

JUAN L. SANTIAGO - JESÚS ALONSO

ALMACENAMIENTO DEFINITIVO DE RESIDUOS DE ALTA ACTIVIDAD

La política de gestión del combustible gastado y otros residuos de alta actividad en España se basa hoy en la opción de un ciclo abierto del combustible nuclear -sin reprocesamiento-, almacenando de forma definitiva los elementos combustibles gastados en formaciones geológicas profundas, tras un período de almacenamiento intermedio.

En este sentido, ENRESA está trabajando en la actualidad en diseños conceptuales, evaluación del comportamiento e I+D, describiendo los autores en este artículo, ampliamente, estos tres puntos.

INTRODUCCIÓN

La política de gestión del combustible gastado y otros residuos radiactivos de alta actividad, en España se basa hoy en la opción de un ciclo abierto del combustible nuclear, (sin reprocesamiento), almacenando de modo definitivo los elementos combustibles gastados en formaciones geológicas profundas, después de un período de almacenamiento intermedio.

Dentro de este concepto de almacenamiento definitivo ENRESA ha venido trabajando en el desarrollo de diseños conceptuales adaptados a tres posibles formaciones geológicas (granito, arcilla, sal) que podrían albergar los elementos combustibles cuyas principales características se describen en este artículo.

Con el fin de justificar la seguridad de los tres conceptos, ENRESA está trabajando en la evaluación del comportamiento, con un plan de evaluación que en una primera fase constará de dos iteraciones sucesivas que finalizarán antes del año 2000, de acuerdo con la estrategia de evaluación que se describe en este artículo.

Paralelamente a los trabajos de diseño y evaluación de comportamiento, discurren los trabajos de I+D que tienen la misión de aportar las bases científicas para el diseño y evaluación de comportamiento definitivos. Asimismo los trabajos geológicos realizados sobre las posibles formaciones existentes en el país, que podrían alojar una instalación de este tipo, aportan datos sobre la geosfera para continuar con las tres grandes líneas de

trabajo programadas: Diseño, evaluación de comportamiento e I+D.

DISEÑO CONCEPTUAL

Su objetivo es desarrollar conceptos del Almacenamiento Geológico Profundo, adaptados a las litologías favorables, que permitan demostrar su viabilidad tecnológica. Estos diseños sirven además para enmarcar las actividades de I+D, para ajustar las metodologías y herramientas necesarias para la evaluación del comportamiento, y para establecer las inversiones y costes asociados.

INVENTARIO DE RESIDUOS A ALMACENAR

Los residuos a acondicionar en el almacenamiento final son elementos de combustible gastado generados durante la operación de las centrales nucleares, cantidades muy pequeñas de concentrados vitrificados de RAA, procedentes del reprocesamiento del combustible de Vandellós I y Residuos de Media Actividad (RMA) no generadores de calor procedentes de la clausura de las centrales nucleares y de las propias instalaciones del almacenamiento definitivo.

Los tipos y cantidades de residuos radiactivos que se generarán previsiblemente hasta la terminación del programa nuclear español, se resumen en la tabla I y se describen brevemente a continuación.

Elementos de combustible gastado

La generación prevista de elementos de combustible gastado en el Cuarto Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR), basada en una vida útil de las centrales nucleares de 30 años, asciende a 8.640 elementos del tipo PWR y 6.471 elementos del tipo BWR.

Dada la diversidad de elementos de combustible existentes, se ha seleccionado para simplificar los cálculos un elemento representativo de referencia -PWR 17 x 17 estándar de Westinghouse-, con un grado de quemado de 40.000 MWd/tU y un enriquecimiento en U-235 del 4,1%. Asimismo, se considera una equivalencia 1PWR:3BWR, teniendo en cuenta las características geométricas y térmicas de estos elementos de combustible. De esta manera, la cantidad de elementos combustibles a almacenar sería 10.797 PWR equivalentes para el supuesto de 30 años de operación de las centrales nucleares existentes.

Como quiera que las expectativas operacionales de las actuales centrales nucleares se cifran en una vida útil de 40 años, el diseño se ha realizado para una capacidad de almacenamiento total de 20000 elementos de combustible, 11600 PWR y 8400 BWR, o bien 14400 PWR equivalentes.

