

Almacenamiento de residuos Metodologías de análisis del comportamiento de sistemas



RESUMEN

La actividad humana, en sus múltiples formas, conlleva, en muchos casos, la generación de una serie de subproductos o residuos potencialmente peligrosos para el hombre y el medio ambiente. La gestión segura de éstos constituye un reto pendiente para la sociedad beneficiada de su generación. Una de las opciones seguidas para tal fin es su almacenamiento geológico. Este artículo presenta la metodología de análisis seguida para este tipo de instalaciones de almacenamiento. Se toma como referencia la metodología seguida para el caso particular de los almacenamientos de residuos radiactivos, si bien, como tal metodología, se hace extensiva a cualquier tipo de residuo, teniendo en cuenta las particularidades de cada caso.

PEDRO PRADO HERRERO

*Licenciado en Ciencias Geológicas.
Representante español en el grupo de la
NEA/OECD-PSAC
Investigador (CIEMAT)*

INTRODUCCION

De todos los factores capaces de modificar el entorno y su evolución natural, la actividad humana, en sus múltiples facetas, es, sin duda, la más importante. Esta capacidad del hombre de influir en el medio ha seguido una evolución exponencial en las últimas décadas. El desarrollo industrial, las nuevas tecnologías y la in-

Palabras clave: Medio ambiente, almacenamientos geológicos, gestión de residuos.

infraestructura de apoyo asociada conllevan la ocupación de nuevos espacios en los que inducen alteraciones de diferente tipo y magnitud, según los casos. Tales cambios presentan la característica de ser retroactivos e influyen, por tanto, en el hombre y sus modos de hacer. Quizá la conjunción de ambos factores sea la razón de esa conciencia social preocupada por la conservación del medio y la minimización del impacto.

Este contexto define un marco socio-económico por el cual toda actividad emprendida debe contar con una evaluación previa de sus posibles consecuencias para el hombre y el medio ambiente. Su viabilidad dependerá de los resultados de dicho estudio y del binomio coste-beneficio, el cual deberá incluir aquellos costes devengados por las medidas correctoras y/o mitigadoras, si así lo demandase dicho estudio.

Uno de los aspectos a considerar en estas evaluaciones lo constituyen los subproductos o residuos generados a partir de dichas actividades. En algunos casos su potencial peligrosidad para el hombre y el entorno puede llegar a constituir un punto crítico dentro del estudio, más aún si su actividad se mantiene durante dilatados periodos de tiempo. Su gestión supone un reto pendiente para aquella sociedad beneficiada de su generación, no debiendo, en ningún caso, suponer un legado para las generaciones futuras.

Este artículo se centra en los análisis de seguridad de los sistemas de almacenamiento geológico de los residuos, tomando como referencia las metodologías utilizadas para el caso de residuos radiactivos. Aunque estos últimos presentan ciertas características particulares, la metodología es independiente del tipo de residuo y, por tanto, extensiva a cualquiera de ellos.

LA GESTIÓN DE RESIDUOS. UN RETO PENDIENTE

La diversidad de residuos generados demanda diferentes tipos de gestión, dependiendo de las características particulares de cada uno de ellos. Su clasificación puede basarse en diferentes criterios (características físicas, químicas, tóxicas, etc.), de acuerdo con los objetivos particulares del caso. Un criterio de clasificación puede definirse mediante el tiempo de actividad como productos tóxicos y, por tanto, potencialmente peligrosos. De acuerdo con este último, podemos diferenciar aquellos

residuos con peligrosidad limitada en el tiempo de aquellos potencialmente peligrosos durante largos periodos de tiempo.

Por analogía con los residuos radiactivos, este artículo se referirá en lo sucesivo a aquellos residuos tóxicos capaces de derivar en un impacto contra el hombre y el medio ambiente a lo largo de dilatados periodos de tiempo. De modo similar nos referiremos al «almacenamiento geológico de los residuos» como opción más viable y segura de las planteadas para los residuos radiactivos.

