las actividades de reglamentación mediante las cuales el OIEA establece medidas y normas de seguridad se presentan en la **Colección de Normas de Seguridad del OIEA**. Esta colección abarca la seguridad nuclear, la seguridad radiológica, la seguridad en el transporte y la seguridad de los desechos, así como también la seguridad en términos generales (es decir, cuando comprende dos o más de las cuatro esferas anteriores). Dentro de la Colección de Normas de Seguridad del OIEA hay tres categorías de documentos. **Nociones fundamentales de seguridad, Requisitos de seguridad y Guías de seguridad.**

Las **Nociones fundamentales de seguridad** (cubierta azul) presentan los objetivos, conceptos y principios básicos de seguridad y protección en el desarrollo y la aplicación de la energía nuclear con fines pacíficos.

Los **Requisitos de seguridad** (cubierta roja) señalan los requisitos que hay que cumplir para garantizar la seguridad. Estos requisitos, en cuya formulación se emplea generalmente la forma deberá(n) o expresiones como “habrá que”, “hay que”, “habrá de”, “se deberá” (en inglés “shall”), se rigen por los objetivos y principios enunciados en las Nociones fundamentales de seguridad.

Las **Guías de seguridad** (cubierta verde) recomiendan acciones, condiciones o procedimientos para cumplir con los requisitos de seguridad. En la formulación de las recomendaciones de las Guías de seguridad se emplea generalmente la forma debería(n) o expresiones como “conviene”, “se recomienda”, “es aconsejable” (en inglés “should”) para indicar que es necesario tomar las medidas recomendadas u otras medidas equivalentes para cumplir con los requisitos.

Las Normas de seguridad del OIEA no son jurídicamente vinculantes para los Estados Miembros, pero éstos pueden adoptarlas a discreción para utilizarlas en sus reglamentos nacionales relacionados con sus propias actividades. Las Normas son vinculantes para el OIEA en relación con sus propias operaciones y para los Estados en relación con las operaciones en las que el OIEA presta su ayuda.

La información sobre el programa de Normas de seguridad del OIEA (incluidas las ediciones en idiomas diferentes del inglés) está disponible en el sitio de Internet del OIEA

[www.iaea.org/ns/coordinet](http://www.iaea.org/ns/coordinet)

o puede obtenerse solicitándola a la Sección de Coordinación de la Seguridad, OIEA, P.O. Box 100, A-1400, Viena (Austria).

## OTRAS PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA SEGURIDAD

Con arreglo a las disposiciones del artículo III y del párrafo C del artículo VIII de su Estatuto, el OIEA pone a disposición y fomenta el intercambio de información relacionada con las actividades nucleares pacíficas y sirve de intermediario entre sus Estados Miembros.

Los informes sobre la seguridad y protección en las actividades nucleares se publican en otras colecciones, particularmente en la **Colección de Informes de Seguridad del OIEA** con carácter informativo. En los informes de seguridad se suelen describir prácticas correctas y ofrecer ejemplos prácticos y métodos detallados que pueden utilizarse para cumplir con los requisitos de seguridad. En estos informes no se establecen requisitos ni se formulan recomendaciones.

Otras colecciones del OIEA que están a la venta e incluyen publicaciones relacionadas con la seguridad son la **Colección de Informes Técnicos**, la **Colección de Informes de Evaluaciones Radiológicas** y la **Colección INSAG**. El OIEA también publica informes sobre accidentes radiológicos y otras publicaciones especiales de venta al público. Las publicaciones relacionadas con la Seguridad que se distribuyen en forma gratuita son las de la **Colección TECDOC**, la **Colección de Normas de Seguridad Provisionales**, la **Colección de Cursos de Capacitación**, la **Colección de Servicios del OIEA** y la **Colección de Manuales de Informática**, así como las que aparecen bajo los títulos de **Practical Radiation Safety Manuals** y **Practical Radiation Technical Manuals**.

EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD  
PARA LA DISPOSICIÓN FINAL  
DE DESECHOS RADIACTIVOS  
CERCA DE LA SUPERFICIE

Los siguientes Estados son Miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica:

AFGANISTÁN	GEORGIA	NUEVA ZELANDIA
ALBANIA	GHANA	PAÍSES BAJOS
ALEMANIA	GRECIA	PAKISTÁN
ANGOLA	GUATEMALA	PANAMÁ
ARABIA SAUDITA	HAITÍ	PARAGUAY
ARGELIA	HONDURAS	PERÚ
ARGENTINA	HUNGRÍA	POLONIA
ARMENIA	INDIA	PORTUGAL
AUSTRALIA	INDONESIA	QATAR
AUSTRIA	IRÁN,	REINO UNIDO DE GRAN
AZERBAIYÁN	REPÚBLICA ISLÁMICA DEL	BRETAÑA E IRLANDA
BANGLADESH	IRAQ	DEL NORTE
BELARÚS	IRLANDA	REPÚBLICA ÁRABE SIRIA
BÉLGICA	ISLANDIA	REPÚBLICA CENTRO-
BENIN	ISLAS MARSHALL	AFRICANA
BOLIVIA	ISRAEL	REPÚBLICA CHECA
BOSNIA Y HERZEGOVINA	ITALIA	REPÚBLICA DE COREA
BOTSWANA	JAMAHIRIYA ÁRABE LIBIA	REPÚBLICA DE MOLDOVA
BRASIL	JAMAICA	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA
BULGARIA	JAPÓN	DEL CONGO
BURKINA FASO	JORDANIA	REPÚBLICA DOMINICANA
CAMERÚN	KAZAJSTÁN	REPÚBLICA UNIDA
CANADÁ	KENYA	DE TANZANÍA
CHILE	KIRGUISTÁN	RUMANIA
CHINA	KUWAIT	SANTA SEDE
CHIPRE	LA EX REPÚBLICA	SENEGAL
COLOMBIA	YUGOSLAVA DE	SERBIA Y MONTENEGRO
COSTA RICA	MACEDONIA	SEYCHELLES
CÔTE D'IVOIRE	LETONIA	SIERRA LEONA
CROACIA	LÍBANO	SINGAPUR
CUBA	LIBERIA	SRI LANKA
DINAMARCA	LIECHTENSTEIN	SUDÁFRICA
ECUADOR	LITUANIA	SUDAN
EGIPTO	LUXEMBURGO	SUECIA
EL SALVADOR	MADAGASCAR	SUIZA
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	MALASIA	TAILANDIA
ERITREA	MALÍ	TAYIKISTÁN
ESLOVAQUIA	MALTA	TÚNEZ
ESLOVENIA	MARRUECOS	TURQUÍA
ESPAÑA	MAURICIO	UCRANIA
ESTADOS UNIDOS	MÉXICO	UGANDA
DE AMÉRICA	MÓNACO	URUGUAY
ESTONIA	MONGOLIA	UZBEKISTÁN
ETIOPÍA	MYANMAR	VENEZUELA
FEDERACIÓN DE RUSIA	NAMIBIA	VIETNAM
FILIPINAS	NICARAGUA	YEMEN
FINLANDIA	NÍGER	ZAMBIA
FRANCIA	NIGERIA	ZIMBABWE
GABÓN	NORUEGA	

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York); entró en vigor el 29 de julio de 1957. El Organismo tiene la Sede en Viena. Su principal objetivo es “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”.

© OIEA, 2004

Para copiar o traducir el material informativo de la presente publicación se deberá pedir por escrito el correspondiente permiso al Organismo Internacional de Energía Atómica, Wagramer Strasse 5, Apartado de Correos 100, A-1400 Viena, Austria.

Impreso por el OIEA en Austria  
 Mayo de 2004  
 STI/PUB/1075

COLECCIÓN DE NORMAS DE SEGURIDAD N° WS-G-1.1

EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD  
PARA LA DISPOSICIÓN FINAL  
DE DESECHOS RADIATIVOS  
CERCA DE LA SUPERFICIE

GUÍA DE SEGURIDAD

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA  
VIENA, 2004

ESTA PUBLICACIÓN DE LA COLECCIÓN DE NORMAS DE SEGURIDAD SE  
PUBLICA TAMBIEN EN FRANCÉS, INGLÉS Y RUSO

EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD PARA LA DISPOSICIÓN FINAL  
DE DESECHOS RADIATIVOS CERCA DE LA SUPERFICIE

OIEA, VIENA, 2004

STI/PUB/1075

ISBN 92-0-302604-5

ISSN 1020-5837

# PRÓLOGO

**por Mohamed ElBaradei  
Director General**

Una de las funciones estatutarias del OIEA es la de establecer o adoptar normas de seguridad para proteger, en el desarrollo y la aplicación de la energía nuclear con fines pacíficos, la salud, la vida y los bienes, y proveer lo necesario para la aplicación de esas normas a sus propias operaciones, así como a las realizadas con su asistencia y, a petición de las Partes, a las operaciones que se efectúen en virtud de cualquier arreglo bilateral o multilateral o bien, a petición de un Estado, a cualquiera de las actividades de ese Estado en el campo de la energía nuclear.

Los siguientes órganos asesores supervisan la elaboración de las normas de seguridad: la Comisión Asesora sobre Normas de Seguridad (ACSS), el Comité Asesor sobre Normas de Seguridad Nuclear (NUSSAC), el Comité Asesor sobre Normas de Seguridad Radiológica (RASSAC), el Comité Asesor sobre Normas de Seguridad en el Transporte (TRANSSAC), y el Comité Asesor sobre Normas de Seguridad de los Desechos (WASSAC). Los Estados Miembros están ampliamente representados en todos estos comités.

Con el fin de asegurar el más amplio consenso internacional posible, las Normas de seguridad se presentan además a todos los Estados Miembros para que formulen observaciones al respecto antes de aprobarlas la Junta de Gobernadores del OIEA (en el caso de las Nociones fundamentales de seguridad y los Requisitos de seguridad) o el Comité de Publicaciones, en nombre del Director General (en el caso de las Guías de seguridad).

Aunque las Normas de seguridad del OIEA no son jurídicamente vinculantes para los Estados Miembros, éstos pueden adoptarlas, a su discreción, para utilizarlas en sus reglamentos nacionales respecto de sus propias actividades. Las Normas son obligado cumplimiento para el OIEA en relación con sus propias operaciones, así como para los Estados en relación con las operaciones para las que éste preste asistencia. Todo Estado que desee concertar con el OIEA un acuerdo para recibir su asistencia en lo concerniente al emplazamiento, diseño, construcción, puesta en servicio, explotación o clausura de una instalación nuclear, o a cualquier otra actividad, tendrá que cumplir las partes de las Normas de seguridad correspondientes a las actividades objeto del acuerdo. Ahora bien, conviene recordar que, en cualquier trámite de concesión de licencia, la decisión definitiva y la responsabilidad jurídica incumben a los Estados.

Si bien las mencionadas normas establecen las bases esenciales para la seguridad, puede ser también necesario incorporar requisitos más detallados, acordes

con la práctica nacional. Además, existirán por lo general aspectos especiales que hayan de ser dictaminados por expertos atendiendo a las circunstancias particulares de cada caso.

Se menciona cuando procede, pero sin tratarla en detalle, la protección física de los materiales fisionables y radiactivos y de las centrales nucleares en general; las obligaciones de los Estados en este respecto deben enfocarse partiendo de la base de los instrumentos y publicaciones aplicables elaborados bajo los auspicios del OIEA. Tampoco se consideran explícitamente los aspectos no radiológicos de la seguridad industrial y la protección del medio ambiente; se reconoce que, en relación con ellos, los Estados deben cumplir sus compromisos y obligaciones internacionales.

Es posible que algunas instalaciones construidas conforme a directrices anteriores no satisfagan plenamente los requisitos y recomendaciones prescritos por las Normas de seguridad del OIEA. Corresponderá a cada Estado decidir la forma de aplicar tales normas a esas instalaciones.