Residuos vitrificados

El reprocesamiento del combustible gastado de la central nuclear de Vandellós I ha generado una reducida cantidad de RAA, consistente en 50 recipientes tipo La Hague o su equivalente del tipo Marcoule. Cada recipiente tipo La Hague está formado por una matriz de vidrio de aproximadamente 1,34 m de longitud y 0,43 m de diámetro exterior, con una densidad aproximada de 2750 Kg/m³, un peso de 0,492 t y un volumen útil de 150 l, cargada en una cápsula de 170 l.

Residuos de media actividad

El almacenamiento deberá albergar también aproximadamente 4.200 m³ de residuos de media actividad no generadores de calor

procedentes del desmantelamiento de las centrales nucleares y de las propias instalaciones del almacenamiento definitivo.

DESCRIPCIÓN DE LOS DISEÑOS CONCEPTUALES

El diseño conceptual se ha basado en una estrategia de convergencia hacia un concepto de almacenamiento unificado, prácticamente independiente de la formación rocosa alojante. Los diseños conceptuales preparados para las tres formaciones geológicas granito, arcilla y sal, presentan dos elementos básicos comunes: la cápsula de almacenamiento y el modo de disposición de las cápsulas en su emplazamiento definitivo (en galerías en las tres opciones).

Respecto de la cápsula los parámetros clave para su definición son: el tipo de cápsula y la carga térmica de la cápsula. Se consideraron inicialmente dos tipos diferentes de cápsulas de almacenamiento capaces de cumplir los requisitos de contención establecidos: un contenedor autoblandado, utilizado para manejo y transporte subterráneo y almacenamiento final, y una cápsula de almacenamiento de acero no autoblandada. Esta última fue seleccionada como cápsula de almacenamiento común por las siguientes razones:

- Para las actividades de manejo y transporte, la cápsula de almacenamiento no blindada puede ser suplementada con un sobreenvase de blindaje radiológico.
- El menor peso y dimensiones de la cápsula no autoblandada facilita las operaciones de emplazamiento del residuo en galerías de pequeño diámetro.
- Una cápsula de almacenamiento de acero limita las cantidades de materiales extraños al medio (acero al carbono, material de blindaje neutrónico, etc.) que deben ser abandonadas en el repositorio.
- El contenedor autoblandado tiene un coste más elevado, si sólo se utiliza para evacuación.

La definición de una carga térmica específica para la cápsula de almacenamiento requiere una optimización multiparamétrica del diseño. La carga térmica de la cápsula se determina por el tiempo de almacenamiento intermedio del combustible y por la capacidad de la cápsula. La selección de los valores más apropiados requiere la consideración de diferentes aspectos, tales como: las estrategias de gestión de residuos, los procedimientos de manejo de residuos, los costes de construcción del repositorio, etc. Para cada una de las tres formaciones alojantes potenciales se realizaron cálculos térmicos encaminados a analizar las relaciones existentes entre la carga térmica de la cápsula

T I Inventario total de residuos a almacenar

TIPO DE RESIDUO	CANTIDAD
Elementos de combustible gastado	
PWR	11.600
BWR	8.400
PWR Equivalentes	14.400
Contenedores de residuos vitrificados	50
RMA procedentes de la clausura de centrales nucleares (m³)	4.200

de almacenamiento y la disposición general de los campos de almacenamiento de residuos, capaces de limitar las cargas termomecánicas impuestas sobre el material de sellado de los bultos, la formación alojante y las formaciones suprayacentes. Finalmente se seleccionó una carga térmica de 1200 Watios, correspondiente a una cápsula cargada con 4 elementos de combustible de referencia (Figura 1).

En cuanto al modo de evacuación, se analizaron dos alternativas consideradas técnicamente factibles en los tres medios: "almacenamiento en galería", donde la evacuación de residuos tiene lugar de forma secuencial a lo largo del eje de la galería de almacenamiento, y "almacenamiento en pozo", donde las cápsulas son emplazadas en pozos verticales excavados desde la solera de la galería de almacenamiento. En términos generales, el almacenamiento en galería minimiza la perturbación sobre la roca alojante y presenta las mejores características cuando se compara el volumen de roca a excavar, la simplicidad del manejo del residuo y las estimaciones de costes.