En definitiva, se trata de abordar el estudio de consecuencias (impacto) de un almacenamiento geológico de residuos en un marco temporal amplio. Para ello deberemos enfrentarnos al estudio de un sistema natural (sistema físico abierto) en el cual los diferentes subsistemas y variables implicados varían, o pueden hacerlo, a lo largo del espacio y del tiempo. Ello se traduce en incertidumbres en los posibles estados futuros del sistema y, por tanto, en los resultados.

¿Cómo abordar un estudio de tales características?

METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS

En la evaluación de la seguridad de los sistemas de almacenamiento geológico de los residuos radiactivos se está siguiendo una aproximación basada en el análisis del comporta-

El desarrollo industrial, las nuevas tecnologías y la infraestructura de apoyo, asociadas conllevan la ocupación de nuevos espacios en los que inducen alteraciones de diferente tipo y magnitud.

miento global del sistema. Como tal debe entenderse la instalación de almacenamiento propiamente dicha y el medio físico circundante en el cual la primera puede dejar sentir su influencia. La complejidad del sistema a estudiar se resuelve mediante la clasificación de éste en subsistemas acoplados, con objeto de facilitar su análisis.

Esta filosofía de trabajo, sin embargo, no es exclusiva de los residuos radiactivos, por lo que nada impide su extensión a cualquier otro tipo de residuos, tales como los industriales. De estos últimos, aquellos con toxicidad potencial dilatada en el tiempo presentan una mayor similitud con los radiactivos. Para aquellos de actividad limitada a tiempos más cortos, la metodología sigue siendo aplicable con las consideraciones espacio-temporales propias del caso.

El sistema de almacenamiento geológico

El almacenamiento geológico de los residuos consiste en su colocación dentro de una instalación excavada en el subsuelo en una formación geológica seleccionada previamente, con objeto de aislarlos de la biosfera durante el tiempo necesario como para que, por desintegración u otros procesos, su actividad o potencial peligrosidad decaiga a niveles inocuos para el hombre y su entorno (Fig. 1).

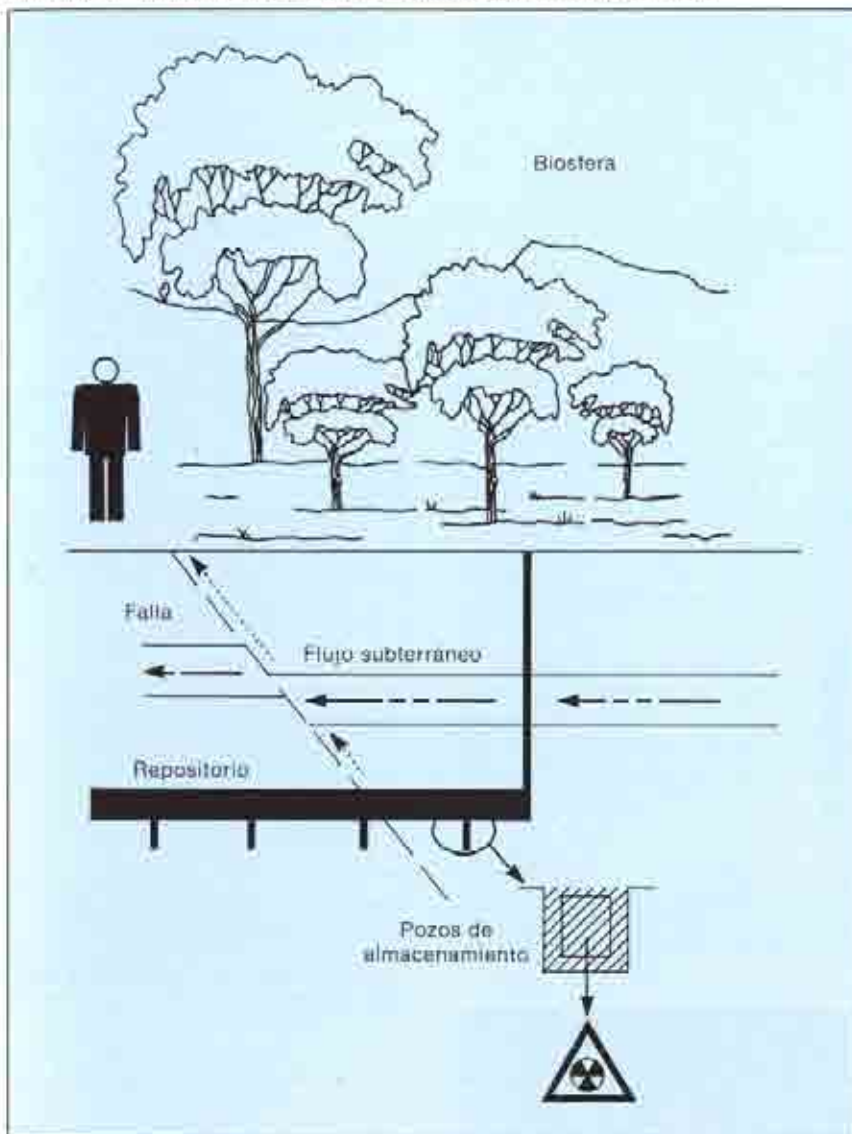
Modelo conceptual de los sistemas de almacenamiento