Se señala a la atención de los Estados el hecho de que las Normas de seguridad del OIEA, si bien no jurídicamente vinculantes, se establecen con miras a conseguir que las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear y los materiales radiactivos se realicen de manera que los Estados puedan cumplir sus obligaciones derivadas de los principios generalmente aceptados del derecho internacional y de reglas como las relativas a la protección del medio ambiente. Con arreglo a uno de esos principios generales, el territorio de un Estado ha de utilizarse de forma que no se causen daños en otro Estado. Los Estados tienen así una obligación de diligencia y un criterio de precaución.

Las actividades nucleares civiles desarrolladas bajo la jurisdicción de los Estados están sujetas, como cualesquier otras actividades, a las obligaciones que los Estados suscriben en virtud de convenciones internacionales, además de a los principios del derecho internacional generalmente aceptados. Se cuenta con que los Estados adopten en sus ordenamientos jurídicos nacionales la legislación (incluidas las reglamentaciones) así como otras normas y medidas que sean necesarias para cumplir efectivamente todas sus obligaciones internacionales.



## PREFACIO

Los desechos radiactivos provienen de la generación de energía nucleoelectrica y del uso de materiales radiactivos en la industria, la investigación y la medicina. La importancia de la gestión segura de los desechos radiactivos para la protección de la salud de los seres humanos y el medio ambiente ha sido reconocida desde hace mucho tiempo, y se ha adquirido una experiencia considerable al respecto.

El programa de Normas de seguridad para la gestión de desechos radiactivos (RADWASS) del OIEA tiene por objeto establecer un conjunto completo y coherente de principios, requisitos y recomendaciones para la gestión segura de los desechos radiactivos y formular las directrices necesarias para su aplicación. Esto se logra en el contexto de la Colección de Normas de Seguridad del OIEA mediante un conjunto de documentos internamente compatibles que reflejan el consenso internacional en la materia. Las publicaciones RADWASS ofrecerán a los Estados Miembros una serie completa de normas de seguridad internacionalmente acordadas para ayudar a establecer o a complementar los criterios, las normas y las prácticas nacionales.

Esta Guía de seguridad trata el tema de la evaluación de la seguridad para la disposición final de desechos radiactivos cerca de la superficie. Ofrece recomendaciones para cumplir con los requisitos relativos a la evaluación de la seguridad que se exponen en la publicación de Requisitos de seguridad relacionada con la disposición final de desechos radiactivos cerca de la superficie, y orientaciones sobre cómo llevar a cabo las evaluaciones de seguridad en lo que respecta a los repositorios cercanos a la superficie.

Esta Guía de seguridad fue elaborada en una serie de reuniones de consultores y de comités técnicos y fue revisada por el Comité Asesor sobre Normas de Seguridad de los Desechos (WASSAC) y la Comisión Asesora sobre Normas de Seguridad (ACSS), así como por los Estados Miembros.

El OIEA desea expresar su agradecimiento a todos aquellos que han contribuido a la redacción y revisión de este trabajo.

#### NOTA EDITORIAL

*Cuando se incluye un apéndice debe considerarse que forma parte integrante del documento y tiene igual validez que el texto principal. En cambio, los anexos, las notas de pie de página y las bibliografías se incluyen para proporcionar información adicional o para dar ejemplos prácticos que podrían ser de utilidad para el usuario.*

*En las Normas de seguridad se emplea el término “deberá(n)” (en inglés “shall”) cuando se enuncian requisitos, deberes y obligaciones. Se utiliza la forma “debería(n)” o “debe(n)” (en inglés “should”) para indicar recomendaciones de una opción deseable.*

*La versión inglesa es la versión autorizada del texto. El presente documento fue traducido por el Consejo de Seguridad Nuclear de España. El Organismo reconoce con agradecimiento el apoyo prestado.*

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
	Antecedentes (1.1–1.3) .....	1
	Objetivo (1.4) .....	2
	Alcance (1.5–1.6) .....	2
	Estructura (1.7) .....	3
2.	CONSIDERACIONES GENERALES PARA EVALUAR LA SEGURIDAD .....	3
	Requisitos y cuestiones de seguridad (2.1–2.7) .....	3
	Uso de las evaluaciones de seguridad (2.8–2.12) .....	5
	Método iterativo para evaluar la seguridad (2.13–2.17) .....	7
3.	DIRECTRICES GENERALES PARA EVALUAR LA SEGURIDAD ...	10
	Consideraciones generales (3.1–3.4) .....	10
	Definición de los objetivos (3.5–3.6) .....	11
	Requisitos de datos (3.7–3.15) .....	11
	Definición del sistema (3.16–3.26) .....	15
	Análisis de consecuencias (3.27–3.43) .....	19
	Presentación de los resultados de la evaluación de seguridad (3.44–3.50) .....	25
4.	GENERACIÓN DE CONFIANZA .....	27
	Introducción (4.1–4.2) .....	27
	Verificación, calibración y validación de modelos (4.3–4.6) .....	28
	Análogos naturales (4.7– 4.8) .....	29
	Garantía de calidad (4.9) .....	30
	Examen por homólogos de las evaluaciones de seguridad (4.10–4.11) .....	31
	Otras consideraciones (4.12–4.13) .....	31
	REFERENCIAS .....	33

COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y EXAMEN ..... 35

ÓRGANOS ASESORES PARA LA APROBACIÓN DE LAS  
NORMAS DE SEGURIDAD ..... 37

# 1. INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES

1.1. Los desechos radiactivos deberían gestionarse de conformidad con los principios de seguridad que indican las Nociones fundamentales de seguridad RADWASS [1]. En la Ref. [2] se describen los requisitos de seguridad que deberían cumplirse para la disposición final de los desechos en sistemas de almacenamiento ubicados cerca de la superficie. La capacidad del método de disposición final escogido para aislar los desechos del entorno humano debería estar en correspondencia con el peligro y el período de actividad de tales desechos. Su disposición final en sistemas de almacenamiento ubicados cerca de la superficie es una opción que se emplea para los desechos radiactivos que contienen radionucleidos de período corto, que decaerán hasta niveles insignificantes desde el punto de vista radiológico en un lapso de tiempo comprendido entre algunos decenios y algunos siglos, y concentraciones suficientemente bajas de radionucleidos de período largo [2, 3]. Los sistemas de almacenamiento ubicados cerca de la superficie se agrupan en dos categorías principales: 1) instalaciones que tienen las zonas de disposición final por encima (montículos, etc.) o por debajo (trincheras, hoyos, etc.) de la superficie original del suelo, y 2) instalaciones ubicadas en cavidades de rocas. En el primer caso la cubierta que cubre los desechos tiene por lo general varios metros de grosor, mientras que en el segundo la cubierta de roca que se halla sobre éstos puede tener hasta algunas decenas de metros de espesor.

1.2. La disposición final en sistemas de almacenamiento ubicados cerca de la superficie es una opción que se ha empleado en varios países, en algunos casos desde los años cuarenta, con una amplia variación en cuanto a emplazamientos, tipos y cantidades de desechos y diseño de la instalación. Con un diseño, una ubicación y una construcción adecuados, un sistema de almacenamiento ubicado cerca de la superficie ofrece un aislamiento seguro y rentable para ciertos desechos radiactivos. Su seguridad y la confianza del público en ella pueden aumentar mediante controles institucionales adecuados posteriores a su clausura (lo que incluye controles activos, tales como muestreos y control, vigilancia y trabajos de mantenimiento, y también controles pasivos tales como el control del uso de la tierra y el mantenimiento de registros) o dependen en parte de esos controles. De requerirse la implantación planificada de tales controles como parte del sistema de aislamiento de los repositorios ubicados cerca de la superficie, ésta debería ser objeto de un cuidadoso análisis. La duración de los controles necesarios para garantizar la seguridad dependerá de factores tales como características de los desechos, las cuestiones institucionales, aspectos económicos, las características del emplazamiento y diseño de la instalación.

Sin embargo, por lo general se considera que los controles institucionales activos para las instalaciones de almacenamiento cerca de la superficie pueden ser efectivos durante algunos cientos de años.

1.3. La evaluación de la seguridad es un procedimiento que sirve para valorar el comportamiento de una instalación de disposición final y, como un objetivo principal, su impacto radiológico potencial en la salud de los seres humanos y en el medio ambiente. En la evaluación de seguridad de los sistemas de almacenamiento ubicados cerca de la superficie se debería tener en cuenta tanto las consecuencias durante su explotación como en la fase posterior a su cierre. Las consecuencias radiológicas potenciales después del cierre pueden producirse como resultado de procesos graduales, como la degradación de las barreras, y también a causa de sucesos específicos que pueden afectar al aislamiento de los desechos. Se puede suponer que la posibilidad de intrusión humana no intencionada será insignificante mientras los controles institucionales activos resulten plenamente efectivos, pero podría aumentar después. La aceptación técnica de un repositorio dependerá en gran medida del inventario de desechos, de las características técnicas del repositorio y de la idoneidad del emplazamiento. Esto se debería juzgar sobre la base de los resultados de las evaluaciones de la seguridad, que deberían ofrecer una garantía razonable en cuanto a que el repositorio cumplirá con los objetivos de diseño, las normas de funcionamiento y los criterios de reglamentación. Éstos se especifican en las Normas de seguridad [2] y además se examinan en la presente guía y en otra Guía de seguridad conexas [4].

## OBJETIVO

1.4. El objetivo de esta Guía de seguridad es ofrecer recomendaciones sobre cómo cumplir los requisitos para evaluar la seguridad de repositorios ubicados cerca de la superficie. La Guía resume las consideraciones más importantes que hay que tener en cuenta al evaluar la seguridad de estos repositorios y recomienda los pasos que se deben seguir en tales evaluaciones.

## ALCANCE

1.5. Esta Guía de seguridad abarca la evaluación de la seguridad de los repositorios ubicados cerca de la superficie destinados a la disposición final de los desechos radiactivos en forma sólida. Incluye tanto la fase operacional como la posterior al cierre, pero enfatiza esta última, pues la evaluación de la fase operacional de los repositorios ubicados cerca de la superficie es similar a la que refiere a las

operaciones en otras instalaciones de gestión de desechos. Esta Guía de seguridad no abarca las evaluaciones de seguridad relativas a la distribución final geológica de residuos procedentes de la extracción y el tratamiento de minerales, ni de desechos resultantes de actividades de restauración que permanezcan en el lugar en que han sido generados.

1.6. Aunque los desechos radiactivos pueden contener componentes no radiactivos potencialmente nocivos, esta Guía de seguridad sólo contempla de forma explícita el peligro radiológico asociado a los desechos.

## ESTRUCTURA

1.7. Las orientaciones que se ofrecen incluyen recomendaciones sobre aspectos generales para evaluar la seguridad, con la la opción de disposición final cerca de la superficie (Sección 2) y directivas generales para las principales actividades que comprende una evaluación de seguridad (Sección 3). Además, se consideran las actividades necesarias para generar confianza y establecer las bases para obtener una garantía razonable de que la instalación de disposición final de desechos ha cumplido los criterios y normas de reglamentación (Sección 4).

## **2. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EVALUAR LA SEGURIDAD**

### REQUISITOS Y CUESTIONES DE SEGURIDAD

#### **Fase operacional**

2.1. Los requisitos que aparecen en la Ref. [2] plantean que se deberá optimizar la protección radiológica de las personas expuestas como resultado de las operaciones realizadas en el repositorio de desechos y que se mantendrá su exposición por debajo de los límites de dosis. En la Ref. [5] se explica en detalle la política de protección radiológica relacionada con la disposición final de desechos radiactivos.

2.2. El público puede también resultar expuesto a la radiación durante la fase operacional de un repositorio ubicado cerca de la superficie, aunque a niveles bajos, tanto de forma directa como a causa de las descargas de efluentes líquidos y gaseosos. Cualquier descarga al medio ambiente debería ser controlada y limitada de modo que

las exposiciones de los trabajadores y de los miembros del público sean tan bajas como pueda razonablemente alcanzarse, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales, y dentro de restricciones y límites apropiados contenidos en las Normas básicas de seguridad [6] y en la Ref. [5].