A la vista de lo expuesto, el concepto de evacuación común para los tres medios, contempla el almacenamiento final del combustible gastado y otros RAA en cápsulas no

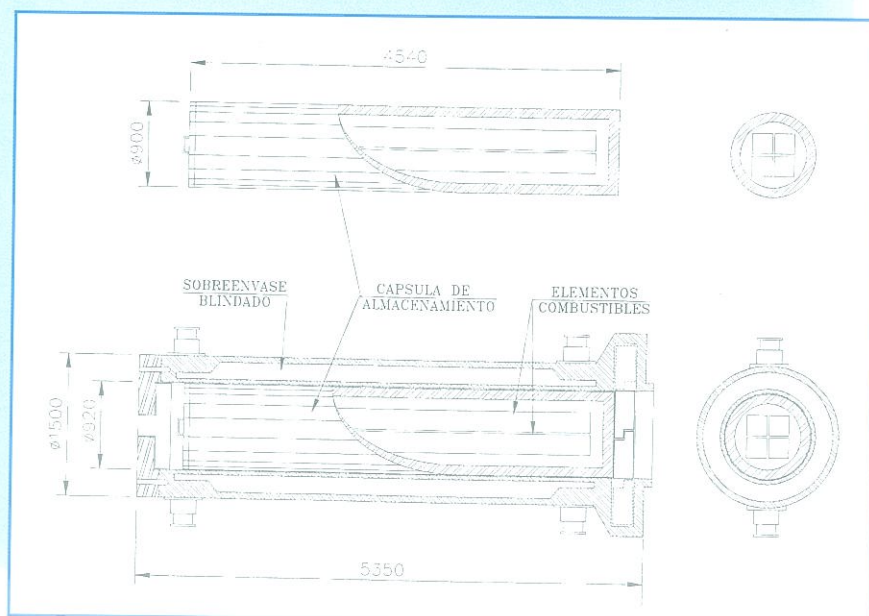
autoblandadas de acero al carbono, emplazadas centralmente a lo largo de un sistema de galerías de almacenamiento horizontales y rodeadas de un material de sellado adecuado (Figura II). El diseño completo de las instalaciones de almacenamiento geológico profundo, consta de los siguientes grandes apartados:

a) Instalaciones de superficie, que comprenden todos los servicios generales del almacenamiento, las instalaciones necesarias para el acondicionamiento de los residuos en las cápsulas y los accesos a las instalaciones subterráneas principalmente (Figura III). Estas instalaciones que se distribuyen en una superficie de 48 Ha se subdividen en dos zonas principales con características radiológicas diferentes: zona no reglamentada designada como de libre acceso y zona reglamentada donde se manejan los RAA.

La zona no reglamentada alberga a todos los servicios generales y auxiliares del almacenamiento y consta de las siguientes áreas:

- Área de servicios generales, donde se sitúa el edificio principal y el control de accesos, así como los edificios de administración, social y de servicios médicos.
- Área de suministros externos donde se localiza la subestación eléctrica, planta de tratamiento y depósito de agua, tanques de combustibles y gases y protección contraincendios.
- Área de servicios de apoyo a interior, con ciertos servicios auxiliares de la operación de las instalaciones subterráneas como son las infraestructuras de los pozos, escombrera y las instalaciones de preparación y almacenamiento de los

F I. Cápsula de almacenamiento y sobreenvase de blindaje radiológico



materiales de relleno, sellado y sostenimiento.

La zona reglamentada alberga todas las instalaciones en que se manejan los RAA y consta de las siguientes áreas:

- Área de recepción y maniobra de vehículos de transporte de contenedores.
- Planta de encapsulado, donde se realizan las operaciones de recepción de RAA, encapsulado y soldadura en celdas calientes y tratamiento de residuos, principalmente.

b) Instalaciones subterráneas, que comprenden todos los accesos al almacenamiento (rampas y pozos), áreas centrales de servicios, galerías de acceso y ventilación y galerías de almacenamiento (Figura IV). Las instalaciones subterráneas se subdividen en dos áreas principales, una considerada como área reglamentada o de almacenamiento, donde se manipulan las cápsulas con los RAA y RMA y otra no reglamentada donde se realizan exclusivamente labores mineras convencionales de excavación y preparación de las galerías del almacenamiento.