El modelo conceptual de los sistemas de almacenamiento geológico se basa en el principio de sistema multibarrera (Fig. 2). Este consiste en el confinamiento de los residuos mediante la interposición de barreras sucesivas (*barreras naturales* y *barreras técnicas*) entre éstos y la biosfera.

Por barreras naturales se entiende el medio geológico hospedante de la instalación de almacenamiento o repositorio y el entorno geológico circundante. Un proceso de selección de formaciones y entornos geológicos favorables basado, en último término, en un conjunto de criterios de seguridad permite determinar el emplazamiento más adecuado para el repositorio.

Por barreras técnicas se entiende la propia forma físico-química del residuo (sólido poco soluble), el contenedor del residuo (resistencia a la

FIGURA 1. Esquema de un sistema de almacenamiento de residuos.



corrosión), el material de relleno entre contenedores (capacidad de absorción y retención) y los materiales de sellado en la clausura de la instalación.

Metodologías de análisis de sistemas integrados

En el estudio de los sistemas de almacenamiento de residuos cabe diferenciar dos episodios sucesivos, diferentes conceptualmente y, por tanto, abordados desde puntos de vista distintos:

- Fase preclausura, que comprende el período de construcción y operación de la instalación, así como el corto período de tiempo de vigilancia institucional siguiente a su clausura.
- Fase postclausura, que se refiere a la evolución de la instalación en

En la evaluación de la seguridad de los sistemas de almacenamiento geológico de los residuos radiactivos se está siguiendo una aproximación basada en el análisis del comportamiento global del sistema.

un marco temporal mucho más amplio. En lo sucesivo nos referiremos a las metodologías de evaluación del comportamiento del sistema en esta segunda fase.

Para el estudio de esta última deben tenerse en cuenta las dos consideraciones siguientes:

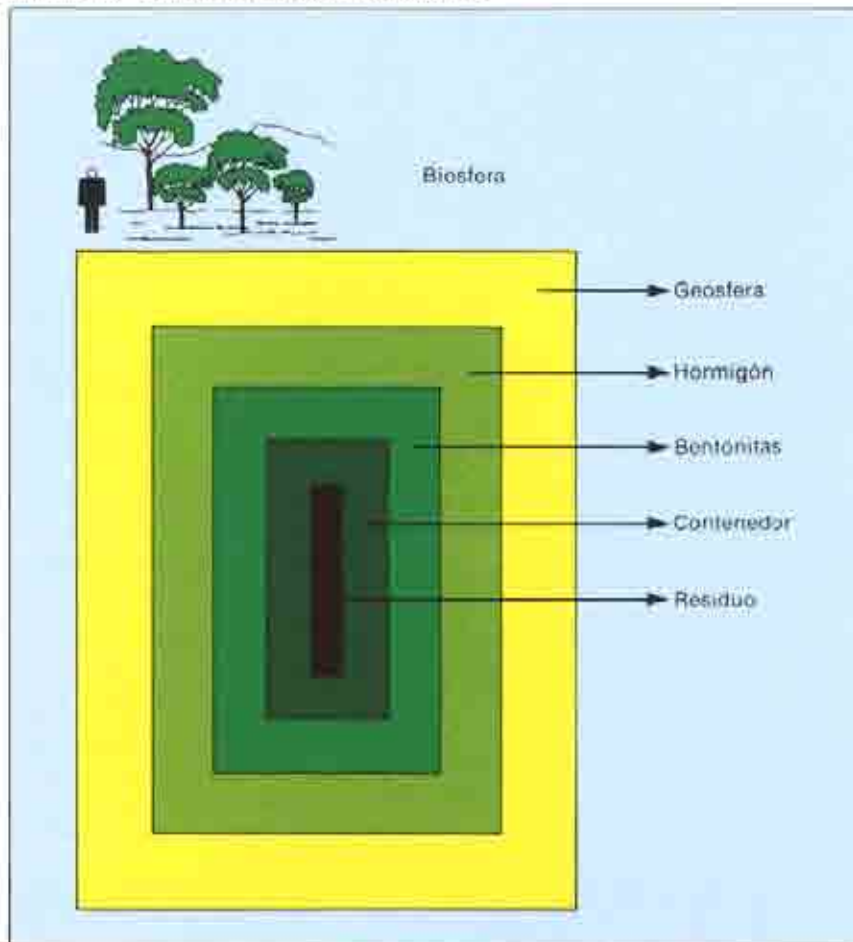
1. Los numerosos y complejos procesos y/o fenómenos acoplados y/o yuxtapuestos que tienen lugar o pueden tenerlo en las diferentes partes del sistema; y
2. Los largos períodos de tiempo para los que la efectividad del sistema debe contemplarse.