2.3. Además de tener en cuenta la exposición rutinaria de los trabajadores y de los miembros del público, también se requiere prestar la debida consideración a las exposiciones potenciales no habituales o accidentales. Éstas pudieran incluir, por ejemplo, un incendio que afecte a bultos de desechos o el daño que pueden sufrir éstos durante su manipulación en el emplazamiento. Los requisitos para controlar tales peligros se exponen en la Ref. [6].

### **Fase posterior al cierre**

2.4. El principal aspecto de la seguridad de los repositorios ubicados cerca de la superficie tras su cierre, es la posibilidad de que se produzcan exposiciones a la radiación y consecuencias ambientales a lo largo de períodos que puedan prolongarse hasta un futuro lejano. Por ejemplo, se puede suponer que pueden producirse algunos efectos, debido a la lexicación gradual de los radionucleidos en el agua subterránea y su posterior migración al medio ambiente y transferencia a los seres humanos. Se necesita, por tanto, que las evaluaciones proyecten el comportamiento del emplazamiento y la instalación por períodos del orden de cientos o incluso miles de años. Las dificultades asociadas a la proyección del comportamiento del emplazamiento y del repositorio para estos períodos (párrs. 3.34 y 3.38) son lo que distingue a las evaluaciones posteriores al cierre de las más típicas de la seguridad operacional. En las evaluaciones posteriores al cierre también se deberían tener presente otros tipos de exposiciones que pueden ocurrir sólo si suceden ciertos sucesos. Ejemplos de tales sucesos son el quebrantamiento de las barreras de aislamiento y condiciones atmosféricas poco usuales. El propósito de las evaluaciones posteriores al cierre es obtener una garantía razonable de que la instalación de disposición final proveerá un nivel de seguridad suficiente, más que pronosticar su comportamiento futuro de cualquier modo concreto.

2.5. Los sucesos inducidos por las actividades de los seres humanos también pueden provocar exposiciones, pero éstos son difíciles de prever. Una o varias de las siguientes medidas pueden resultar útiles para limitar las consecuencias asociadas con las actividades de los seres humanos: limitar la concentración de algunos radionucleidos específicos; mantener el control institucional; o establecer ciertos criterios de diseño tales como que el repositorio tenga una profundidad mínima.



2.6. Los requisitos de seguridad en el período posterior al cierre se presentan en la Ref. [2]. Los criterios numéricos se plantean en función de las restricciones de la dosis de radiación o del riesgo, y se propone aplicarlos a la evaluación tanto de las liberaciones graduales o normales como de las debidas a los procesos disruptivos descritos en los párrs. 2.4 y 2.5.

2.7. La decisión final de considerar aceptable un sistema de repositorio se debería basar en la garantía razonable de que se ha cumplido con los requisitos de seguridad [2]. Los enfoques prácticos para garantizar de forma razonable que se han cumplido los requisitos de reglamentación se basan en la evaluación de la seguridad e incluyen la aplicación de reconocidos principios técnicos y de gestión, tales como la defensa en profundidad, un sólido diseño técnico, la garantía de calidad, la cultura de seguridad y los controles institucionales.

## USO DE LAS EVALUACIONES DE SEGURIDAD

2.8. Las evaluaciones de seguridad tienen propósitos diferentes en las diversas etapas del desarrollo, explotación y cierre de un repositorio. En una etapa temprana, las evaluaciones de la seguridad se deberían utilizar para determinar la viabilidad de diversos conceptos básicos de disposición final, para orientar las investigaciones en relación con los emplazamientos y para ayudar en las decisiones iniciales. Su uso tiene mayor importancia en las etapas que siguen a la elaboración del concepto inicial y a la selección del emplazamiento. Entonces será necesario desarrollar evaluaciones que contribuyan a la optimización del sistema y al diseño de la instalación mediante la comparación de varias combinaciones de tipos de bultos de desechos, módulos de disposición final y medidas de gestión y cierre del emplazamiento.

2.9. La suficiencia y solidez de la evaluación de la seguridad dependerán a su vez de la extensión y calidad de los datos, inclusive toda la información pertinente sobre la caracterización de los desechos, la caracterización del emplazamiento, el comportamiento de los bultos de desechos y la función y el comportamiento de otras barreras técnicas. Por lo tanto, se requiere una estrecha coordinación entre la evaluación de la seguridad y los programas de adquisición de datos, ya que la evaluación de la seguridad es un medio valioso para identificar y determinar las prioridades en relación con el trabajo de investigación y desarrollo de apoyo.

2.10. Una función fundamental de la evaluación de la seguridad está en la solicitud de la licencia y en el proceso de su aprobación. Esto incluye tanto aspectos radiológicos como ambientales. Es posible que de tales evaluaciones de seguridad con fines de reglamentación se exijan en las diversas etapas del proceso de concesión de

licencias, incluida la aprobación para construir, explotar y cerrar el repositorio, y siempre que haya cambios significativos en el estado del repositorio. Por tanto, es necesario realizar y actualizar la evaluación de la seguridad en todas las etapas significativas de desarrollo del repositorio utilizando datos y modelos apropiados.

2.11. Los resultados de las evaluaciones de seguridad constituyen un aspecto importante para confirmar la aceptación del inventario y/o los niveles de concentración de radionucleidos específicos presentes en los desechos [7], y ofrecen una vía para elaborar los criterios de aceptación de desechos para repositorios ubicados cerca de la superficie. Los niveles aceptables de inventario dependen generalmente del análisis de los escenarios de liberación de radionucleidos al medio ambiente y de su transferencia a lo largo de las vías de exposición ambientales. También es necesario considerar los escenarios de intrusión humana, que a menudo determinan los niveles aceptables de radionucleidos de período largo en el repositorio. Sin embargo, cabe señalar que la presencia de grandes cantidades de radionucleidos de período corto puede constituir problemas potenciales tanto para la seguridad operacional como para la posterior al cierre, y esto se debería tener en cuenta al evaluar la seguridad y al fijar los límites de concentración y de inventario (véase el párr. 2.5). Por otra parte, también se deberían utilizar las evaluaciones de seguridad para determinar qué niveles de sustancias químicas contenidas en los desechos podrían ocasionar la degradación del sistema de barreras.

2.12. La evaluación de la seguridad y las condiciones asociadas a la licencia determinan en gran medida algunos de los requisitos y controles más significativos que se deberían aplicar al repositorio. Por ejemplo, al establecer los requisitos para aceptar desechos, la evaluación de seguridad se debería usar para determinar los requisitos aplicables a los bultos de desechos y los niveles de inventario, tanto con respecto a cada uno de los bultos como a todo el emplazamiento. La evaluación de seguridad también se debería emplear para valorar las posibles vías de exposición y para establecer y revisar el programa de control ambiental del emplazamiento y la zona circundante. La evaluación de seguridad se debería basar en el diseño realmente aplicado o propuesto para la instalación de disposición final y en el modo de gestión del emplazamiento en la fase operacional y en el período de control institucional activo, de haberse establecido, después de su cierre [2].

## MÉTODO ITERATIVO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD

### Consideraciones generales

2.13. La Fig. 1 presenta un esquema donde se refleja el enfoque recomendado para evaluar la seguridad. Éste implica las siguientes actividades que por lo general son iterativas o se superponen:

- definición de los objetivos de la evaluación, los requisitos de seguridad y los criterios sobre el comportamiento;
- adquisición de información y descripción del sistema de disposición final, inclusive la forma de los desechos, las características del emplazamiento y las estructuras de diseño técnico;
- determinación de características, sucesos y procesos (FEPs) que podrían influir en el comportamiento a largo plazo;
- elaboración y ensayo de modelos conceptuales y matemáticos del comportamiento del sistema y sus componentes;
- determinación y descripción de escenarios de interés;
- determinación de las vías potenciales de transferencia de radionucleidos desde el almacenamiento hasta los seres humanos y el medio ambiente;
- ejecución de la evaluación mediante la aplicación de modelos conceptuales y matemáticos;
- valoración de la solidez de la evaluación;
- comparación de los resultados de la evaluación con los requisitos de seguridad asignados; y
- otras consideraciones.

2.14. Un aspecto fundamental al efectuar la evaluación de seguridad del repositorio es lograr que exista confianza en los resultados de los modelos. Un modelo conceptual del sistema de disposición final cerca de la superficie constituye una descripción de los elementos generales presentes, así como de sus características detalladas. Entre las características fundamentales figuran las que determinan la importancia relativa de posibles rutas de transferencia de radionucleidos, conocidas como vías de exposición. Se espera que con el tiempo, los fenómenos naturales y las actividades de los seres humanos alteren las características del sistema. A las descripciones de los sucesos futuros se les denomina escenarios. Los escenarios tienen que ver con los fenómenos naturales y con los cambios súbitos o graduales en las condiciones que pueden alterar el comportamiento del repositorio con el tiempo. Para los sistemas de almacenamiento ubicados cerca de la superficie, estas situaciones futuras generalmente se evalúan mediante la elaboración de modelos del comportamiento de la instalación en condiciones supuestas [8, 9]. La evaluación de seguridad

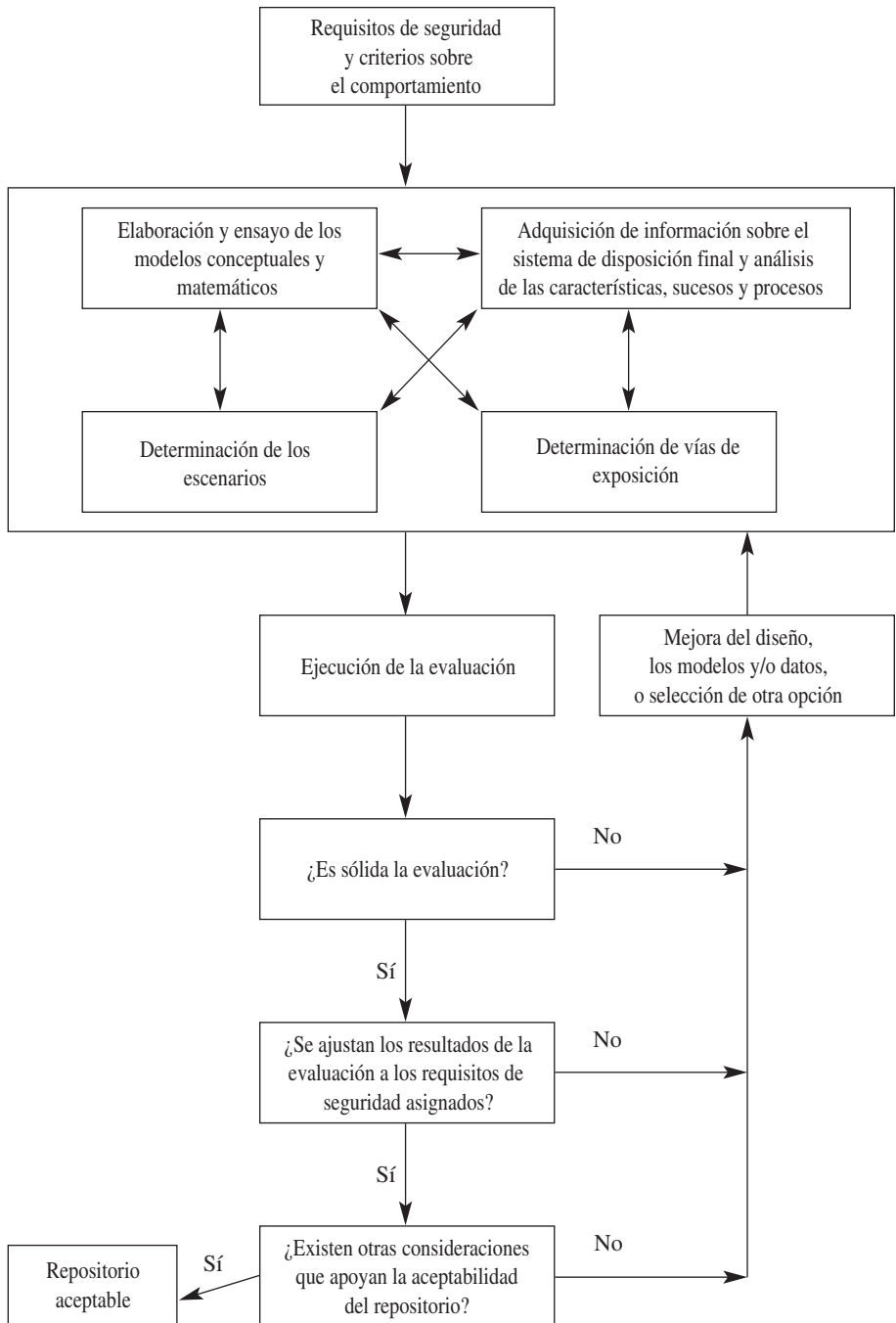


FIG. 1. Método iterativo para evaluar la seguridad.

debería ser sólida, es decir, tolerar la existencia de incertidumbres. Se deberían comparar los resultados de la evaluación, incluida la determinación de las incertidumbres, con los objetivos de diseño y los criterios de reglamentación, teniendo en cuenta otras líneas de razonamiento y aspectos que contribuyan a la aceptabilidad del repositorio.

2.15. La caracterización del sistema y la descripción de las vías de exposición exigen la adquisición de datos apropiados por medio de experimentos de laboratorio o de campo. El análisis de escenarios requiere identificar y definir los fenómenos que pudieran iniciar o incrementar la liberación de radionucleidos contenidos en el repositorio y dar como resultado la exposición de los seres humanos. A lo largo del proceso iterativo de evaluación de la seguridad, quizás resulte necesario recopilar datos adicionales sobre aquellos parámetros identificados como importantes para la seguridad del repositorio.

### **Proceso de evaluación de la seguridad**

2.16. El primer paso del proceso se basa en la realización de cálculos aproximados para evaluar el modelo conceptual propuesto y centrarse en los mecanismos de liberación, en los radionucleidos y en las vías de exposición de interés, sobre los que se requieren conocimientos adicionales. Estos cálculos aproximados sólo requieren un limitado número de datos sobre las características de los bultos de desechos, así como también la determinación de las vías principales de exposición. Dichos datos se pueden obtener, por ejemplo, mediante búsquedas bibliográficas, especificaciones de los materiales, estudios de laboratorio y de análogos naturales, controles pre-operacionales de la zona circundante, investigaciones preliminares en el emplazamiento, y la caracterización de los desechos. El proceso debería continuar con la adquisición de datos adicionales, por ejemplo, mediante investigaciones de laboratorio y de campo y modelos adecuados, hasta que se logre una base de confianza suficiente en la capacidad del repositorio para cumplir con los requisitos de seguridad asignados y se acepte éste, o hasta que se determine que el concepto estudiado es inaceptable.

2.17. Durante este proceso, se deberían determinar los escenarios de interés [9, 10]. La determinación de la importancia de cada escenario para evaluar el repositorio y el emplazamiento puede requerir que se ejecuten estudios de apoyo y se recopilen datos adicionales, además de iteraciones adicionales del proceso de evaluación de seguridad. Tales estudios y análisis también pueden ser útiles para reducir las incertidumbres al intentar cuantificar los sucesos y fenómenos que conducen a la liberación y transferencia de radionucleidos. Aún cuando las evaluaciones de la seguridad sean

sólidas, por ejemplo, porque se basen en suposiciones conservadoras claramente definadas, y se aprueben como tales por el organismo regulador, es inevitable que exista mayor incertidumbre en el caso de las previsiones que abarquen mayores espacios temporales. Por consiguiente, tal vez sea necesario prever un período de comparación de los resultados de la vigilancia sobre el terreno con los valores de los parámetros usados en los análisis. Por tanto, se considera que resulta útil hacer extensiva esta vigilancia al período de control activo (o a parte de éste) y a menudo es un requisito de reglamentación. En tal caso, el programa de vigilancia posterior al cierre debería atender a las necesidades indicadas en el proceso de evaluación de la seguridad.

### **3. DIRECTRICES GENERALES PARA EVALUAR LA SEGURIDAD**

#### CONSIDERACIONES GENERALES

3.1. La evaluación de la seguridad exige desarrollar argumentos tanto cualitativos como cuantitativos que dependen de los resultados de la caracterización del emplazamiento, de las características de los desechos, de los datos de diseño y de los modelos matemáticos. A su vez, los resultados de las evaluaciones proporcionan la información requerida para tomar decisiones a lo largo del desarrollo de los sistemas de disposición final. Es necesario que las hipótesis y decisiones en que se basa la evaluación de seguridad sean sólidas y fáciles de comunicar a un amplio espectro de grupos interesados para lograr confianza en los resultados de dicha evaluación de seguridad.

3.2. En las evaluaciones de seguridad, la validez de los resultados de los modelos matemáticos debería ser considerada con respecto a la incertidumbre de los datos usados para los modelos, las hipótesis dentro de las diferentes partes de los modelos, las hipótesis acerca de las interrelaciones entre los diversos componentes del modelo global y las incertidumbres asociadas a la evolución a largo plazo de los sistemas de disposición final. Todas estas incertidumbres se deberían investigar mediante análisis de sensibilidad y de incertidumbre complementados por otros medios para generar confianza (véase la Sección 4) y, cuando resulte apropiado, en opinión de los expertos.

3.3. La utilización de las opiniones de expertos y de otras actividades de evaluación de la seguridad con vistas a generar las bases para lograr una garantía razonable de que un sistema de disposición final cerca de la superficie ha cumplido con los

requisitos de reglamentación, debería comenzar lo más temprano posible dentro del proceso de desarrollo del sistema (véase el párr. 2.8).

3.4. La Sección 3 ofrece unas directrices generales que posibilitan al explotador y al regulador crear la infraestructura necesaria para evaluar la seguridad y para elaborar directrices específicas para las diversas actividades que comprende la evaluación de la seguridad de los repositorios ubicados cerca de la superficie, según las recomendaciones internacionales y los requisitos de reglamentación nacionales.

## DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS

3.5. La evaluación de seguridad desempeña un papel fundamental en el desarrollo de un repositorio ubicado cerca de la superficie, y se puede utilizar para múltiples propósitos (véase la Sección 2). Dado que tales usos diversos pueden requerir niveles de detalle diferentes en el análisis e implicar diferentes necesidades de datos, o la presentación de los resultados a diferentes interesados, tales como especialistas técnicos y personas no conocedoras, se debería definir con claridad el objetivo de la evaluación de la seguridad según la aplicación de que se trate.

3.6. Un producto de las evaluaciones son los resultados numéricos que se emplean para comparar el comportamiento proyectado del sistema con los criterios establecidos. Esto requiere una adecuada definición y, sobre la base de datos de interés, un examen minucioso de todas las características, sucesos y procesos (FEPs) importantes. El desarrollo de un conjunto de modelos ayuda a entender el comportamiento de una instalación de disposición final y su interacción con el entorno humano y natural. La evaluación cuantitativa de los efectos requiere modelos matemáticos apoyados por el uso de códigos de computadora. Los modelos se simplifican hasta cierto punto, según el propósito para el que se elaboren. Es necesario analizar con cuidado la complejidad de cada modelo, en vista del hecho de que el modelo más complejo y detallado no necesariamente es el mejor para un fin específico.

## REQUISITOS DE DATOS

### **Tipos de datos**

3.7. La cantidad y calidad de los datos requeridos dependerán del propósito de la evaluación. Es probable que una evaluación preliminar requiera sólo modelos simples y el empleo de datos ya disponibles. Estos resultados normalmente se usan sólo como guía para estudios futuros [9]. En este caso, sólo se requiere una apreciación limitada

de las incertidumbres asociadas con los resultados. Mientras concluye el diseño y el proceso de autorización de ciertas etapas del desarrollo del repositorio, el explotador debería respaldar la solicitud de autorización con una evaluación basada en cantidades probablemente elevadas de datos con suficiente garantía de calidad, que describan el emplazamiento, el diseño y las características de los desechos. Aunque es necesario establecer y seguir un programa y sus correspondientes procedimientos para asegurar la calidad tan pronto como sea posible en el proceso, se reconoce que quizás no resulte necesario disponer de datos en cantidad y calidad parecidas en una etapa temprana de definición del diseño y del alcance del repositorio. El explotador debería planear con sumo cuidado el programa de adquisición de datos para garantizar que se logren los objetivos deseados de una manera eficaz en función de los costos.

3.8. Se requerirán datos de varias fuentes, con niveles de detalle y valores de incertidumbre que dependen del objetivo de cada evaluación de seguridad. Por lo general se necesitan datos sobre:

- a) características de los desechos (composición de radionucleidos en función del tiempo, inventario total, características químicas y físicas, inclusive tasas de generación de gases, parámetros de transferencia de masa en condiciones de disposición final);
- b) características de los contenedores (comportamiento químico y mecánico en condiciones de disposición final);
- c) características del repositorio (dimensiones, material de relleno, material estructural, características de ingeniería);
- d) características del emplazamiento (geología, hidrogeología, propiedades geoquímicas, condiciones climáticas);
- e) características de la biosfera (hábitat natural, condiciones atmosféricas, condiciones acuáticas); y
- f) características socioeconómicas y demográficas (utilización del territorio, hábitos alimentarios, distribución de la población).

### **Recopilación y cotejo de datos disponibles**

3.9. Las necesidades iniciales de datos preliminares se satisfacen normalmente mediante búsquedas bibliográficas, la recopilación de especificaciones sobre materiales, e investigaciones concretas muy limitadas sobre el diseño o el emplazamiento. Estos datos se pueden usar para hacer análisis preliminares y desarrollar diseños igualmente preliminares. El modelo conceptual básico del sistema de disposición final ubicado cerca de la superficie se elaborará sobre la base de estos datos. En esta etapa se puede efectuar una evaluación preliminar de la seguridad para



comprobar el potencial con que cuenta el sistema para comportarse de forma adecuada. En esta etapa de evaluación de seguridad resultan adecuados los modelos sencillos, ya que por lo general se cuenta con pocos datos de un nivel de detalle limitado.

### **Programa de adquisición de datos**

3.10. Las actividades de adquisición de datos deberían estar encaminadas a definir las necesidades de datos definidos, sobre la base del diseño conceptual, el conocimiento actual del emplazamiento y los resultados de la evaluación preliminar sobre la seguridad del sistema de disposición final ubicado cerca de la superficie. Tomando como base el diseño preliminar, la información disponible sobre las características del lugar y la evaluación preliminar, es posible comenzar a determinar el nivel de detalle requerido para garantizar una base de seguridad, a tono con los requisitos de reglamentación. En el programa de adquisición de datos es necesario establecer relaciones directas entre la evaluación de seguridad y la recopilación de datos sobre la caracterización del emplazamiento. Por ejemplo, si las fracturas intervienen en las previsiones sobre el transporte de aguas subterráneas, será necesario contar con detalles adecuados del sistema de fractura, tales como transmisividad, conectividad y orientación. Si la evaluación preliminar de la seguridad indica que, para el inventario de radionucleidos esperado, la retención por el medio geológico no contribuye mucho a reducir las concentraciones de contaminantes en el medio receptor, no se deberían hacer muchos esfuerzos en su análisis ulterior. Si la estabilidad de la instalación a largo plazo depende de las propiedades mecánicas del bulto de desechos, de la capacidad para resistir cargas con que cuenta el medio hospedante o de la actividad sísmica, las actividades de adquisición de datos deberían poner énfasis en obtener esta información.

3.11. Los resultados de la evaluación de seguridad pueden indicar otras necesidades. Los análisis de sensibilidad e incertidumbre pueden mostrar que los resultados de la evaluación de seguridad son muy sensibles a un parámetro dado. Esto podría indicar que se requieren nuevos estudios que puedan ofrecer una determinación más precisa y exacta de ese parámetro o de cambios en el diseño o en los modelos. La adquisición de datos adicionales podría continuar para, por ejemplo, generar más confianza en los resultados de la evaluación.

### **Datos del muestreo y control preoperacional**

3.12. Se deberían definir las condiciones ambientales para un repositorio ubicado cerca de la superficie como línea de referencia para medir el comportamiento durante la explotación y para el período de muestreo y control posterior al cierre.

Normalmente se efectúan mediciones del fondo radiactivo y algunos otros parámetros “indicadores”. Éstas pueden incluir datos vinculados a la hidrología de la superficie, la química del agua subterránea o el clima local. En el muestreo y control preoperacional también se pueden recopilar datos importantes para evaluar la seguridad y establecer un marco de referencia con el cual se puedan probar los modelos.

3.13. Los parámetros del emplazamiento que se prevé que varíen con el tiempo, tales como los utilizados para calibrar los modelos de flujo hidrológico o los modelos de transporte atmosférico empleados para evaluar la seguridad, se deberían medir con cierta regularidad y periodicidad para poder estimar su variabilidad. En el caso de algunos parámetros, puede resultar importante determinar los extremos de su margen de variación. Esto podría acarrear un período de medición prolongado. Además, dado que a menudo hay demora entre la recopilación de los datos del emplazamiento, su análisis y la preparación de la documentación de solicitud de la licencia y su revisión por parte del organismo regulador, se deberían hacer planes para continuar las mediciones de los parámetros que varían con el tiempo, a lo largo de este período cuando resulte apropiado, para así aumentar la fiabilidad de la información disponible.

### **Datos de muestreo y control de la fase operacional y posterior al cierre**

3.14. Los datos de muestreo y control de la fase operacional pueden indicar diferencias con respecto a las condiciones previstas. En este caso, es necesario considerar cambios en los procedimientos operacionales u otras acciones correctoras. Se deberían indicar las causas que dan lugar a estas diferencias y emplear dicho conocimiento para mejorar la comprensión del sistema. Además se debería revisar el sistema de muestreo y control. Cuando se observen desviaciones significativas de las condiciones previstas, se requerirá una nueva valoración de la seguridad para confirmar que siguen siendo válidos los objetivos de diseño.

3.15. El muestreo y control con posterioridad al cierre se debería emplear para verificar la ausencia de consecuencias radiológicas inaceptables [2] y para confirmar algunos otros aspectos del comportamiento del sistema. Por ejemplo, se puede controlar la infiltración a través de las cubiertas de ingeniería y comparar con valores de diseño para ayudar en la validación de los modelos usados. Sin embargo, los programas nacionales por lo general no planean usar los datos del muestreo y control posteriores al cierre para confirmar las dosis estimadas. Esto se debe a que las consecuencias estimadas son por lo general pequeñas y se estima que ocurrirían en un futuro lejano.

## DEFINICIÓN DEL SISTEMA

3.16. La evaluación de la seguridad de un sistema de disposición final ubicado cerca de la superficie se basa en un enfoque multidisciplinario para definir el sistema y en el análisis sistemático de posibles conjuntos de sucesos y procesos que pueden afectar a su comportamiento [11]. La descripción del sistema de disposición final requiere información sobre las características de los desechos, el diseño del sistema y las propiedades del emplazamiento, y constituye la base para desarrollar un modelo conceptual del sistema de disposición final de desechos, los escenarios de su posible funcionamiento y la evaluación de las vías potenciales para la migración de los radionucleidos.

### **Elaboración del modelo conceptual**

3.17. El objetivo final de la elaboración del modelo conceptual es ofrecer un marco que permita tomar decisiones sobre el comportamiento del sistema de disposición final en su conjunto. De ser posible, el modelo debería tener suficiente nivel de detalle de forma tal que se puedan elaborar modelos matemáticos para describir el funcionamiento del sistema y sus componentes, con el fin de ofrecer estimaciones del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo. Se requerirá diferente nivel de detalle en diferentes etapas, a medida que se realice la evaluación iterativa de seguridad y sea necesario adoptar a la larga una decisión sobre la concesión de la licencia. El modelo debería ser tan simple como sea posible, pero debería incluir detalles suficientes para representar adecuadamente el funcionamiento del sistema a fin de asegurar que se cumplan los requisitos de seguridad.

3.18. La elaboración de un modelo conceptual debería incluir los siguientes pasos:

- a) Definición y caracterización de los desechos desde el punto de vista del inventario, la forma de los desechos y del bulto. Esta información debería tener un nivel de detalle suficiente para permitir la elaboración de modelos adecuados de las liberaciones de radionucleidos, es decir, el término fuente. Como mínimo, se debería ofrecer información que sirva de base para justificar un modelo simple de liberación, como por ejemplo, suponer que el ritmo de liberación es constante o que cada año se libera una proporción fija. El modelo conceptual del término fuente puede ser perfeccionado por iteración a medida que se obtenga más información sobre los desechos y sobre el sistema de disposición final.
- b) Caracterización del emplazamiento por medio de los parámetros necesarios, inclusive geología, hidrogeología, geoquímica, tectónica y sismicidad, procesos superficiales, meteorología, ecología y distribución de poblaciones locales y sus prácticas sociales y económicas. Se requiere esta información

TABLA I. FENÓMENOS RELACIONADOS CON LA EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD DE LOS REPOSITORIOS UBICADOS CERCA DE LA SUPERFICIE<sup>a</sup> (modificado a partir de la Ref. [8])

---

PROCESOS Y SUCESOS NATURALES

*Intrusión biológica*

Animales

Plantas

*Fallas/sismicidad*

*Procesos meteorológicos y cambios climáticos*

*Interacciones de fluidos*

Erosión

Inundaciones

Fluctuaciones en la capa freática

Corriente de aguas subterráneas

Agua de filtración

*Deterioro a causa de las condiciones ambientales*

Deterioro con el tiempo

Congelación/deshielo

Humidificación/secado

CARACTERÍSTICAS Y PROCESOS DE LOS DESECHOS Y DEL REPOSITORIO

Obstrucción del sistema de drenaje

Ubicación incorrecta de los desechos

Fallo de la cubierta superior

Presencia/generación de compuestos químicos que pueden perturbar el comportamiento de las barreras, por ejemplo, agentes complejantes

Generación de gas

Compactación de desechos y suelos

Interacción de los desechos y el suelo

ACTIVIDADES REALIZADAS POR EL HOMBRE

Actividades de construcción

Agricultura

Explotación de aguas subterráneas

Asentamientos humanos

Salvamento

Reutilización de los materiales sometidos a disposición final

Arqueología

Otras actividades industriales

---

<sup>a</sup> Esta lista tiene fines ilustrativos y no debe considerarse completa (véase el párr. 3.21).

sobre el emplazamiento para definir las vías de exposición y los receptores y, de ese modo, desarrollar un modelo conceptual físico, químico y biológico del mismo.

- c) Especificación del diseño de la instalación. Antes de iniciar la evaluación, es necesario especificar el diseño en función del material usado y los componentes del sistema. Los cambios en el diseño, ya sea sobre la base de la evaluación de seguridad o por cualquier otra causa, pueden requerir que se actualice la evaluación de seguridad.
- d) El mayor conocimiento del emplazamiento podría indicar la existencia de uno o más modelos conceptuales alternativos factibles, que necesiten ser analizados. En los casos en que se hayan analizado y descartado modelos sustitutos, es preciso documentarlo claramente y, cuando resulte apropiado, definirlos en la evaluación de seguridad.

### **Elaboración del modelo matemático**

3.19. Elaborar el modelo matemático a partir del modelo conceptual es un paso importante en que el modelo conceptual se expresa cuantitativamente mediante ecuaciones matemáticas en un modelo de cálculo. Los procedimientos generales que se utilizan para desarrollar tales modelos están bien establecidos y aceptados, y para ciertos aspectos fundamentales se han desarrollado modelos matemáticos predictivos que varían tanto en nivel de detalle como en complejidad. Estos modelos se deberían utilizar para describir el comportamiento de procesos individuales, subsistemas y el sistema completo. En la transición de los modelos conceptuales a los modelos matemáticos, y finalmente a su implantación usando técnicas de cálculo, se pueden introducir errores debido al uso de simplificaciones, aproximaciones, a las hipótesis de los modelos o a los métodos matemáticos utilizados. Por tanto, los modelos utilizados para evaluar el comportamiento deberían ser probados y actualizados no solamente sobre la base de la comparación de sus resultados con datos empíricos (Sección 4), sino también en el proceso de su elaboración en función del examen por homólogos, de las comparaciones entre códigos, las comparaciones con otras evaluaciones del comportamiento, los resultados de experimentos llevados a cabo para probar aspectos específicos de los modelos numéricos y conceptuales, y las comparaciones con los casos para los que existen soluciones analíticas.

### **Análisis de características, sucesos y procesos (FEPs)**

3.20. Se debería realizar un examen sistemático de características, sucesos y procesos (FEPs) potenciales para determinar los factores que pudieran influir en la seguridad a largo plazo de un repositorio y así ayudar a desarrollar un modelo apropiado para la evaluación de su seguridad. El modelo de evaluación de seguridad puede ser

construido mediante el análisis de escenarios o bien mediante alguna técnica alternativa como el muestreo del espacio de los parámetros.

3.21. El primer paso para determinar cuál de los muchos fenómenos posibles es de interés para evaluar la seguridad es establecer una lista de comprobación tal como la que se presenta en el Cuadro 1. Más recientemente, en el ámbito internacional se ha recopilado información sobre FEPs por parte de grupos de trabajo de la Agencia para Energía Nuclear de la OCDE. Al desarrollar una lista adecuada de escenarios se debería tener en cuenta lo siguiente:

- 1) procesos y sucesos de origen natural;
- 2) procesos atribuibles a los propios desechos o a las características del repositorio ubicado cerca de la superficie; y
- 3) actividades de los seres humanos.

### **Análisis de escenarios**

3.22. Los escenarios dependen de las características del medio ambiente y del sistema de repositorio, y de los sucesos y procesos que pudieran originar la liberación inicial de radionucleidos de los desechos o influir en su destino y transporte hacia los seres humanos y al medio ambiente. La elección de escenarios y de modelos conceptuales asociados apropiados debería ser un tema de especial atención tanto para el explotador como para el regulador, pues esto puede tener una gran influencia en el posterior análisis del sistema de disposición final de desechos. En algunos países los escenarios los especifican los reguladores, aunque el explotador también puede optar por considerar otros. En otros países, si el explotador selecciona los escenarios, está obligado a justificar tal selección al regulador.

3.23. Los escenarios de evolución normal se basan, por lo general, en la extrapolación de las condiciones existentes al futuro, incorporando los cambios que se espera que ocurran con el paso del tiempo. Como puede haber un margen de evoluciones posibles, se debería desarrollar un conjunto de escenarios de evolución normal para asegurar que la evolución real esté dentro del margen. Los sucesos que es menos probable que ocurran pueden introducir perturbaciones importantes en el sistema y exigir la elaboración de escenarios distintos. Es posible que algunos de estos escenarios puedan ser considerados usando los mismos modelos pero con parámetros revisados. Otros escenarios pueden requerir modelos nuevos. El diseño propuesto se basará probablemente en el escenario de evolución normal, pero puede necesitar modificaciones para considerar los resultados de la evaluación basada en otros escenarios.

3.24. Se debería considerar y documentar una amplia diversidad de escenarios para desarrollar la comprensión más completa posible del sistema. Sin embargo, cuando existan opciones, se deberían seleccionar para su detallada evaluación tanto los escenarios que es más probable que ocurran como los que son relativamente poco probables pero que pudieran tener consecuencias importantes. La selección de los escenarios para su evaluación detallada debería estar muy bien justificada en la documentación de la evaluación de seguridad y, cuando resulte apropiado, se deberían dar pruebas que la respalden. Esta selección tiene como fin garantizar el empleo eficaz de recursos de evaluación significativos y que el diseño del repositorio se desarrolle de modo que proteja mejor la salud de los seres humanos y el medio ambiente.

3.25. La elaboración de escenarios debería permitir que la evaluación de la seguridad se centrara sistemáticamente en los fenómenos y condiciones importantes asociados con el comportamiento del sistema de disposición final. Los escenarios se deberían desarrollar de forma tal que se abarquen, de forma adecuada, los aspectos de la seguridad posterior al cierre del repositorio ubicado cerca de la superficie. Se pueden usar los criterios de experto, el análisis de árboles de sucesos y fallos [8] y otras técnicas para seleccionar los escenarios importantes. Se deberían documentar el proceso seguido, las decisiones adoptadas y los factores considerados.

### **Determinación de las vías de exposición**

3.26. A partir de un conjunto amplio y completo de vías potenciales de exposición, se deberían determinar, mediante valoración comparativa, las vías importantes respecto al material radiactivo liberado del repositorio al medio ambiente, tanto para condiciones no perturbadas (normales) como perturbadas (anormales). La experiencia muestra que sólo unas pocas vías suelen ser importantes para el comportamiento no perturbado de una instalación de disposición final cerca de la superficie. Entre ellas se incluyen las aguas subterráneas, el suelo, las plantas terrestres, los animales terrestres, las aguas superficiales, los animales acuáticos y las vías atmosféricas. Para el comportamiento perturbado, la principal adición a esta lista es el material radiactivo que pueda ser suspendido y la exposición directa.

## **ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS**

### **Cálculos con modelos**

3.27. Una vez identificados todos los escenarios y vías importantes para los seres humanos, la etapa que sigue en el proceso de evaluación de la seguridad es analizar

las consecuencias. Esto implica el desarrollo y la aplicación de modelos de transporte y exposición para evaluar el impacto potencial de las liberaciones del repositorio o de sus efectos perturbadores en los seres humanos y el medio ambiente.

3.28. El enfoque modular puede ser muy útil para elaborar el modelo de transporte y liberación potencial de radionucleidos a través de vías ambientales seleccionadas de exposición a los seres humanos. Esto garantizará que se pueda disponer de los submodelos individuales para su revisión, con el fin de ayudar a entender la forma en que se determinaron las dosis. El modelo por lo general constará de los siguientes submodelos específicos: infiltración y lixiviación, generación de gas, transporte en el campo próximo dentro y cerca de las celdas de disposición final, transporte de gas y de aguas subterráneas, transporte de aguas superficiales, transporte atmosférico, absorción por plantas y animales, y dosis para los seres humanos. Un enfoque modular también permite flexibilidad además de ayudar a concentrar el esfuerzo en las partes del sistema que necesitan modelos complejos para garantizar que los resultados sean técnicamente aceptables. Los beneficios de este enfoque pueden ser importantes cuando se emplean modelos complejos para dar mayor seguridad de que el emplazamiento de disposición final y el repositorio se comportarán de modo aceptable.

3.29. El término fuente usado en los modelos debería ser representativo de las liberaciones potenciales de radionucleidos de diversas formas de desechos en el margen de condiciones ambientales especificadas, y se debería tener en cuenta la degradación de las barreras de ingeniería, como sistemas de cobertura y estructuras de hormigón. Los modelos iniciales serán presumiblemente simples, pero a medida que se desarrolla el conocimiento del sistema, quizás resulte necesario emplear modelos más detallados para garantizar que el sistema esté representado en forma adecuada. Sin embargo, los modelos deberían ser lo suficientemente simples para ser compatibles y coherentes con los datos de que se dispone; de otro modo, el resultado será una mayor incertidumbre y no una mejor precisión. Se debería tener en cuenta el criterio de expertos para garantizar un equilibrio adecuado entre el uso de modelos simples con los datos existentes y el de modelos más detallados que pueden requerir algunos datos que no se obtienen con facilidad. Esto no impide el uso de modelos más complejos de algunas partes del sistema para mejorar el entendimiento de los fenómenos involucrados. Entre los ejemplos de tales modelos complejos se incluye el empleo de códigos de aguas subterráneas de elementos finitos para valorar las condiciones hidrológicas de contorno y la variabilidad temporal de los niveles de agua, si el muestreo y control de las aguas subterráneas o sus características físicas sugieren la necesidad de entender los cambios en el sistema a un nivel más complejo.



3.30. En la elaboración de modelos de evaluación de la seguridad se debería incorporar desde el principio un grado razonable de conservadurismo que pueda resistir el análisis científico. Un enfoque de modelos sencillos quizás resulte más eficiente, fácil de entender y justificado. Las hipótesis se deberían formular sobre la base de los datos disponibles y del conocimiento del sistema o de sistemas parecidos, y seleccionarse de modo que no se subestimen la liberación y el transporte de radionucleidos o, en caso necesario, la exposición de un intruso inadvertido. Como la aceptación de los resultados puede ser el aspecto más difícil de una evaluación, cualquier enfoque para facilitar su aceptación constituirá un beneficio a largo plazo. Un enfoque que equilibre la simplicidad, el conservadurismo y el realismo probablemente es el mejor punto de partida para las evaluaciones.

3.31. El modelo elegido debería ser consistente con el objetivo de la evaluación, fácil de utilizar (considerando la complejidad del sistema), y uno para el que se puedan obtener datos. El modelo debería ser apropiado para la aplicación, la exactitud de los algoritmos debería ser demostrable, sus hipótesis deberían ser razonables y los datos de entrada deberían ser representativos.

3.32. El enfoque de elaboración de modelos seleccionado debería ser documentado de forma clara y completa junto con los otros aspectos considerados a medida que se desarrolla. La documentación debería asegurar un registro rastreable de todas las hipótesis y decisiones adoptadas durante el desarrollo y la aplicación del enfoque de elaboración de modelos elegido. En los documentos se deberían exponer las razones para no tener en cuenta cualquier otro modelo sustitutivo analizado en el proceso de desarrollo del enfoque de elaboración de modelos elegido.

## **Incertidumbre**

### *Consideraciones generales*

3.33. La incertidumbre es inherente a cualquier evaluación de seguridad. Los análisis de sensibilidad y de incertidumbre tienen el importante objetivo de aumentar la comprensión y disminuir, cuando sea posible, la incertidumbre en algunos de los resultados de la evaluación de seguridad al dirigir la atención a una mejor definición de los parámetros que más afectan a los resultados y su incertidumbre. Los análisis de sensibilidad y de incertidumbre están estrechamente relacionados. El análisis de sensibilidad se debería usar para definir los parámetros, componentes del sistema o procesos que producen efectos importantes en el comportamiento previsto del sistema de disposición final. La definición de los componentes sensibles de los modelos conceptuales y de los escenarios importantes se hace generalmente aplicando la variación sistemática de los parámetros. Cada escenario puede requerir su propia

distribución de los parámetros. A menudo se utilizan valores extremos para el caso esperado, con el fin de investigar el comportamiento del sistema ante una incertidumbre. También se pueden emplear técnicas estadísticas para explorar el margen completo de variación previsto en los parámetros [8, 9].

3.34. Hay que tener en cuenta dos causas generales de incertidumbre al evaluar la seguridad de la disposición final cerca de la superficie. Una es el grado en que el modelo representa al sistema real. Esta incertidumbre se asocia a los datos de entrada en los modelos, y es inherente a la descripción del sistema de disposición final, las características del emplazamiento, las características técnicas del repositorio y su interacción con el medio ambiente, y la propia elaboración de los modelos. La otra causa de incertidumbre se refiere al carácter imprevisible de las acciones de los seres humanos en el futuro y de la evolución de la instalación y su entorno durante períodos de tiempo prolongados.

3.35. La primera causa de incertidumbre se debería reducir al mejorar la calidad de la caracterización del emplazamiento y de los datos sobre los desechos, los detalles del diseño de la instalación, el modelo conceptual y la selección de los escenarios. El objetivo debería ser estimar y reducir esta incertidumbre a un nivel considerado aceptable o poco importante en el contexto del comportamiento del repositorio ubicado cerca de la superficie. La segunda causa de incertidumbre se debería analizar para ver sus efectos probables en el futuro. Los resultados de tal análisis pueden ofrecer una garantía razonable de que el sistema de disposición final será seguro aunque los resultados del modelo puedan ser inciertos. De este modo, la gran importancia de los análisis de sensibilidad e incertidumbre para las decisiones de los reguladores radica en emplearlos como herramienta para valorar el cumplimiento de los requisitos de seguridad en presencia de incertidumbres. Es razonable pensar que si se puede corroborar por algún otro medio el cumplimiento de las normas de seguridad, por ejemplo, usando un modelo demostradamente conservador, no se requiere el análisis de incertidumbres.

3.36. Una causa importante de incertidumbre en la elaboración de escenarios dimana del posible olvido de un escenario importante. El examen por homólogos de los escenarios escogidos puede ayudar y se debería usar para reducir tal incertidumbre.

3.37. Igualmente, la incertidumbre intrínseca en la elaboración de modelos conceptuales y numéricos del emplazamiento se debería evaluar mediante un examen por homólogos. La tendencia general es utilizar modelos simples para facilitar la explicación y lograr eficiencia informática. La incertidumbre asociada a la simplificación presente en la construcción de los modelos numéricos y conceptuales se

puede a menudo determinar por estudios de elaboración de modelos y mediante la recopilación de datos adicionales. Una vez más, el enfoque modular y el análisis cuidadoso de los resultados informáticos intermedios pueden propiciar una comprensión más detallada del sistema. Esto a su vez puede producir una reducción global en la incertidumbre del modelo. Sin embargo, un modelo exageradamente complejo exige mayores cantidades de datos, y estos datos pueden ser poco fiables y provocar mayor incertidumbre en los resultados, o simplemente pueden no ser asequibles.

3.38. La previsión de sucesos en el futuro produce un grado de incertidumbre inherente. Parte de esta incertidumbre puede ser desestimada tras un cuidadoso examen de los escenarios extremos o de los resultados de las evaluaciones probabilísticas, pero sólo si tiene poco efecto en el comportamiento del repositorio. Otras incertidumbres, particularmente las asociadas a las acciones de los seres humanos dictadas por condiciones socioeconómicas futuras o por cambios importantes en las condiciones climáticas, pueden tener un efecto importante en la exposición de los seres humanos en el futuro, pero no son susceptibles de proyecciones cuantificadas. Aunque en tales circunstancias sólo se pueden hacer deducciones cualitativas, aún puede ser posible indicar los múltiples factores que garantizan la seguridad y comentar para cada factor si continuará o no siendo efectivo a lo largo del tiempo ante la incertidumbre creciente. La evaluación de seguridad se basa en un modelo conceptual cuyo propósito principal es ofrecer un marco que permita efectuar el análisis. Cuando se puedan definir modelos matemáticos adecuados y existan datos, la evaluación puede ser cuantitativa. Si éste no fuera el caso, entonces se debería hacer la evaluación cualitativa. Esto no invalida el proceso de evaluación pero lo hace más dependiente de las decisiones cualitativas de los expertos, apoyadas cuando sea posible por los cálculos. Sin embargo, dentro de este marco es necesario documentar cuidadosamente la base de las decisiones para su examen como parte de la evaluación de seguridad. También se debería tener cuidado con respecto a la fiabilidad de la información disponible que se refleja en el grado de detalle de los cálculos de la evaluación y en la interpretación de los resultados, que debería cambiar, por tanto, a tono con el lapso de tiempo en el futuro que se esté considerando (véanse los párrs. 2.9 y 3.45).

#### *Análisis de sensibilidad*

3.39. Se debería analizar el sistema para determinar cómo y hasta qué punto el comportamiento previsto para la instalación de disposición final cerca de la superficie depende del modelo conceptual usado, de los escenarios aplicables al modelo y de la variación en los parámetros utilizados para describir el sistema como dato de entrada para el modelo. Si los resultados son sensibles a las condiciones iniciales y extremas,

entonces quizás sea necesario generar datos más amplios, incluidas nuevas mediciones del emplazamiento. En el proceso se debería analizar la sensibilidad del modelo para los diferentes escenarios y vías de exposición que se pueden razonablemente esperar. Si se determina que la evaluación es sensible a estos parámetros, debería considerarse la posibilidad de reevaluarlos.

3.40. La variación de un solo parámetro o de una combinación de algunos parámetros se debería considerar como un punto de partida del análisis de sensibilidad para evaluar la seguridad de los repositorios ubicados cerca de la superficie. También se debería prestar la debida consideración a la variación, extrema, pero razonable de algunos parámetros, porque esto puede cambiar la importancia relativa de diferentes vías de exposición y hacer que el modelo no siga siendo aplicable.

3.41. En esta tarea se pueden usar diferentes métodos para los diversos valores de los parámetros usados, pero el análisis se debería estructurar con cuidado para garantizar que las combinaciones escogidas por el código de computadora no sean imposibles o físicamente poco realistas. Además, se debería estructurar el resultado del ejercicio a los efectos de preservar la información necesaria para determinar las combinaciones y definir los parámetros sensibles.

3.42. El análisis de sensibilidad debería guiar el proceso iterativo usado para mejorar la formulación del modelo, elaborar los escenarios y recopilar datos adicionales. Se deberían emplear los resultados del análisis de sensibilidad para indicar si es necesario mejorar las características de diseño con el fin de mejorar el comportamiento del sistema.

#### *Análisis de la incertidumbre*

3.43. La incertidumbre de a los parámetros es el tipo que se debería tratar mediante el análisis de incertidumbres. Para ello la atención se debería centrar en los parámetros que, según el análisis de sensibilidad, resultan importantes para definir el resultado de la evaluación de seguridad. Los métodos comúnmente utilizados guardan relación con las técnicas de análisis de sensibilidad de la variación de una sola variable o de variables múltiples utilizadas con el fin de crear condiciones extremas en relación con el comportamiento previsto del repositorio ubicado cerca de la superficie. Los análisis simples de condiciones extremas deberían producir por lo general información adecuada sobre el margen de comportamiento del sistema, pero se debería señalar que, como los sistemas son tan complejos, los valores extremos por cada parámetro no necesariamente producen el comportamiento límite del sistema. El análisis de Monte Carlo también puede ofrecer distribuciones de los resultados esperados sobre la base del análisis estadístico de los cálculos de variación de los

parámetros de entrada. En las distribuciones de los parámetros de entrada para el análisis de Monte Carlo y en la correlación entre los mismos, será preciso contar con el criterio de expertos, lo que debería hacerse constar de manera formal y documentada, según proceda.

## PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE SEGURIDAD

### **Consideraciones generales**

3.44. La presentación de los resultados de la evaluación de seguridad como compendio de toda la información pertinente (véase el párr. 3.46) es importante para su comprensión y aceptación. Estos resultados se usarán para varios propósitos. En el proceso de toma de decisiones se emplean principalmente para compararlos con las normas de reglamentación aplicables al repositorio cerca de la superficie. La necesidad de lograr un consenso en cuanto a que el sistema es una opción de disposición final segura para los desechos designados durante largo tiempo en el futuro añade una dimensión importante a la evaluación de seguridad y a la presentación de sus resultados.

3.45. Dado que los resultados de la evaluación de seguridad proporcionan normalmente una base para establecer requisitos sobre el diseño del sistema y la aceptación de los desechos, es importante ofrecer información sobre el comportamiento de los componentes del sistema, particularmente a los diseñadores del sistema y finalmente al órgano regulador, para ilustrar los niveles de protección proporcionados por las diversas partes del sistema del repositorio. De hecho, los resultados de los modelos usados en las evaluaciones de seguridad son indicadores de lo que podría ocurrir en ciertas condiciones que pudieran existir en el futuro y no provisiones reales. Es de suma importancia hacer entender esto a los diferentes grupos interesados, así como la complejidad de un sistema de disposición final cerca de la superficie compuesto por partes naturales y tecnológicas, tal como denotan los modelos de repositorios ubicados cerca de la superficie. Por tanto, la presentación de los resultados se debería preparar con sumo cuidado.

### **Comparación con las normas de reglamentación**

3.46. Los resultados de la evaluación de seguridad se utilizan de manera más general para demostrar el cumplimiento de los requisitos de reglamentación (véase la Sección 2). Con este fin, se requieren los siguientes elementos para apoyar el resultado de la evaluación de seguridad:

- una descripción clara del emplazamiento, del diseño seleccionado y del inventario de desechos que se someterá a disposición final;
- un examen completo del modelo conceptual y de la base física del modelo;
- un examen de los modelos sustititivos considerados y las razones para no tener en cuenta tales modelos;
- la base para seleccionar o desarrollar escenarios y vías de exposición;
- la documentación de las hipótesis y de las justificaciones de las simplificaciones utilizadas;
- un resumen de datos de entrada de los modelos y códigos;
- los datos reales usados, sus fuentes y justificaciones; y
- la interpretación de los resultados.

La documentación de los resultados de la evaluación de seguridad debería incluir información sobre la incertidumbre y las conclusiones de cualquier análisis de sensibilidad e incertidumbre realizado.

### **Comportamiento de los componentes del sistema**

3.47. Los resultados de una evaluación de seguridad se deberían presentar de modo que demuestren el comportamiento de cada uno de los componentes del sistema. Este es un ejercicio valioso que se hace fácilmente si se adopta un enfoque modular para la elaboración de los modelos. Mostrar el comportamiento esperado de cada componente y la mejora iterativa del diseño de los componentes o del conocimiento del funcionamiento esperado del componente, para garantizar su eficacia, aumenta el nivel de confianza en el comportamiento del sistema completo.

### **Consecuencias radiológicas futuras**

3.48. Los resultados de la evaluación de seguridad se deberían presentar de modo que se permita considerar las variaciones en las consecuencias proyectadas con el transcurso del tiempo. Este enfoque puede ser particularmente útil dado que las proyecciones son sólo indicaciones del comportamiento del repositorio ubicado cerca de la superficie, y mostrar la evolución de las consecuencias generadas por el sistema a través del tiempo puede contribuir a dar credibilidad a los resultados de la evaluación de seguridad. De todos modos, puede ser útil mostrar la forma en que el efecto de la desintegración radiactiva hace que, en general, disminuyan las consecuencias con el tiempo. También se debería aplicar dicho enfoque cuando se comparan las consecuencias radiológicas a largo plazo con los niveles de radiación natural, por ejemplo, para demostrar en forma relativa el efecto de disposición final de radionucleidos de período largo en un repositorio ubicado cerca de la superficie.

## **Nivel de presentación**

3.49. A veces se requieren modelos complejos para representar las complejidades del sistema de disposición final ubicado cerca de la superficie. La presentación y la explicación de estos modelos pueden resultar difíciles, en especial cuando se trata con el gran público. Además, el proceso de concesión de licencias para los repositorios ubicados cerca de la superficie puede constituir la base de procedimientos legales. Dado que discutir los resultados de modelos complejos en un contexto judicial puede ser muy difícil, se deberían hacer esfuerzos para complementar el enfoque de elaboración de modelos complejos con un modelo menos complejo para fines explicativos.

3.50. Si bien la simplificación puede originar la pérdida de detalles, se puede demostrar la equivalencia de los métodos complejos y simples si se puede demostrar así mismo que esa simplificación ha centrado realmente la evaluación de seguridad en los factores críticos vinculados con la seguridad del sistema. Esto se denomina a menudo elaboración de modelos sólidos del sistema. Se debería demostrar que las evaluaciones sólidas brindan buenas estimaciones del comportamiento del sistema usando modelos simples y un mínimo de datos. También se debería demostrar que engloban el comportamiento del sistema. Para que la simplificación sea satisfactoria, por lo general es preciso entender muy bien el sistema de disposición final cerca de la superficie y su comportamiento. Siempre que se pueda demostrar este entendimiento, los modelos sólidos y simples y los métodos de evaluación de seguridad basados en datos cualitativos resultarán más fáciles de explicar al público que los modelos complejos que requieren grandes cantidades de datos.

## **4. GENERACIÓN DE CONFIANZA**

### **INTRODUCCIÓN**

4.1. Las evaluaciones de seguridad sirven de base para adoptar decisiones racionales y técnicamente sólidas en el proceso de establecer repositorios de desechos. Como se examinó en las secciones precedentes, las evaluaciones de seguridad intervienen en las diferentes etapas del proceso. Las evaluaciones preliminares se pueden usar para seleccionar el emplazamiento. Las evaluaciones de seguridad deberían ofrecer datos de entrada para el diseño del repositorio y permitir la definición de los requisitos para la aceptación de los desechos por cada repositorio

en concreto. Finalmente, la concesión de licencias para un repositorio se debería basar, al menos en parte, en el resultado de la evaluación de seguridad.

4.2. Científicos, reguladores, responsables de la toma de decisiones y otros grupos interesados deberían tener confianza en la información, los criterios y los resultados proporcionados por las evaluaciones de seguridad. En esta sección se examina lo que se puede hacer para garantizar que los resultados de las evaluaciones de seguridad tengan un alto grado de confianza. Las actividades que contribuyen a crear confianza incluyen: 1) verificación, calibración y, de ser posible, validación de los modelos; 2) investigación de análogos naturales significativos; 3) garantía de calidad; y 4) examen por homólogos.

## VERIFICACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS

4.3. Las evaluaciones de seguridad se basan en modelos del repositorio y de su entorno natural. Estos modelos se utilizan para simular la evolución del sistema y para ofrecer indicadores de las consecuencias de varios escenarios. El esfuerzo de elaboración de modelos abarca el desarrollo de modelos conceptuales y matemáticos y los correspondientes códigos de computadora u otros métodos de cálculo. La confianza en los resultados de la elaboración de modelos depende de dos preguntas. Primera, ¿resuelve el método de cálculo de forma precisa las ecuaciones matemáticas que constituyen el modelo? Para responder a esta pregunta se utiliza el proceso de verificación. Segunda, ¿reproduce el modelo con suficiente exactitud los resultados experimentales o prácticos? Para responder a esta pregunta se aplican la calibración y la validación usando conjuntos de datos diferentes.

### **Verificación**

4.4. La verificación del método de cálculo se logra resolviendo problemas de prueba diseñados para demostrar que las ecuaciones del modelo matemático se resuelven satisfactoriamente. Mediante los problemas de prueba y mediante el intercambio de experiencias sobre el uso diversificado del método es posible alcanzar un alto nivel de confianza en la corrección del cálculo y en que las ecuaciones se codifican y resuelven de forma correcta. Otra solución eficaz es también la comparación de los resultados de diferentes métodos que resuelven el mismo problema y utilizan los mismos parámetros de entrada. Por tanto, es factible verificar los métodos de cálculo, y esto se debería utilizar para generar confianza en las evaluaciones de seguridad. Las intercomparaciones internacionales (véanse los párrs. 4.9, 4.10 y 4.11) y los exámenes por homólogos constituyen una ayuda importante para obtener la aceptación pública.



## **Calibración**

4.5. La calibración tiene por objeto reducir la incertidumbre en los modelos numéricos y conceptuales y en los parámetros, y se realiza comparando las previsiones del modelo o submodelo con las observaciones prácticas y las mediciones experimentales. Por tanto, la calibración es un procedimiento específico de un emplazamiento, por medio del cual se emplea un conjunto de datos de entrada específicos del lugar para comparar previsiones y observaciones en ese emplazamiento. En la práctica, si se puede calibrar con éxito un modelo para diversas condiciones concretas del emplazamiento, puede haber mayor nivel de confianza en la capacidad del modelo para representar esos aspectos del comportamiento del sistema y, por tanto, para estimar sus efectos en situaciones en que no pueden ser medidos. Sin embargo, una dificultad que a menudo se observa en el proceso de calibración es que diferentes modelos conceptuales y sus conjuntos de datos de entrada asociados producen resultados que muestran un acuerdo igualmente bueno con los datos observados. Esto limita la reducción de la incertidumbre que se puede lograr.

## **Validación**

4.6. En la medida en que sea posible se debería mostrar que los resultados de los modelos son válidos, es decir, se corresponden con los datos empíricos obtenidos en una situación real. En contraste con la calibración, que es un proceso de ajuste del modelo específico de un emplazamiento, la validación tiene que ver más con la obtención de resultados verosímiles en una variedad de emplazamientos diferentes o en una amplia diversidad de condiciones. Aunque no es posible validar los modelos para la evolución a largo plazo de un emplazamiento específico en las escalas de tiempo correspondientes, se puede lograr una validación limitada con los datos de estudios de análogos naturales o de análogos climáticos. También puede ser útil comparar los resultados de los modelos con observaciones referentes al comportamiento de ciertos componentes del sistema de disposición final, por ejemplo, conjuntos de datos obtenidos en experimentos in situ, o con mediciones ejecutadas durante la caracterización del emplazamiento y la fase operacional del repositorio.

## **ANÁLOGOS NATURALES**

4.7. Los análogos naturales se han estudiado de modo que los resultados de las observaciones en la naturaleza se puedan comparar con el comportamiento de los componentes del repositorio o con procesos que se espera ocurran en un sistema de disposición final [12]. La analogía entre los análogos naturales y un repositorio de desechos no es perfecta, pues en la mayoría de los casos sólo se pueden observar los

resultados finales de los procesos naturales, y existe gran incertidumbre acerca de las condiciones iniciales y de su evolución a través del tiempo.

4.8. Hasta la fecha, ha resultado difícil utilizar estudios sobre análogos naturales, en forma cuantitativa, para calibrar o validar modelos o para suministrar valores para los parámetros usados en estos modelos. Sin embargo, algunos procesos significativos tales como el desgaste de materiales de embalaje, la resuspensión a causa del viento, el transporte de radionucleidos por aguas subterráneas o la transferencia de los elementos del suelo a la biota, se podrían investigar en análogos naturales apropiados, con un nivel de detalle adecuado y con suficiente control de las condiciones extremas para permitir probar el modelo. Por tanto, a pesar de algunas reservas, se deberían utilizar análogos naturales para generar confianza en varios procesos y materiales usados para los sistemas de disposición final. El uso de la información derivada de los estudios de análogos naturales puede ser particularmente útil para aumentar la confianza en la evaluación por parte de los responsables de la toma de decisiones y del público. Se debería utilizar información de este tipo para crear confianza en la seguridad de la disposición final cerca de la superficie.

## GARANTÍA DE CALIDAD

4.9. La garantía de calidad consiste en un conjunto sistemático y planeado de procedimientos para documentar los diversos pasos de un proceso y para aportar confianza en que los resultados del proceso son de buena calidad. Los procedimientos para garantizar y controlar la calidad (GC/CC) son procedimientos que han sido o están siendo introducidos en muchas esferas de la gestión de desechos radiactivos [13]. La necesidad de generar confianza en los resultados de las evaluaciones de seguridad exige que se aplique un procedimiento de garantía de la calidad en los diferentes elementos de la evaluación desde la etapa más temprana posible, y en particular en la adquisición de datos, las actividades de diseño, y el desarrollo de modelos y métodos de cálculo. El método para asegurar la calidad debería incorporar una infraestructura en la que se puedan ejecutar y documentar las actividades de evaluación de la seguridad, confirmando que se cumple con el procedimiento. De este modo se podrá demostrar que se han empleado fuentes de información rastreables y fiables. Como resultado de ello se incrementará la confianza en los resultados de la evaluación de seguridad.

## EXAMEN POR HOMÓLOGOS DE LAS EVALUACIONES DE SEGURIDAD

4.10. En las actividades científicas, la confianza en la validez de los resultados depende en grado sumo del resultado del proceso de examen por homólogos. El trabajo científico y los resultados relacionados con la evaluación de seguridad se deberían publicar en la literatura científica de libre acceso, de modo que estén disponibles para el análisis detallado de otros expertos que trabajen en el mismo campo, así como también de cualquier persona interesada en el tema.

4.11. El proceso de examen por homólogos para el trabajo que constituya la base de las evaluaciones de seguridad debería incluir otras formas que no sean sólo el examen típico por homólogos de los resultados de programas y publicaciones científicas. Los programas nacionales de gestión de desechos radiactivos deberían adoptar disposiciones para efectuar el examen técnico de las actividades importantes. El organismo regulador debería desarrollar una capacidad independiente para revisar las evaluaciones de seguridad. En algunos casos el explotador del repositorio o las autoridades competentes organizan revisiones críticas por órganos independientes. En tales revisiones se puede también utilizar los conocimientos y experiencia de especialistas en ciencias sociales o naturales y ellas pueden ser eficaces para elevar el nivel de confianza en la evaluación.

## OTRAS CONSIDERACIONES

4.12. Como la evaluación de la seguridad de los repositorios ubicados cerca de la superficie entraña sucesos hipotéticos futuros y sus consecuencias, no se espera que las proyecciones que se hagan se conviertan en realidad. El único objetivo realista es ofrecer un grado razonable de confianza en la seguridad, basado en la evaluación de toda evidencia apropiada, incluidos el criterio de profesionales y los modelos matemáticos, que demuestre que el repositorio funcionará dentro de límites aceptables.

4.13. Se debería tener presente que la aplicación de un programa para el desarrollo de un repositorio ubicado cerca de la superficie depende de que científicos, reguladores, y responsables de la toma de decisiones confíen en su seguridad, y también de la aceptación del público. Para obtener la confianza del público, el proceso de desarrollo de un repositorio de desechos debería incorporar diversas características dirigidas a lograr apertura y transparencia, la participación del público e información efectiva y de amplia difusión. Una evaluación de seguridad bien diseñada utilizando técnicas sólidas y simples de evaluación del comportamiento,

aplicadas a un modelo conceptual adecuadamente fundamentado, puede ayudar a promover el entendimiento del público y la aceptación del sistema de disposición final cerca de la superficie.

## REFERENCIAS

- [1] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Principios para la gestión de desechos radiactivos, Colección Seguridad N° 111-F, OIEA, Viena (1996).
- [2] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Colección de Normas de Seguridad N° WS-R-1, OIEA, Viena (1999).
- [3] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Classification of Radioactive Waste, Colección Seguridad N° 111-G-1.1, OIEA, Viena (1994).
- [4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Siting of Near Surface Disposal Facilities, Colección Seguridad N° 111-G-3.1, OIEA, Viena (1994).
- [5] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste, Publication No. 77, Elsevier, Oxford (1997).
- [6] AGENCIA DE ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA SALUD Y LA ALIMENTACION, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, Colección Seguridad N° 115, OIEA, Viena (1997).
- [7] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, Shallow Land Disposal of Radioactive Waste: Reference Levels for the Acceptance of Long-lived Radionuclides, OCDE, París (1987).
- [8] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Safety Analysis Methodologies for Radioactive Waste Repositories in Shallow Ground, Colección Seguridad N° 64, OIEA, Viena (1984).
- [9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Performance Assessment for Underground Radioactive Waste Disposal Systems, Colección Seguridad N° 68, OIEA, Viena (1985).
- [10] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, Systematic Approaches to Scenario Development, OCDE, París (1992).
- [11] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, Review of Safety Assessment Methods, OCDE, París (1991).
- [12] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Natural Analogues in Performance Assessments for the Disposal of Long Lived Radioactive Wastes, Colección de Informes Técnicos N° 304, OIEA, Viena (1989).
- [13] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Quality Assurance for Radioactive Waste Packages, Colección de Informes Técnicos N° 376, OIEA, Viena (1995).

## COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y EXAMEN

Agalèdes, P.	Département d'évaluation de sûreté, Institut de protection et de sûreté nucléaire, Francia
Allan, C.	Atomic Energy of Canada, Canadá
Ando, Y.	Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Japón
Arens, G.	Oficina de Protección Radiológica, Alemania
Baekelandt, L.	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, Bélgica
Barescut, J.-C.	Institut de protection et de sûreté nucléaire, Francia
Berczi, K.	ETV-ERÖTERV Power Engineering & Contracting Co., Hungría
Besnus, F.	Département d'évaluation de sûreté, Institut de protection et de sûreté nucléaire, Francia
Boissonneau, J.P.	Département d'évaluation de sûreté, Institut de protection et de sûreté nucléaire, Francia
Bosser, R.	Direction de la sûreté des installations nucléaires, Francia
Bragg, K.	Atomic Energy Control Board, Canadá
Carboneras, P.	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A., España
Carlsson, J.	Nuclear Fuel Cycle and Waste Management Company, Suecia
Cooper, J.	National Radiological Protection Board, Reino Unido
Dlouhy, Z.	Radioactive Waste Management and Environmental Protection Consultant Services, República Checa
Duncan, A.	Environment Agency, Reino Unido
Escalier des Orres, P.	Département d'évaluation de sûreté, Institut de protection et de sûreté nucléaire, Francia
Gera, F.	Departamento de Medio Ambiente y Geoingeniería, ISMES S.P.A., Italia
Grimwood, P.	British Nuclear Fuels plc, Reino Unido
Gruhlke, J.	Environmental Protection Agency, Estados Unidos de América
Kawakami, Y.	Instituto Japonés de Investigaciones sobre la Energía Atómica, Japón
Kocher, D.	Oak Ridge National Laboratory, Estados Unidos de América
López, C.R.	Consejo de Seguridad Nuclear, España
Maloney, C.	Atomic Energy Control Board, Canadá

Mobbs, S.	National Radiological Protection Board, Reino Unido
Narayan, P.	Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas, India
Norrby, S.	Cuerpo de Inspectores de Energía Nucleoeléctrica de Suecia, Suecia
Pescatore, C.	Agencia para la Energía Nuclear/OCDE
Pinner, A.	British Nuclear Fuels Limited plc, Reino Unido
Raimbault, P.	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Francia
Regnier, E.	Department of Energy, Estados Unidos de América
Ruokola, E.	Centro Finlandés de Seguridad Radiológica y Nuclear, Finlandia
Schaller, K.H.	Comisión Europea
Snihs, J.-O.	Swedish Radiation Protection Institute, Suecia
Starmer, J.	ERM Program Management Company, Estados Unidos de América
Stearn, S.	Her Majesty's Inspectorate of Pollution, Reino Unido
Suárez Mahou, E.	Consejo de Seguridad Nuclear, España
Sugier, A.	Institut de protection et de sûreté nucléaire, Francia
Van Dorp, F.	National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Suiza
Vovk, I. F.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Yamamoto, H.	Instituto Japonés de Investigaciones sobre la Energía Atómica, Japón
Zurkinden, A.	Cuerpo de Inspectores Federal Suizo de Seguridad Nuclear, Suiza

## ÓRGANOS ASESORES PARA LA APROBACIÓN DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD

### Comité Asesor sobre Normas de Seguridad de los Desechos

*Alemania:* Von Dobschütz, P.; *Argentina:* Siraky, G.; *Canadá:* Ferch, R.; *China:* Luo, S.; *España:* Gil López, E.; *Estados Unidos de América:* Huizenga, D.; *Federación de Rusia:* Poliakov, A.; *Francia:* Brigaud, O.; *Japón:* Kuwabara, Y.; *México:* Ortiz Magana, R.; *Reino Unido:* Brown, S.; *República de Corea:* Park, S.; *Sudáfrica:* Metcalf, P. (Presidente); *Suecia:* Norrby, S.; *OCDE/AEN:* Riotte, H.; *OIEA:* Delattre, D. (Coordinador).

### Comisión Asesora sobre Normas de Seguridad

*Alemania:* Hennenhöfer, G., Wendling, R.D.; *Argentina:* Beninson, D.; *Australia:* Lokan, K., Burns, P.; *Canadá:* Bishop, A. (Presidente), Duncan, R.M.; *China:* Huang, Q., Zhao, C.; *España:* Alonso, A., Trueba, P.; *Eslovaquia:* Lipár, M., Misák, J.; *Estados Unidos de América:* Travers, W.D., Callan, L.J., Taylor, J.M.; *Francia:* Lacoste, A.-C., Asty, M.; *Japón:* Sumita, K., Sato, K.; *Reino Unido:* Williams, L.G., Harbison, S.A.; *República de Corea:* Lim, Y.K.; *Suecia:* Holm, L.-E.; *Suiza:* Prêtre, S.; *AEN/OCDE:* Frescura, G.; *CIPR:* Valentin, J.; *OIEA:* Karbassioun, A. (Coordinador).