El área reglamentada tiene dos accesos: uno en rampa por el que acceden los residuos hacia las galerías de almacenamiento y otro mediante pozo (pozo principal) por el que accede el personal de explotación y los bloques de bentonita para el sellado de galerías. En este área el aire fresco entra por el pozo principal y sale por la rampa.

El área no reglamentada está servida por el pozo de servicio por el que accede el personal dedicado a la excavación y preparación de galerías, que constituye además la entrada de aire fresco para ventilación de este área convencional. Aire fresco que circula hacia el pozo de ventilación que puede utilizarse también como salida de emergencia.

EVALUACIÓN DE COMPORTAMIENTO

La evaluación del comportamiento consiste esencialmente en analizar de forma sistemática el comportamiento futuro de las distintas barreras y en desarrollar y aplicar modelos que permitan cuantificar la capacidad de las distintas barreras y del sistema en su conjunto para verificar el cumplimiento de los criterios de seguridad que se requieran.

El proceso de evaluación de comportamiento de los diseños conceptuales, en una primera fase, se está realizando, según un plan concebido en dos iteraciones, de modo que en la primera iteración se ha diseñado una estrategia de evaluación del tipo top-down (esencialmente probabilista) que dejará paso a evaluaciones del tipo bottom-up (deterministas) en las sucesivas iteraciones que se realicen, complementadas con eva-

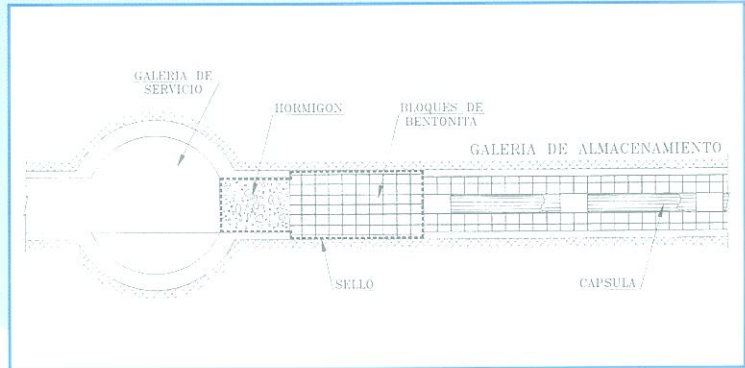
luaciones probabilistas.

El proceso global de evaluación se representa en la Figura V.

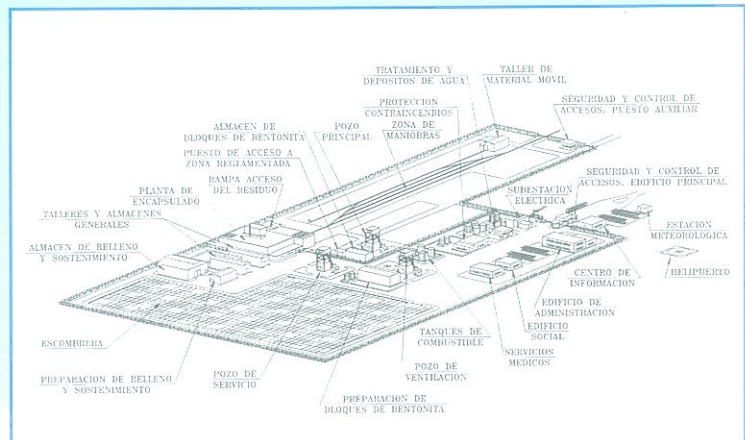
En la primera iteración la evaluación del comportamiento pone especial énfasis en la modelización global del sistema de almacenamiento, como método para alcanzar en una primera aproximación una comprensión global del comportamiento del diseño a largo plazo, identificando así los aspectos clave que determinan la seguridad del almacenamiento, lo que permitirá establecer conclusiones acerca de la idoneidad del diseño, definir prioridades en las líneas de investigación y desarrollo y perfeccionar el proceso de evaluación de comportamiento en las sucesivas iteraciones.