En este marco, las aproximaciones seguidas se basan en un abanico de técnicas y métodos, indirectos en muchos casos, que, conjuntamente, permiten determinar las posibles evoluciones del sistema y, en último término, su comportamiento a largo plazo. La complejidad de este tipo de estudios, por tanto, no puede entenderse sin la presencia de un equipo multidisciplinar que cubra las diferentes áreas del conocimiento implicadas en el análisis del sistema. Esta metodología de evaluación comprende (Fig. 3) los tres pasos siguientes:

- a) Identificar los fenómenos y procesos que pudieran afectar al sistema y a su evolución.
- b) Examinar los efectos de tales fenómenos y procesos en el comportamiento del sistema; y
- c) Calcular las consecuencias, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a los fenómenos y procesos considerados.

Tal metodología se basa en una aproximación sistemática al mismo, con el objetivo de asegurar que todos los aspectos relevantes de éste y de su posible evolución están siendo considerados. Conlleva el desarrollo de modelos conceptuales y matemáticos representativos del sistema y de los códigos de cálculo asociados que permitan simular y, por tanto, predecir su comportamiento a largo plazo para una diversidad de futuros estados de éste. Tales «estados» se refieren a rangos realistas de las condiciones iniciales y de contorno y a los sucesos y procesos previsible, así como a aquellos poco probables pero que pudieran afectar de un modo significativo a la integridad del sistema. Las importantes lagunas de conocimiento en la caracterización y evolución del sistema determinan que una parte importante de la metodología se centre en los análisis de sensibilidad e incertidumbre y en

FIGURA 2. Esquema del sistema multibarrera.



El almacenamiento geológico se ha planteado como la opción más viable y segura para los residuos radiactivos.

su propagación a lo largo de los diferentes submodelos, hasta el cálculo final de consecuencias.

Pasos de un análisis del comportamiento de sistemas

El objetivo final del estudio consiste en la estimación de las posibles consecuencias de la evolución del sistema y constituye, por tanto, una evaluación del impacto potencial del almacenamiento. Por consiguiente, representa el soporte de los análisis de seguridad y una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, no solamente a la luz de los resultados finales, sino también en sus diferentes fases.

La metodología de evaluación puede resumirse en los cinco pasos siguientes:

1. Descripción del sistema.
2. Desarrollo y selección de escenario.
3. Análisis de consecuencias.
4. Análisis de incertidumbre.
5. Análisis de sensibilidad.