En la segunda iteración de evaluación se pretende reducir las incertidumbres, necesariamente consideradas en la primera fase, mediante un mejor conocimiento de los procesos a los que puede verse sometido el almacenamiento en el largo plazo, que básicamente debe ser suministrado por las actividades que ENRESA está desarrollando en el área de I+D. El objetivo en esta fase es alcanzar un conocimiento del comportamiento del almacenamiento, que permita justificar la seguridad a largo plazo del mis-

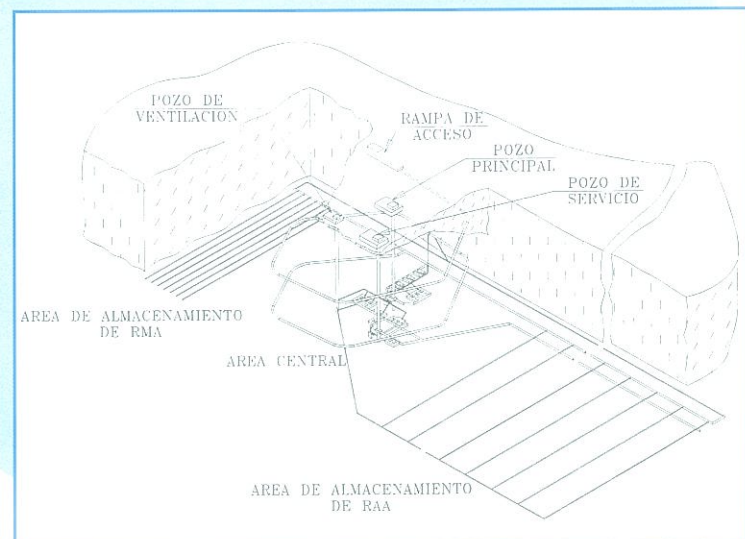
F II. Galerías de almacenamiento



F III. Instalaciones de superficie



F IV. Instalaciones subterráneas



mo con el mayor grado de determinismo posible.

Dentro del alcance de la primera fase del proceso de evaluación de comportamiento que ENRESA está llevando a cabo en la actualidad, en 1996 se completará

F V. Estrategia de evaluación de comportamiento



la evaluación del concepto para granito, que responde a una estrategia desarrollada en cuatro etapas sucesivas:

- Identificación de procesos, sucesos y características, que se pueden presentar en el almacenamiento y son relevantes para la seguridad.
- Desarrollo de escenarios.
- Desarrollo del modelo conceptual y matemático de comportamiento del sistema de almacenamiento.
- Análisis de consecuencias, sensibilidad e incertidumbre.

IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS/SUCESOS Y CARACTERÍSTICAS

En esta primera etapa de evaluación se ha trabajado con numerosos factores (en adelante se denominan factores a cualquier proceso, suceso o característica indistintamente) identificados en otras evaluaciones de comportamiento, obteniendo después de un proceso de depuración y homogeneización 277 factores debidamente referenciados y considerados por otros ejercicios de evaluación de ámbito internacional.

De esta primera selección, se eliminaron los que no son aplicables a la roca alojante (granito) y los relativos a la biosfera, que se analiza de manera simplificada en este ejercicio. Con ello se obtuvieron 121 factores, que se redujeron a 105 factores, después de descartar 16 factores por su baja probabilidad de ocurrencia o por la reducidas consecuencias.

De los 105 factores finalmente considerados, 63 procesos se consideran con probabilidad igual a la unidad, es seguro por tanto que se producirán durante la vida del almacenamiento y merecen una consideración y estudio especial. Son los que constituirán en adelante el escenario de evolución normal, sistema de referencia o

escenarios de evolución alterada.

La metodología adoptada para el desarrollo de escenarios, se deriva de la seguida en el ejercicio holandés de PROSA, con modificaciones encaminadas a obtener, una coherencia entre el proceso de identificación de factores y el de desarrollo de escenarios, aspecto éste no resuelto en ejercicios de evaluación realizados hasta ahora.

Para ello, se han definido un conjunto de estados posibles del almacenamiento referidos a la eficacia de las barreras que se colocan en el denominado campo cercano y a la eficacia del campo lejano o geosfera.

Para simplificar el análisis del conjunto total de estados posibles que se pueden presentar en el almacenamiento a largo plazo, se consideran tres posibles estados del campo cercano y lejano: inalterado, alterado y en derivación.

De este modo si las barreras del campo cercano o lejano conservan su integridad se le asigna el estado inalterado, si presentan algún grado de degradación se le asigna el estado alterado, considerando el campo cercano o lejano en derivación cuando la barrera en cuestión no ejerce su función.

Así es posible establecer los nueve posi-

bles estados del sistema de almacenamiento que se muestran en la Figura VI. Si se representan estos estados en un sistema de coordenadas X, Y, donde la X represente el grado de alteración del campo cercano y la Y el grado de alteración del campo lejano, se obtienen los resultados de la figura VII.

Representando a continuación en este espacio los factores que previsiblemente pueden presentarse durante la vida del sistema de almacenamiento, es posible establecer agrupaciones de factores que conducen estados de alteración similares, conformando así un conjunto de escenarios potenciales, de entre las que se han elegido tres para esta primera fase de evaluación:

- Escenario de referencia, donde se estudia el comportamiento del almacenamiento a largo plazo, cuando las barreras del campo cercano y lejano evolucionan según lo previsto en el diseño.
- Repositorio sin sellar, como escenario representativo de la alteración del campo cercano.
- Intrusión humana, mediante la construcción de un pozo profundo de abastecimiento de agua, representativo de la alteración de la geosfera.

DESARROLLO DEL MODELO DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

Para el análisis del escenario de referencia se ha construido el diagrama influencia de los 63 procesos que previsiblemente sucederán durante la evolución normal del almacenamiento.

En este diagrama de influencia, de gran complejidad, se representan todas las interrelaciones de los diferentes procesos, que cabe esperar que se produzcan con mayor o menor solape, con los cuatro mecanismos básicos de posible llegada de radionucleidos a la biosfera y consiguientemente al hombre:

- Liberación de radionucleidos del combustible
- Transporte en el campo cercano
- Transporte en el campo lejano
- Transporte en la biosfera

Para facilitar el estudio de este sistema de referencia, se ha subdividido el conjunto de

F VI. Estados del sistema

ESTADO DEL SISTEMA Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SUBSISTEMAS	ESTADOS								
CAMPO CERCANO	0	A	1	0	A	1	0	A	1
CAMPO LEJANO	0	0	0	A	A	A	1	1	1

Leyenda

- 0 = Subsistema inalterado
- A = Subsistema alterado
- 1 = Subsistema en derivación

- Sistema de referencia
- Estados alterados
- Estados derivados

los procesos que lo componen en doce subsistemas de acuerdo con el esquema de la Figura VIII. Estos subsistemas se estudian en detalle, generando los correspondientes submodelos de comportamiento que finalmente se acoplan según el esquema representado en dicha Figura VIII, conformando el modelo global del sistema de referencia.

ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS, SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRES

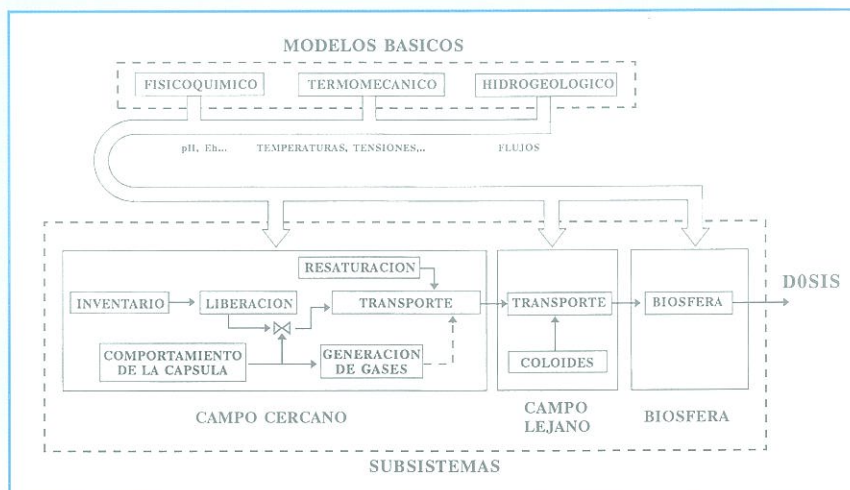
El objetivo del proceso metodológico: obtención de información, desarrollo de escenarios y modelización predictiva, es la realización de una evaluación integrada, que permita cuantificar el comportamiento del sistema en la forma de consecuencias radiológicas en función del tiempo.