Descripción del sistema

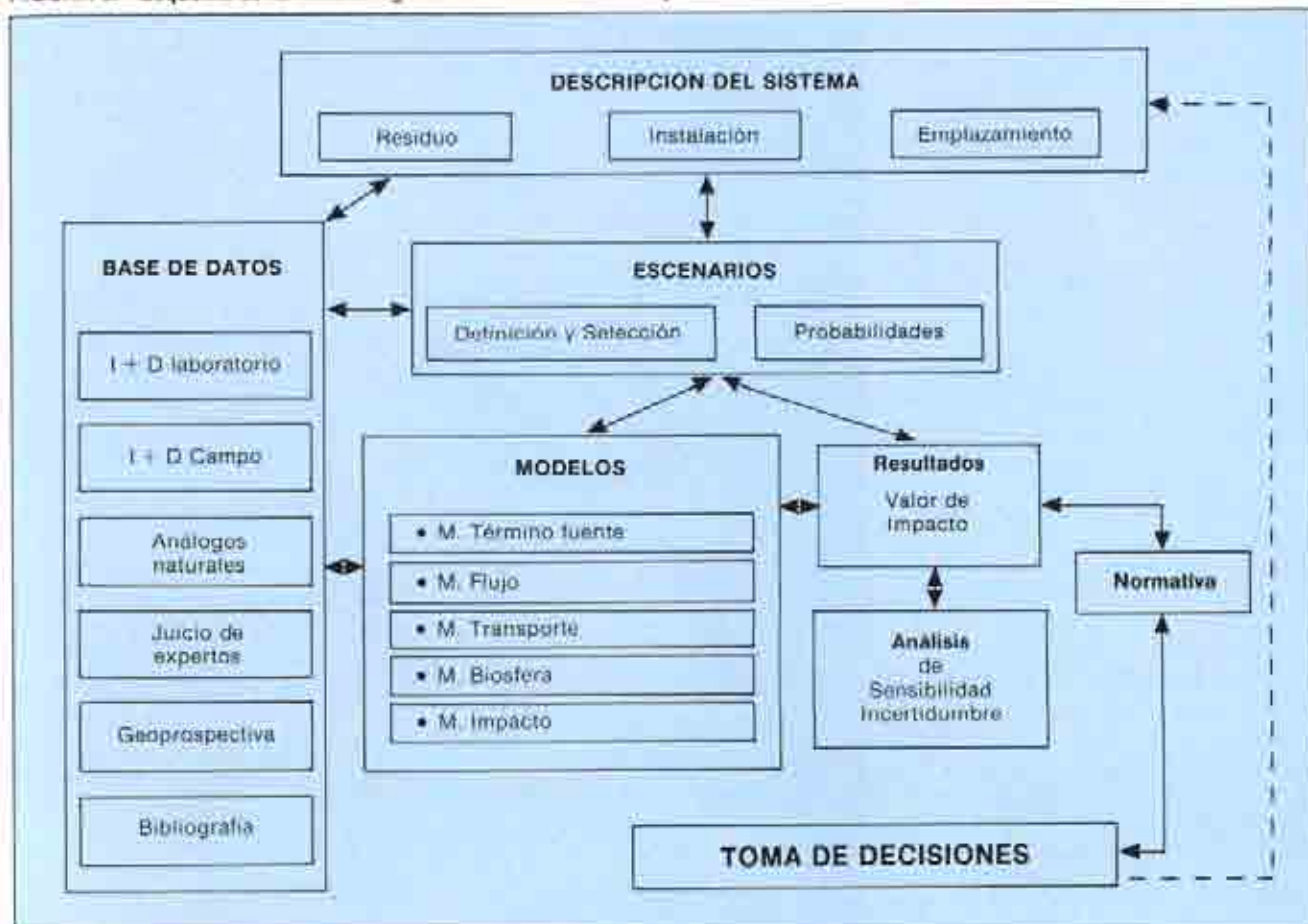
Comprende la descripción detallada de todas y cada una de las partes que lo conforman:

- a) Los residuos (tipo, inventario, volumen, características físicas y químicas, etc.)
- b) La instalación (diseño, características y propiedades de los componentes multibarrera, etc.)
- c) El entorno geológico (propiedades geológicas, hidrológicas y geoquímicas de la roca almacén y de las formaciones geológicas circundantes, condiciones iniciales y de contorno, etc.)

Definición y selección de escenarios

Por escenario se entiende la combinación de sucesos y/o procesos capaces de representar una posible situación futura del sistema en estudio conducente a una liberación de los residuos a la biosfera y, en última instancia, al hombre. En otros términos, un escenario representa un posible estado o probable evolución del sistema. La metodología de definición y selección de escenarios más extendida es la conocida como «aproximación sistemática», basada en el empleo de la técnica de árboles de fallos y árboles de sucesos (Fig. 4). Sin ánimo de profundizar en su des-

FIGURA 3. Esquema de la Metodología de Evaluación del Comportamiento.



cripción, esta metodología consta de los pasos siguientes:

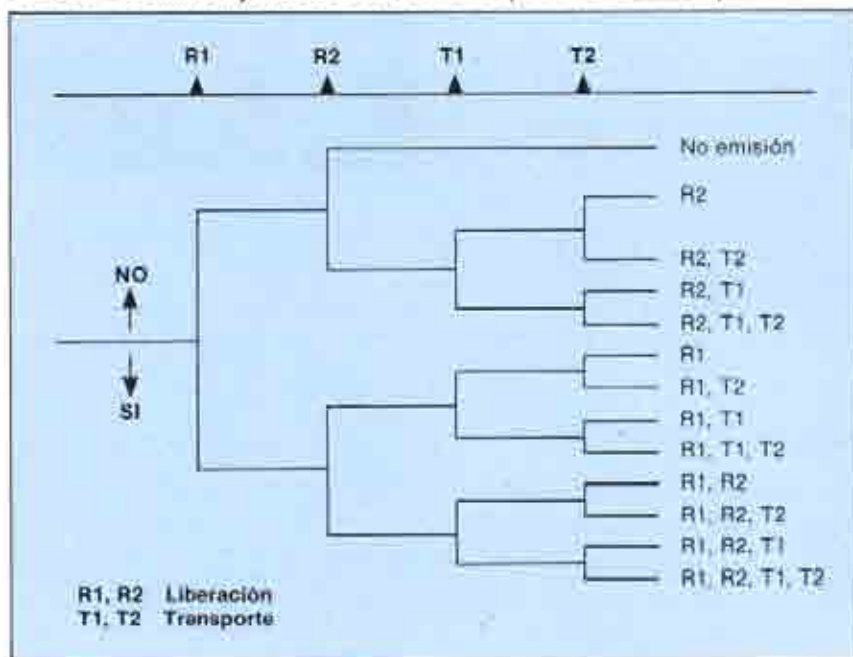
1. Identificación de sucesos y procesos.
2. Clasificación de sucesos y procesos.
3. Selección de sucesos y procesos.
4. Definición de escenarios.
5. Selección de escenarios.
6. Selección final de escenarios.

El proceso de selección de escenarios se apoya en tres criterios: 1.º) racionalidad física de éstos; 2.º) probabilidad de ocurrencia, y 3.º) potenciales consecuencias.

Análisis de consecuencias

El análisis de consecuencias se lleva a cabo para el conjunto final de escenarios obtenido en el apartado anterior. Consiste en el desarrollo de un modelo conceptual del sistema, un modelo matemático (ecuaciones matemáticas que describen el modelo conceptual) y uno o más códigos de cálculo diseñados para obtener la solución, analítica o numérica,

FIGURA 4. Definición y selección de escenarios (Árboles de Sucesos).



de las ecuaciones planteadas en dicho modelo. Este punto de la metodología necesita de una base de da-

tos importante con la que alimentar los modelos de simulación.

En términos generales, un modelo

de consecuencias debe contar con la capacidad de simular:

- a) El término fuente.
- b) El flujo subterráneo
- c) El transporte a través de la geosfera.
- d) El transporte a través de la biosfera.
- e) Los efectos al hombre y su entorno.

Ello determina el diseño modular de los modelos de consecuencias, el cual conlleva importantes ventajas:

1. Permitir modificaciones en submodelos particulares sin necesidad de modificar los restantes y, de este modo, estudiar diferentes emplazamientos o modelos conceptuales del sistema de almacenamiento.

2. Estudiar, independientemente, cada subsistema, pudiendo llevar a cabo estudios parciales de interés.

3. Permitir acometer evaluaciones parciales de cada uno de ellos en el caso de existir un criterio de seguridad múltiple para cada subsistema.

Para un escenario dado, el flujo de información de un modelo de consecuencias es el siguiente: el modelo de término fuente calcula una tasa de descarga en función del tiempo a partir del inventario de residuos presente. Este conjunto de valores representa las condiciones de contorno para el código de transporte en la geosfera, el cual, junto con el campo de velocidades calculado por el modelo de flujo, determina los flujos de descarga a la biosfera. Finalmente, los resultados del modelo de la biosfera (normalmente compartimental) son utilizados por el modelo de consecuencias para determinar los efectos al hombre y el medio ambiente.

Dado que el escenario más probable (escenario de evolución normal) incluye la incorporación de los residuos tóxicos al agua subterránea y su consiguiente transporte hasta alcanzar la biosfera se viene dando especial importancia a los submodelos de flujo y transporte.

Análisis de incertidumbres

La variabilidad intrínseca de los sistemas físicos abiertos, como el que nos ocupa, su dependencia espacio-temporal, las lagunas de conocimiento en la caracterización y evolución del sistema, así como las limitaciones y simplificaciones incluidas en su modelización, determinan la presencia de incertidumbres importantes, no sólo en los resultados finales del estudio, sino también en los diferentes pasos de la metodología. La correcta



La actividad humana conlleva, en muchos casos, la generación de una serie de residuos potencialmente peligrosos para el hombre y su entorno.

evaluación del sistema no puede llevarse a cabo sin tener en cuenta el estudio de tales incertidumbres y su propagación en el proceso de evaluación.

Un modo de abordar el estudio de estas incertidumbres se basa en la metodología Monte Carlo. Esta consiste en caracterizar las incertidumbres de los parámetros de entrada mediante la definición de funciones de distribución de probabilidad (*pdf*, *probability distribution function*) para cada uno de ellos. Del muestreo de las *pdf* de los diferentes parámetros del modelo resulta una matriz $N \times M$, donde N representa el número de simulaciones deseadas del sistema (número de valores a obtener de cada

parámetro) y M es el número total de parámetros considerados. Cada uno de los vectores fila de la matriz $N \times M$ representa un posible estado del sistema (*RUN*), que se evalúa mediante el modelo de consecuencias, resultando un único valor de impacto. La evaluación de los N posibles estados permite obtener N valores de consecuencias, que definen una *pdf* de la medida de impacto que se considere.

Esta *pdf* resultante, junto con las *pdf* de los parámetros característicos del modelo, se utilizan para llevar a cabo los análisis de sensibilidad e incertidumbres correspondientes.

Las principales fuentes de incertidumbre en estos estudios provienen de las tres áreas siguientes:

1.º Escenarios.—Si bien sabemos que la evolución del sistema será única, nos encontramos ante la incapacidad de poder predecirla con seguridad. En el proceso de creación y selección de escenarios, las incertidumbres surgen en la identificación y selección de todos los procesos y sucesos y en su correcto acoplamiento a lo largo de las variables espacio y tiempo, así como en la determinación de las correspondientes probabilidades de ocurrencia.

2.º Modelos.—El modelo conceptual, el modelo matemático y el código de cálculo asociado que definen el modelo de impacto son fuentes potenciales de incertidumbre: 1) en la formulación del modelo conceptual (simplificaciones hechas del sistema real, deficiencias en su caracterización, etc.); 2) en los modelos matemáticos (solución de las ecuaciones mediante técnicas analíticas, semianalíticas o numéricas; la inestabilidad y no convergencia del método de resolución; la aproximación de una serie infinita de términos mediante la truncación de ésta a un cierto número, etc.); y 3) en el código de cálculo (errores de codificación, limitaciones de cálculo y errores del usuario). La reducción de tales incertidumbres se lleva a cabo mediante:

- técnicas de garantía de calidad;
- la verificación con soluciones analíticas y/o ejercicios de intercomparación, y
- la validación de los modelos, siendo esta última la vía más interesante, aunque no siempre posible.

3.º Datos y parámetros.—Las incertidumbres son debidas a errores de precisión en la toma de datos, al empleo de series de datos incompletas y/o sesgadas, así como a su incorrecta interpretación. De todas las fuentes de incertidumbre, éstas son las que han recibido mayor atención, habiéndose desarrollado métodos y herramientas para el estudio de su propagación a lo largo de los diferentes submodelos.

Análisis de sensibilidad

De modo similar a los análisis de incertidumbre, los análisis de sensibilidad utilizan la función de salida del modelo de consecuencias junto con las funciones de entrada de los diferentes parámetros. Los análisis de sensibilidad son complementarios de los análisis de incertidumbre al identificar la importancia relativa de los parámetros del modelo más influyentes en los resultados finales.

METODOS CUANTITATIVOS DE EVALUACION

Las metodologías cuantitativas de evaluación son básicamente dos:

- 1 M. deterministas.
- 2 M. probabilistas

M. deterministas

Consisten en considerar valores únicos para las variables implicadas en el modelo de consecuencias. Dos son las aproximaciones deterministas más extendidas: a) el *Best Estimate* (mejor estimación), y b) el *Worst Case Analysis* (caso crítico mayorante).

M. probabilistas

Los métodos probabilistas, por el contrario, consideran que las variables características del sistema de almacenamiento no toman valores únicos, sino que cada valor tiene cierta probabilidad de ocurrencia. Esto equivale a decir que cada variable presenta un rango de variación, y dentro de ese rango toma valores de acuerdo con una distribución de probabilidad (*pdf*). Tales *pdf* pretenden caracterizar la variabilidad intrínseca de cada variable y/o las limitaciones que se tienen en su conocimiento.

Siguiendo la metodología Monte Carlo descrita anteriormente, las *N* posibles combinaciones de valores de estas variables representan *N* diferentes estados del sistema. El modelo de consecuencias traduce cada uno de estos estados a un valor de impacto. Los *N* diferentes estados del sistema se transforman, de este modo, en *N* valores de impacto, esto es, en una distribución de probabilidad (*pdf*) de las consecuencias.

La función resultante de la evalua-

Las funciones de distribución de probabilidad pretenden caracterizar la variabilidad intrínseca de cada variable y/o las limitaciones que se tienen en su conocimiento.

ción en combinación con la matriz de valores de entrada al modelo permiten, por un lado, clasificar las variables implicadas en orden de importancia (análisis de sensibilidad) y caracterizar la función de salida, asignándole un rango de variación (análisis de incertidumbre).

Las metodologías deterministas se sirven de modelos detallados del sistema mediante representaciones *2D* y tridimensionales de los diferentes subsistemas. Las probabilistas, por el contrario, y dado el número elevado de simulaciones que deben realizar, emplean modelos más sencillos y rápidos en cálculo (frecuentemente unidimensionales). Dada su complementariedad, ambas metodologías deben utilizarse en las evaluaciones de seguridad de los sistemas de almacenamiento de residuos.

CONCLUSIONES

1. La metodología de evaluación del comportamiento de los sistemas de almacenamiento geológico de los residuos es una herramienta de análisis eficaz y de apoyo en la toma de decisiones en todas sus fases.

2. Las metodologías cuantitativas de evaluación (deterministas y probabilistas) son complementarias y, por tanto, ambas deben emplearse en la evaluación de la seguridad de los sistemas de almacenamiento.

3. La correcta evaluación del sistema no puede entenderse sin tener en cuenta las incertidumbres inherentes al mismo y a su evolución, así como su propagación a través de los distintos pasos que conforman la metodología.

4. Los análisis de sensibilidad permiten determinar las variables más influyentes en el estudio, siendo de gran ayuda en la toma de decisiones a la hora de definir futuras líneas en las que intensificar esfuerzos.

5. La metodología de evaluación del comportamiento global de sistemas no sólo es aplicable a los sistemas de almacenamiento de residuos radiactivos, sino a cualquier otro sistema.

6. La incorporación de variables cualitativas a este tipo de estudios y los posibles intereses de las partes implicadas conllevan una subjetividad en la interpretación final de los resultados.

7. Además de las incertidumbres asociadas a los posibles estados fuentes del sistema, deben considerarse aquellas derivadas de los no menos inciertos modelos de comportamiento humano futuro. ■