Para cada uno de los escenarios y modelos conceptuales considerados en la evaluación de comportamiento, es necesario realizar un análisis de sus consecuencias radiológicas. Este análisis consiste en la realización de los cálculos que permitan evaluar las potenciales consecuencias del escenario, mediante la consideración en el modelo matemático de los valores de cada parámetro y de las condiciones de contorno necesarias.

Asociado con los resultados de cualquier evaluación siempre aparecen en mayor o menor grado unos rangos de incertidumbre. En el caso particular de las evaluaciones de seguridad para los almacenamientos geológicos, los análisis de incertidumbre se tornan en unas tareas obligadas debido a las grandes extrapolaciones en el tiempo y en el espacio que es preciso considerar.

Por otra parte, como parte de la evaluación de seguridad, los estudios de sensibilidad permiten determinar los elementos o parámetros más relevantes para la seguridad y dirigir los trabajos de I+D hacia aquellas áreas de interés, optimizando los esfuerzos de investigación.

F VIII. Submodelos del sistema de referencia



INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Paralelamente a los trabajos de diseño y evaluación de comportamiento se desarrolla en la actualidad el tercer Plan de I+D, que tiene las siguientes áreas de actividad:

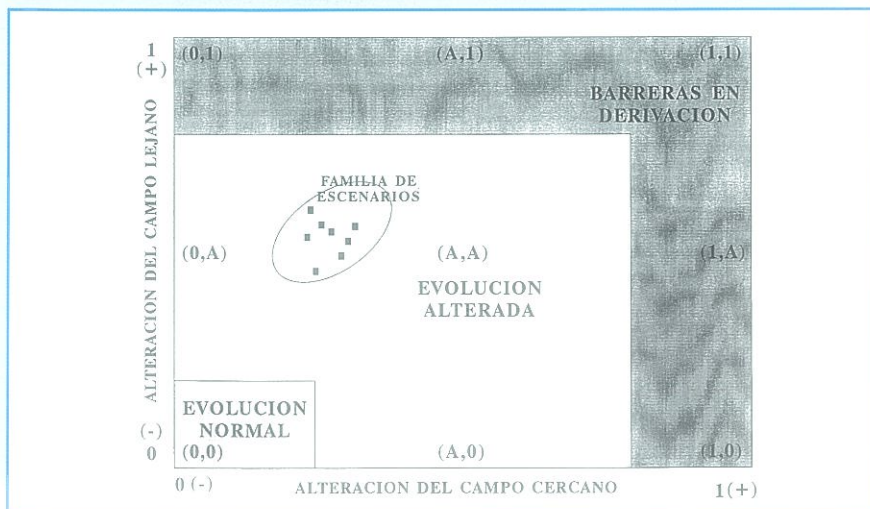
- A: Campo Próximo: Combustible, Cápsulas y Barreras de Ingeniería.
- B: Campo lejano/geosfera: Granitos, Sales, Arcillas, Modelización y análogos naturales.
- C: Biosfera.
- D: Evaluación del Comportamiento del sistema integrado.

Los trabajos en las diferentes áreas se llevan a cabo en coordinación con las actividades de Diseño y Evaluación de Comportamiento, con el objetivo de suministrar las bases científicas que permitan demostrar la seguridad a largo plazo del diseño de almacenamiento adoptado.



Juan Luis SANTIAGO es Ingeniero de Caminos, Master of Science por la Universidad de Michigan (USA), y M.B.A. por el Instituto de Empresa de Madrid. Posee más de 15 años de experiencia en el área de gestión de residuos industriales y radiactivos y desde 1987 pertenece a ENRESA donde ha dirigido el proyecto de clausura de la Fábrica de Uranio de Andújar. Actualmente, es el Jefe del Departamento de Tecnología del Almacenamiento Profundo y responsable del almacenamiento definitivo de residuos de alta actividad.

FVII. Representación del sistema total



Jesús Alonso DÍAZ-TERÁN es Ingeniero por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid y Diplomado por la Ecole Supérieure d'Electricité de París. Durante más de catorce años trabajó en el área de construcción de Centrales Nucleares. Entró en ENRESA en 1986 donde trabaja desde entonces en el Departamento de Seguridad y Licenciamiento. Es miembro de diversos grupos técnicos del Organismo Internacional de Energía Atómica y de la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE.