

**Aplicación de los
análogos a la evaluación
de seguridad y comunicación
del almacenamiento geológico.
Síntesis ilustrativa**

i+d

Colección Documentos I+D 10.2004

Aplicación de los
análogos a la evaluación
de seguridad y comunicación
del almacenamiento geológico.
Síntesis ilustrativa

Aplicación de los análogos a la evaluación de seguridad y comunicación del almacenamiento geológico. Síntesis ilustrativa

Autores: Carmen Ruiz López, Javier Rodríguez* (CSN)

Pedro Hernán (Enresa)

Fernando Recreo, Celsa Ruiz, Pedro Prado (Ciemat)

M. José Gimeno, Luis F. Auqué, Javier Gómez,
Patricia Acero, Álvaro González (U. de Zaragoza)

Javier Samper, Luis Montenegro, Jorge Molinero,
Jordi Delgado (U. de La Coruña)

Antonio Criado, J. Antonio Martínez, Susana Ruiz (UCM)

* Hasta septiembre de 2002, fecha en que se incorporó al IGME

Agradecimientos:

El Área de Residuos de Alta Actividad y el equipo que ha participado en este estudio agradecen a Eva Salas Sánchez (Iberinco) la labor de coordinación del trabajo y revisión para la edición de esta publicación desde septiembre de 2002.

Colección
Documentos I+D
10.2004

enresa



El estudio “La aplicación de los análogos naturales y arqueológicos a la evaluación de la seguridad del almacenamiento geológico de residuos de alta actividad y la comunicación” promovido por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), se ha desarrollado mediante un Acuerdo Específico con la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. (Enresa), el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) y las Universidades de Zaragoza (UZ), La Coruña (UDC) y Complutense de Madrid (UCM).

La iniciativa, planificación y dirección del estudio han correspondido al Área de Residuos de Alta Actividad del CSN, que ha actuado como coordinador del mismo y realizado la revisión del documento y la edición para su publicación.

Enresa ha participado en la coordinación técnica del proyecto y ha facilitado su información sobre los conceptos de almacenamiento geológico en España y sus estudios previos de análogos.

El equipo de trabajo del Departamento de Impacto Ambiental de la Energía del Ciemat ha actuado como apoyo a la coordinación del proyecto y la revisión del documento y colaborado en los temas relativos a las metodologías de evaluación del comportamiento de sistemas de almacenamiento.

El grupo de Modelización Geoquímica del Departamento de Ciencias de la Tierra de la UZ ha aportado su conocimiento y experiencia en la geoquímica e hidrogeoquímica y ha realizado las fichas resumen de descripción de los análogos naturales incluidas en el documento.

El grupo de Hidrología Subterránea de la E.T.S. Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la UDC ha aportado su conocimiento y experiencia en los aspectos relacionados con la hidrogeología y modelos de flujo y transporte.

El grupo de Tecnología Mecánica y Arqueometalurgia de la Facultad de Ciencias Químicas de la UCM ha aportado la descripción de los análogos arqueológicos más significativos seleccionados, incluidas sus fichas resumen.

Copyright. Consejo de Seguridad Nuclear

Publicado y distribuido por:
Consejo de Seguridad Nuclear
Justo Dorado, 11. 28040 - Madrid
<http://www.csn.es>
Peticones@csn.es

Maquetación: Din Impresores, S.L.
Imprime: Artegraf, S.A.

Depósito Legal: M-47103-2004

Índice

INTRODUCCIÓN	11
1.1. Descripción del estudio de Análogos Naturales.....	14
1.2. Objeto y estructura de la publicación	17
ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE LOS RESIDUOS DE ALTA ACTIVIDAD	19
1. Concepto multibarrera: Componentes y funciones del sistema de almacenamiento	20
2. La evaluación del comportamiento y la seguridad a largo plazo	25
3. Argumentos para la adquisición e incremento de la confianza	28
EL CONCEPTO DE ANÁLOGO.	
EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS ESTUDIOS DE ANÁLOGOS	31
ANALOGÍAS DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO	37
1. Analogías de materiales y componentes del sistema.....	38
1.1. El residuo radiactivo: Formas químicas	39
1.2. El contenedor metálico: materiales Fe y Cu	42
1.3. Materiales de relleno y sellado	43
1.4. La geosfera	46
2. Analogías que ilustran los procesos de evolución del sistema de almacenamiento	47
2.1. Disolución de la matriz de residuo (combustible gastado o vidrio de reproceso).....	49
2.2. Criticidad	50
2.3. Radiólisis	50
2.4. Corrosión	50
2.5. Procesos de disolución precipitación de impurezas en la bentonita	51
2.6. Procesos de disolución-precipitación en campo variable de temperatura: cementación en la barrera bentonítica	51
2.7. Transformación de esmectita a illita: illitización	51
2.8. Especiación-solubilidad: cálculo de los límites de solubilidad.....	52
2.9. Degradación del cemento: generación y evolución de la pluma hiperalcalina	52
2.10. Flujo de fluidos	53
2.11. Advección y dispersión	53
2.12. Difusión molecular	53
2.13. Procesos de interacción agua-roca	54
2.14. Procesos de retardo: sorción y precipitación/ coprecipitación	54
2.15. Estado redox y frentes redox	55
2.16. Generación y transporte de coloides	56
2.17. Procesos microbiológicos	56
2.18. Procesos acoplados	56

CONTRIBUCIÓN DE LOS ANÁLOGOS A LAS ÁREAS DE LA EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD	61
1. Definición del sistema (diseño conceptual)	62
2. Análisis de escenarios y desarrollo de modelos	63
3. Aportación de datos cuantitativos	64
4. Comprobación de modelos y bases de datos	64
APLICACIÓN DE LOS ANÁLOGOS EN LA COMUNICACIÓN.....	69
1. Métodos y soportes del uso de los análogos en la comunicación.....	70
2. Aspectos del AGP ilustrados mediante el uso de los análogos.....	72
3. Identificación de audiencias y estrategias de comunicación.....	72
FICHAS ILUSTRATIVAS DE LOS ANÁLOGOS SELECCIONADOS	77
1. Selección de los análogos a considerar en el Proyecto.....	78
2. Descripción de análogos: fichas ilustrativas	82
2.1. Yacimientos de uranio	83
2.2. Materiales arcillosos	97
2.3. Ambientes hipercalinos	102
2.4. Yacimientos arqueológicos	107
CONCLUSIONES	119
REFERENCIAS	125
ANEXOS	
ANEXO A. EJERCICIOS DE EVALUACIÓN DE COMPORTAMIENTO Y/O SEGURIDAD DE SISTEMAS DE AGP MÁS SIGNIFICATIVOS	133
ANEXO B: ANALOGÍAS DE LOS PROCESOS QUE PUEDEN TENER LUGAR EN UN SISTEMA DE AGP	137
ANEXO C: GLOSARIO DE TÉRMINOS	161
ANEXO D: INDICE DE ACRÓNIMOS	181
ANEXO E: BASE DE DATOS DOCUMENTAL	185

PRÓLOGO

Existe un amplio consenso en la comunidad científica de que el almacenamiento de los residuos radiactivos de larga vida en instalaciones de ingeniería ubicadas en formaciones geológicas profundas (AGP) es la solución técnicamente disponible para el aislamiento de dichos residuos del hombre y el medioambiente durante el tiempo necesario para que no representen un riesgo inaceptable. Igualmente se reconoce que las decisiones para llevar a cabo esta solución tienen un componente no solamente técnico sino social, que requiere un proceso transparente y abierto.

La estrategia contemplada hasta ahora en el programa nacional para la gestión de los residuos de alta actividad y larga vida, a través de los sucesivos Planes Generales de Residuos Radiactivos (PGRR) aprobados por el Gobierno, es su disposición en una instalación de AGP, si bien no se tomará una decisión al respecto hasta el año 2010, de acuerdo con lo estipulado en el PGRR en vigor¹.

El análisis de la seguridad de estos sistemas de almacenamiento requiere el conocimiento de su comportamiento durante largos periodos de tiempo. Aunque gran parte de los conocimientos necesarios pueden obtenerse de estudios de campo y de laboratorio, el uso de evidencias o fenómenos naturales y arqueológicos que se han dado en escalas de tiempo comparables a los periodos de tiempo en consideración, puede servir como soporte de los argumentos técnicos que se utilizan en la evaluación de la seguridad de estos sistemas y su ilustración al público y a audiencias no técnicas.

Los análogos naturales, arqueológicos y antropogénicos o industriales, conocidos como sistemas que tienen alguna similitud con los componentes sucesos o procesos de los sistemas de AGP han sido objeto de numerosos estudios e investigaciones durante las últimas décadas, y han producido importante documentación ampliamente diseminada.

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)², como organismo responsable de la seguridad y la protección radiológica, tiene la función de realizar la evaluación de seguridad de cualquier instalación que implique el uso, manejo o almacenamiento de sustancias radiactivas y materiales nucleares previamente a su autorización, incluyendo las instalaciones de almacenamiento de combustible nuclear gastado y de residuos radiactivos. Adicionalmente, el CSN tiene la función de realizar los estudios, evaluaciones e inspecciones de los planes, programas y proyectos necesarios para todas las fases de la gestión de los residuos radiactivos³ (www.csn.es).

¹ El 5º PGRR vigente en la actualidad está disponible en la página web de Enresa (www.enresa.es)

² Ley 15/1980 de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear

³ Ley 14/1999 de 4 de mayo, de Tasas y Precios Públicos por servicios prestados por el Consejo de Seguridad Nuclear.

Los objetivos estratégicos del CSN⁴ relativos a la seguridad de gestión del combustible irradiado y los residuos de alta actividad consideran la necesidad de realizar el seguimiento de las actividades desarrolladas en el ámbito internacional para valorar su potencial aplicación al caso español, y de participar en el desarrollo de metodologías de evaluación de la seguridad, de acuerdo con el calendario y objetivos de los Planes Generales de Residuos Radiactivos.

De acuerdo con lo anterior, el CSN ha venido realizando un importante esfuerzo de seguimiento y participación de las actividades internacionales sobre la gestión a largo plazo del combustible gastado y los residuos de alta actividad, especialmente desde la mitad de los años noventa, y ha desarrollado una serie de estudios relativos a la evaluación de la seguridad de sistemas de AGP, a fin de disponer de las bases científicas y técnicas para evaluar en su día las solicitudes que puedan hacerse de acuerdo con las estrategias contempladas en el programa nacional.

En este marco, el CSN ha promovido y desarrollado un estudio sobre “La aplicación de los análogos naturales y arqueológicos a la evaluación de la seguridad del almacenamiento geológico de residuos de alta actividad y la comunicación”.

Dicho estudio, denominado abreviadamente “Análogos Naturales”, ha tenido como objetivo general la recopilación y revisión de los trabajos e investigaciones de análogos más relevantes llevados a cabo en las últimas décadas y publicados hasta la fecha para obtener una visión del estado del arte sobre el potencial de los análogos y el uso real que de ellos se está haciendo en los ámbitos señalados. El estudio ha sido llevado a cabo con la colaboración de Enresa⁵ y ha sido realizado por un equipo multidisciplinar del Ciemat y de las universidades de Zaragoza (UZ), La Coruña (UDC) y Complutense de Madrid (UCM).

La motivación del CSN para la realización del estudio de Análogos Naturales surgió en 1997 a raíz del interés creciente de los análogos naturales en el ámbito internacional puesto de manifiesto en el documento técnico del Organismo Internacional de Energía Atómica sobre la toma de decisión reguladora en presencia de incertidumbres⁶ y en el documento de la Agencia de Energía Atómica de la OCDE sobre la confianza en la seguridad a largo plazo de los sistemas de AGP⁷.

⁴ Plan de Orientación Estratégica del CSN. Aprobado por pleno el 5 de febrero de 1998

⁵ En virtud del Convenio Marco de Colaboración CSN-Enresa de 2 de junio de 1998 para el desarrollo de actividades de investigación de interés común, sin que pueda afectar a sus respectivas funciones en los procesos de autorización y control de acuerdo con la legislación nacional aplicable.

⁶ Regulatory decision making in the presence of uncertainty in the context of the disposal of long lived radioactive wastes. Third report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal. TECDOC-975, International Atomic Energy Agency, Viena, Austria Octubre 1997.

⁷ Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories. Its Development and Communication. OECD Nuclear Energy Agency, París, Francia, 1999.

Los resultados del estudio de Análogos Naturales, como se indica posteriormente, en parte presentados en diferentes foros nacionales e internacionales, se han estructurado en varios documentos con diferente grado de detalle y contenido técnico dirigidos a distintos colectivos.

La presente publicación es una *síntesis ilustrativa* del estudio sobre “La aplicación de los análogos naturales y arqueológicos a la evaluación de la seguridad del almacenamiento geológico de residuos de alta actividad y la comunicación”. Esta síntesis parte de una descripción general del almacenamiento geológico y su evaluación de la seguridad, define el concepto de análogo y su evolución histórica y presenta un resumen de la aportación potencial y real de los análogos analizados a la evaluación de la seguridad y la comunicación, con su descripción en forma de fichas para hacerlo asequible a un colectivo más amplio.

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos de alta actividad (RAA) están constituidos fundamentalmente por el combustible gastado procedente de las centrales nucleares, cuando ha sido declarado como residuo, y por los residuos vitrificados procedentes del reproceso o reciclado de este combustible. Se caracterizan por contener concentraciones elevadas de radionucleidos de vida corta y media y concentraciones considerables de radionucleidos de vida larga, y además generan grandes cantidades de calor.

Estos residuos, pueden ser almacenados temporalmente de manera segura en instalaciones vigiladas y controladas durante varias decenas de años. Sin embargo, dado que pueden representar un riesgo para el hombre y el medio ambiente durante períodos de tiempo de cientos de miles de años, la estrategia de gestión con mayor consenso internacional es su aislamiento en instalaciones construidas en formaciones geológicas a varios cientos de metros de profundidad.

Los sistemas de Almacenamiento Geológico Profundo (AGP) se basan en la interposición de un sistema pasivo de barreras múltiples de ingeniería y naturales entre el residuo y la biosfera, que permiten el aislamiento y la retención de los radionucleidos almacenados de modo que no supongan un riesgo inaceptable para las personas y el medio ambiente en el momento actual ni en el futuro.

La evaluación de la seguridad de los sistemas de AGP requiere realizar previsiones del comportamiento de los diferentes materiales que componen sus barreras y del propio sistema en su conjunto ante sucesos y procesos que pueden tener lugar en periodos de cientos de miles de años, y evaluar sus consecuencias radiológicas a largo plazo. El objetivo final es alcanzar una *seguridad razonable* de que las consecuencias de los sucesos y procesos que pueden afectar al sistema no excederán los límites reguladores establecidos.

Gran parte del conocimiento del comportamiento de los materiales que componen un sistema de almacenamiento y de los procesos por los que se verán afectados puede obtenerse de los experimentos de campo y de laboratorio. No obstante, debido fundamentalmente a los largos periodos de tiempo que deben considerarse, la evaluación de la seguridad del AGP a largo plazo necesita recurrir a la modelización predictiva del comportamiento, junto con un riguroso análisis de las incertidumbres en las predicciones.

Para abordar las incertidumbres existentes, se reconoce que la evaluación cuantitativa de la seguridad debe completarse con otros argumentos adicionales (en lo que se denomina uso de *múltiples líneas de razonamiento*), con el objetivo de aumentar la confianza en la seguridad y su comunicación a los agentes implicados en las decisiones para el desarrollo del AGP. De este modo se configura el denominado “Estudio de Seguridad”, que además del análisis cuantitativo de la seguridad, que sigue formando el núcleo de su demostración, incluye los resulta-

dos de múltiples líneas de razonamiento para servir de base y apoyar dicha seguridad del sistema de almacenamiento (NEA, 1997a; OIEA, 1997, 2002).

Los estudios de *análogos naturales*, definidos como “la presencia en el medio ambiente de materiales o procesos que son similares o que pueden relacionarse con aquéllos que se predice ocurrirán en alguna parte del sistema de almacenamiento” (OIEA, 1989), constituyen una de estas “múltiples líneas de razonamiento” para el aumento de la confianza en la seguridad del AGP, ya que pueden ayudar a entender y explicar el comportamiento a largo plazo de materiales similares a los que formarán parte de los almacenamientos de residuos, a identificar los sucesos y procesos que les pueden afectar y a desarrollar modelos más adecuados para su representación.

La mayor parte de los estudios sobre análogos naturales y arqueológicos han sido promovidos por las agencias de gestión de residuos y se han desarrollado en el ámbito de la colaboración internacional dentro de los sucesivos Programas Marco de la Comisión Europea (CE), y de organismos internacionales como la OIEA y la NEA, entre otros. Además, algunos organismos reguladores como los de Canadá (AECB), Estados Unidos (NRC), Finlandia (STUK), Reino Unido (HMIP) y Suecia (SKI) han desarrollado proyectos propios o colaborado en los proyectos internacionales más significativos, relacionados generalmente con los diseños de AGP de sus respectivos países, a fin de tener sus propias bases y juicio. De este modo:

- AECB ha desarrollado estudios propios de análogos en yacimientos de uranio del escudo canadiense dirigidos principalmente a conocer el comportamiento del combustible y el transporte de radionucleidos en medios fracturados.
- HMIP (la actual UKAEA) ha participado en los proyectos internacionales de Poços de Caldas (Brasil), y de Maqarin (Jordania) tras haber llevado a cabo una serie de proyectos en análogos nacionales del Reino Unido como Needles Eye, Broubster y South Terras a finales de los 80.
- NRC, que ya desarrolló un proyecto de análogos en una serie de yacimientos de uranio en el período 1981-1987 y participó en el proyecto internacional de Koongarra (Australia) financiado por la NEA (1987-1992), ha centrado recientemente una parte de sus investigaciones en el estudio de los análogos de Peña Blanca (Méjico) y Santorini (Grecia).
- SKI ha participado en el proyecto internacional del análogo de Koongarra, donde ha tratado de comprobar la aplicabilidad al estudio de estos sistemas naturales de metodologías propias desarrolladas en el campo de la evaluación de la seguridad del AGP como la metodología de desarrollo de escenarios.
- STUK ha participado en el proyecto internacional desarrollado en Palmottu (Finlandia) desde 1988 con objeto de conocer los procesos de transporte de radionucleidos en medios fracturados similares a los considerados para el emplazamientos de un sistema de AGP en el programa de Finlandia.

El interés y potencial de los análogos desde el punto de vista regulador, ha sido también reconocido en desarrollos normativos recientes como los requisitos de seguridad para el almacenamiento geológico de la OIEA⁸ y el 10 CFR Part 63 de la NRC en EE UU⁹

Por su parte el CSN, ya en 1997, a la vista del interés creciente de los análogos naturales en el ámbito internacional como una de las aproximaciones para el incremento de la confianza en la evaluación de la seguridad de los sistemas de AGP, llevó a cabo un trabajo preliminar sobre el papel de los análogos naturales en la evaluación de seguridad del *Almacenamiento Geológico Profundo de los residuos de alta actividad* (CSN, 1997), que puso de manifiesto el gran número de trabajos de análogos realizados y la gran cantidad y dispersión de la información sobre el tema, y corroboró el interés de profundizar en su estudio.

A la vista de lo anterior, en 1999, el CSN decidió llevar a cabo el estudio “*Análogos Naturales*” para revisar y analizar los resultados de los trabajos de análogos más significativos, e identificar su aportación potencial y real a la evaluación de la seguridad de los sistemas de almacenamiento de residuos de alta actividad y a su comunicación, y obtener así una visión actualizada y global del tema, que se describe a continuación.

1.1. Descripción del estudio de Análogos Naturales

El estudio sobre “La aplicación de los análogos naturales y arqueológicos a la evaluación de la seguridad del almacenamiento geológico de residuos de alta actividad y la comunicación”, promovido por el CSN, denominado abreviadamente *Análogos Naturales*, ha tenido como *objetivo* obtener un mejor conocimiento de su potencial aplicación a la evaluación de seguridad de los sistemas de AGP y a la comunicación a audiencias no técnicas y de la aplicación real que de ellos se ha realizado hasta la fecha en los dos ámbitos señalados, con el fin obtener una visión del estado del arte como base para la definición de futuras posiciones y líneas de actuación en este campo.

El estudio ha incluido la revisión y análisis de los análogos naturales y arqueológicos más significativos realizados en el ámbito nacional e internacional y bien documentados en la bibliografía existente, haciendo especial hincapié en aquéllos más relevantes para los conceptos de AGP en formaciones graníticas y arcillosas, por ser estos los se encuentran en una fase más avanzada en el progra-

⁸ Geological Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standard Series-Draft Safety Requirements DS 154, 2002.10-14. OIEA, 2003. (pendiente de ser aprobado por la Comisión de Safety Standard, CSS)

⁹ U.S. Nuclear Regulatory Commission. 10 CFR Part 63, Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Proposed Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada. Proposed rule 10 CFR Part 63.

ma español. No se ha considerado, en principio, dentro del alcance del proyecto el estudio de los análogos de almacenamientos en superficie de residuos de baja y media actividad (si bien en el estudio se han considerado analogías de materiales que también forman parte de estas instalaciones), ni los análogos antropogénicos, de aplicación principalmente al campo de la transferencia de radionucleidos en la biosfera.

Los *equipos participantes* en el estudio han sido el departamento de Impacto Ambiental de la Energía del Ciemat, el grupo de Modelización Geoquímica del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza (UZ), el grupo de Hidrología Subterránea de la E.T.S. Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad de La Coruña (UDC) y el grupo de Tecnología Mecánica y Arqueometalurgia de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM). Estos equipos cuentan con experiencias en metodologías de evaluación del comportamiento del AGP (Ciemat); estudio y modelización de procesos hidro-geoquímicos (UZ); estudio y modelización de procesos hidrogeológicos y termo-hidro-geoquímicos (UDC); e investigación de procesos de corrosión y cambios microestructurales y mecánicos de piezas metálicas (UCM). Enresa mostró su interés en los resultados de este proyecto, en el que participa en virtud del Convenio Marco de Colaboración firmado con el CSN en junio de 1998.

El estudio ha comprendido la realización de las actividades genéricas siguientes:

- *Revisión bibliográfica, análisis general y clasificación de la información de los estudios de análogos* existentes, y *selección* de los más relevantes de acuerdo con el objetivo y alcance del proyecto, así como identificación de los componentes y procesos de un sistema de AGP y de las áreas de la evaluación de la seguridad, que podrían nutrirse de la información de estos estudios.
- *Descripción detallada de los análogos seleccionados* de acuerdo con el objetivo y alcance del proyecto.
- *Análisis detallado de la aplicación de los estudios de análogos a la evaluación de la seguridad de los sistemas de AGP.* Para ello se estudió un amplio conjunto de evaluaciones del comportamiento y la seguridad de sistemas de AGP realizados por agencias y organismos reguladores de numerosos países, para analizar el uso real de la información de los análogos en la evaluación de la seguridad, en cuanto a la definición del concepto y diseño del almacenamiento, el análisis de escenarios, el desarrollo de modelos conceptuales y el aumento de confianza en los mismos.
- *Análisis de las estrategias e información existentes sobre el uso de los análogos en la comunicación al público del concepto y los aspectos relevantes de la seguridad del AGP,* mediante la recopilación y análisis del material y soporte desarrolla-

do por organismos reguladores, agencias de residuos y otras organizaciones (artículos, folletos, vídeos, páginas webs, etc.), en el que se ha utilizado la información de los análogos con fines divulgativos.

Para la realización del estudio, dada su naturaleza de revisión y análisis del estado del arte y la gran cantidad y dispersión de los trabajos publicados hasta la fecha, fue necesario llevar a cabo una importante labor de *recopilación bibliográfica*, tanto de los propios trabajos e investigaciones de análogos como de los estudios de la evaluación del comportamiento y de la seguridad de los sistemas de AGP, que ha comprendido la recolección de:

1. La información sobre análogos naturales existente en las publicaciones de síntesis y resultados de los proyectos de investigación de análogos, así como aquella resultante de los trabajos desarrollados por agencias de residuos, organismos reguladores y organismos internacionales como la OIEA, la NEA y la CE (en particular, las publicaciones del grupo trabajo sobre análogos naturales (NAWG).
2. Los informes de evaluación de la seguridad, documentos sobre verificación y validación de modelos, ejercicios internacionales de intercomparación/aumento de confianza en los modelos, documentación técnica específica sobre los distintos procesos del sistema de AGP analizados etc., con el fin de identificar la aplicación de los análogos a las distintas áreas de la evaluación de la seguridad.
Los ejercicios de evaluación revisados han sido los realizados más recientemente en países con programas de AGP más avanzados (Canadá, EEUU, Finlandia, Japón, Suecia, Suiza) y los ejercicios españoles, prestando especial atención a los ejercicios desarrollados en formaciones graníticas y arcillosas.
3. Adicionalmente, en relación con el objetivo la identificación del uso de análogos en la comunicación, se han analizado y revisado los distintos soportes de divulgación existentes (folletos, vídeos, páginas web, etc.) en los que se hace referencia a los análogos para ilustrar y comunicar al público aspectos relevantes de los sistemas de AGP y de su seguridad.

Con el objetivo de sistematizar la información recopilada y utilizada en el desarrollo del estudio, y organizarla para poder establecer relaciones entre diferentes campos de información (organizaciones implicadas y proyectos de análogos; autores y sus campos de especialidad; materiales, procesos y áreas de evaluación de la seguridad de un sistema de AGP y potenciales analogías), por su utilidad para el propio estudio y para posteriores usos, se elaboró una base de datos con 1.800 referencias, desarrollada y alimentada por la Universidad de Zaragoza.

Los *resultados* del estudio se han estructurado en documentos con diferente grado de detalle y contenido técnico dirigidos a diferentes audiencias, que se indican a continuación:

- Una *síntesis ilustrativa* general del proyecto de análogos, dirigida a una amplia audiencia técnica no necesariamente familiarizada con el tema, que constituye la presente publicación.
- Un *catálogo de los análogos* seleccionados, con la descripción detallada de los mismos, dirigido a una audiencia técnica especializada y que constituye un segundo volumen que completa esta publicación.
- El estudio sobre el *estado del arte* de la aplicación potencial y real de los análogos a la evaluación de la seguridad y la comunicación de los sistemas de almacenamiento geológico de los residuos de alta actividad, que constituye el resultado más importante desde el punto de vista técnico. Se ha editado como documento interno y está en fase de revisión para su publicación.
- Una *base de datos bibliográfica* con la información sintetizada e interrelacionada de todos los documentos analizados durante el proyecto, que incluye unas 1.800 referencias en el área de los análogos y de la evaluación de la seguridad.

Algunos de estos resultados han sido presentados en reuniones y conferencias nacionales (*Jornadas de I+D del CSN* de 2002; 29 Reunión de la *Sociedad Nuclear Española* de 2003) e internacionales (*Migration'03*: 9ª Conferencia internacional sobre química y migración de actínidos y productos de fisión en la geosfera). Además, el estudio se ha presentado en la 1ª Reunión del Proyecto NANet de la CE¹⁰, en el que participa el CSN gracias a la experiencia adquirida en este estudio y en el *Workshop patrocinado por EPRI* sobre la aplicación de los análogos para evaluar la adecuación de los modelos empleados en la evaluación del comportamiento de los almacenamientos de residuos radiactivos (octubre, 2003).

2. OBJETO Y ESTRUCTURA

La presente publicación tiene por objeto presentar de forma abreviada y sencilla a una amplia audiencia no necesariamente técnica, los resultados del proyecto Análogos Naturales del CSN. En el documento se explica el concepto de almacenamiento geológico de los residuos y su analogía con sistemas y fenómenos naturales y arqueológicos que facilitan su comprensión. Se incluye una descripción resumida en forma de fichas de los análogos seleccionados y analizados en el proyecto, y una presentación abreviada de su aportación potencial y real a la evaluación de la seguridad y a la comunicación.

10 NANET: "Network to review natural analogue studies and their applications to repository safety assessment and public communication" (Red de revisión de estudios de análogos naturales y de sus aplicaciones a la evaluación de la seguridad de sistemas de almacenamiento y a la comunicación al público)

Este documento de síntesis del proyecto comprende siete capítulos, además de la Introducción (capítulo 1) y del presente capítulo (capítulo 2).

En el capítulo 3 se expone el concepto de almacenamiento geológico profundo para residuos de alta actividad, incluyéndose las características generales de los sistemas de AGP contemplados en la actualidad en los programas de diferentes países y en el programa español, la estrategias para la evaluación de la seguridad a largo plazo de dichos sistemas de almacenamiento, así como las aproximaciones para el aumento de la confianza en la misma.

En el capítulo 4 se presenta el concepto de análogo y la evolución histórica de los estudios de análogos.

En el capítulo 5 se describen las analogías de los diferentes componentes de un sistema de almacenamiento geológico de residuos radiactivos y de los procesos que en él tienen lugar, con los sistemas naturales y arqueológicos y los procesos operantes en los mismos.

En el capítulo 6 se identifican las distintas áreas de la evaluación de la seguridad que se consideran susceptibles de recibir apoyo desde el campo de los análogos naturales y se esboza la contribución de los estudios de análogos a dichas áreas de la evaluación de seguridad.

En el capítulo 7 se describe la aportación potencial de los análogos a la comunicación e ilustración de aspectos importantes de la seguridad del AGP.

Posteriormente, en el capítulo 8 se presenta el proceso de recopilación de información y de selección de análogos realizado en el curso del proyecto y se describen los análogos finalmente estudiados y su aportación a la evaluación de la seguridad y a la comunicación, agrupados en sistemas naturales (según el tipo de medio geológico) o en yacimientos arqueológicos. La descripción de los análogos se presenta de forma resumida, mediante fichas, para facilitar una difusión amplia a lectores no necesariamente familiarizados con el tema.

Por último, se incluye un capítulo 9 de conclusiones y aspectos de interés identificados en la realización del proyecto.

Adicionalmente, como anexo A, se adjunta una tabla de los ejercicios de evaluación de la seguridad y/o comportamiento de sistemas de almacenamiento de residuos más significativos, indicando sus objetivos y las organizaciones responsables de los mismos, ya que muchos de estos ejercicios se citan al describir la aportación real hasta la fecha de la información de los análogos a la evaluación de la seguridad. También se incluye una descripción más detallada de los procesos que pueden afectar a la evolución del sistema de AGP y sus analogías, que completa lo recogido al respecto en el capítulo 5 (anexo B). Además se añaden un glosario de términos (anexo C) y un índice de acrónimos (anexo D), con objeto de facilitar la comprensión de los conceptos y abreviaturas utilizadas en el texto.

Se adjunta en soporte CD-ROM la base de datos bibliográfica del estudio Análogos Naturales, con 1.800 referencias en el área de análogos y evaluación de la seguridad, cuya descripción se presenta en el anexo E del documento.

Almacenamiento geológico de los residuos de alta actividad

1. CONCEPTO MULTIBARRERA: COMPONENTES Y FUNCIONES DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Las instalaciones de almacenamiento geológico profundo se basan en sistemas pasivos de *barreras múltiples*, diseñados para *aislar* los residuos radiactivos y retener la actividad durante un tiempo suficiente como para asegurar que los riesgos a las generaciones futuras, debidos a las liberaciones potenciales de radionucleidos al medio ambiente, sean en todo caso inferiores a los límites hoy día aceptables, que son establecidos por las autoridades reguladoras de acuerdo con los principios y criterios de organismos internacionales.

El concepto multibarrera consiste en la interposición de una serie de barreras de ingeniería y naturales entre el residuo y la biosfera que proporcionen el aislamiento y la retención de los radionucleidos almacenados, confiriendo, en conjunto, la seguridad requerida para el sistema. Estas barreras, como se ilustra en la figura 1, comprenden la propia forma química del residuo, el contenedor en el que se dispone el residuo, los materiales de relleno y sellado del almacenamiento, y la formación geológica o “geosfera” en la que se ubica el sistema de almacenamiento. A continuación se describen sus principales funciones:

- La forma química del *residuo*, dada la gran estabilidad física y química tanto de la matriz de UO₂, en el caso del combustible gastado, como de la matriz vitrificada, en el de los residuos de alta actividad solidificados, limita la tasa de liberación de los radionucleidos presentes.
- El *contenedor metálico o cápsula*, fabricado con materiales con adecuada resistencia mecánica y a la corrosión, retarda la llegada de agua al residuo, proporcionando su aislamiento durante un periodo inicial variable dependiente del tipo de material, y además puede contribuir a mantener una química reductora favorable para la retención de los radionucleidos.
- La *bentonita*, que es el principal constituyente de los *materiales de relleno y sellado* en los conceptos de almacenamiento en medios graníticos y arcillosos, por sus adecuadas propiedades (baja permeabilidad, alta plasticidad, capacidad de hinchamiento, de filtrado, de retención, etc.), limita el flujo de aguas subterráneas hacia los bultos de residuo, proporciona un ambiente químico adecuado, acomoda las posibles tensiones mecánicas que pueden ejercerse sobre el bulto, disipa el calor del residuo, filtra partículas finas y coloides que han podido generarse y retiene o retarda el transporte de los radionucleidos liberados.
- La *geosfera*, protege las barreras de ingeniería, proporcionando la estabilidad mecánica y química a largo plazo necesarias, asegura un flujo de aguas subterráneas en el almacenamiento bajo y lento, y retiene o retarda al máximo

el transporte de los radionucleidos que han alcanzado la geosfera y su posible acceso a la biosfera. Además, la geosfera supone una barrera física para una potencial intrusión humana en la instalación de AGP. Los principales medios geológicos que están siendo considerados para el almacenamiento de residuos son formaciones salinas, medios arcillosos y graníticos.

En el ámbito de la evaluación del comportamiento del sistema de almacenamiento, se acostumbra a utilizar también los términos *campo próximo*, para designar al conjunto formado por el residuo, el contenedor, los materiales de relleno y sellado y la zona de roca significativamente alterada por el almacenamiento, y *campo lejano*, refiriéndose al resto de medio geológico. La *biosfera* se define como el medio vivo que constituye el receptor final de los radionucleidos que puedan liberarse desde el almacenamiento y sobre el que se analiza el impacto del mismo.

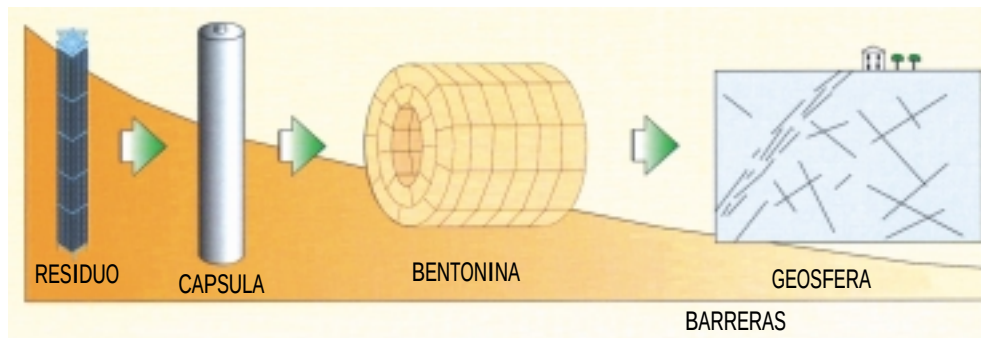


Figura 1. Esquema del concepto multibarrera de un AGP (Esquema cedido por Enresa)

De este modo, los diseños genéricos de AGP establecidos en la mayor parte de los programas nacionales contemplan el aislamiento de los residuos mediante su encapsulado en contenedores metálicos herméticos, que, rodeados de materiales arcillosos de relleno y sellado, se disponen en galerías excavadas a varios cientos de metros de profundidad en una formación rocosa estable.

Las diferencias entre conceptos de AGP se deben principalmente a la variedad de emplazamientos con características particulares disponibles en cada país, a los diferentes tipos de residuos a almacenar y al coste y disponibilidad de los materiales en consideración para las barreras de ingeniería. En la tabla 1 se comparan las características principales de los conceptos de AGP considerados en los países con programas de AGP más avanzados (Alemania, Bélgica, Canadá, EEUU, Finlandia, Francia, Japón, Suecia, Suiza).

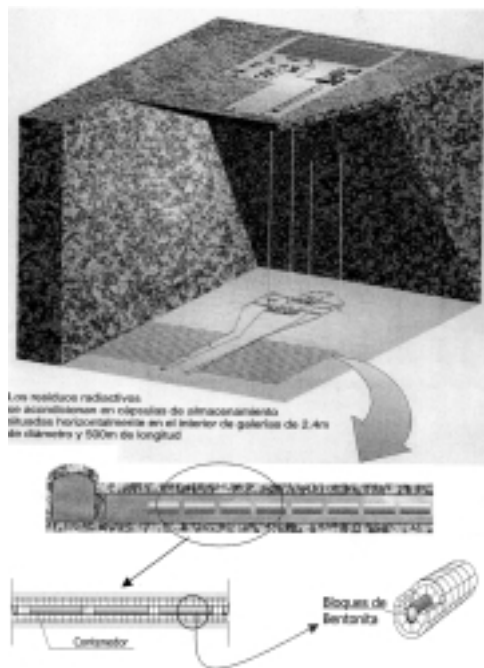
En España, en el marco de la estrategia de gestión a largo plazo de los residuos de alta actividad, el programa desarrollado por Enresa de acuerdo con lo dispuesto en los diferentes Planes Generales de Residuos Radiactivos (PGRR) aprobados por el Gobierno, ha incluido el estudio de diferentes tipos de formaciones geológicas (granitos, arcillas y sales) para el emplazamiento de un potencial sistema de AGP, si bien las actividades de investigación y desarro-

llo se encuentran notablemente más avanzadas para los diseños en arcilla y granito.

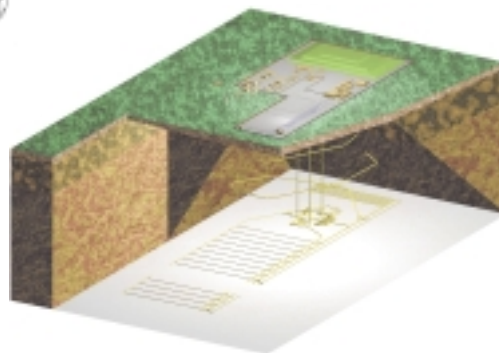
En el diseño conceptual de sistema de AGP en granito (figura 2), los elementos de combustible se alojan en contenedores de acero al carbono, y se disponen, rodeados de un buffer de bentonita compactada, en galerías horizontales perforadas a 500 metros de profundidad. Entre los contenedores y los bloques de bentonita se sitúa un revestimiento perforado de acero que permite introducir el contenedor en el receptáculo. Las galerías, túneles y demás cavidades del almacenamiento se rellenan con una mezcla compactada de bentonita y arena, y se disponen sellos de bentonita compactada en los túneles de acceso y otros lugares estratégicos.

El concepto de almacenamiento en arcilla (figura 3) es similar, con la diferencia de que las galerías horizontales en las que se disponen los contenedores, rodeados del buffer de bentonita compactada, están perforadas a 260 metros de profundidad en una formación arcillosa sedimentaria. Además el relleno de las cavidades de la instalación se consigue mediante la compactación de arcilla procedente de la excavación, con la excepción de las galerías de almacenamiento que se sellan con bloques de bentonita compactada.

*Figura 2.
Esquema de las
instalaciones
subterráneas del
concepto de AGP
en granito y
detalle de la
configuración del
contenedor y otras
barreras del
campo próximo en
dicho sistema de
AGP. (Esquema
cedido por Enresa)*



*Figura 3.
Esquema de las
instalaciones
subterráneas del
concepto de AGP
en arcillas. El
detalle de la
configuración del
campo próximo
sería como la del
concepto de AGP
en granito
incluida en la
Figura 2 (Figura
cedida por
Enresa)*



País	Residuo	Contenedor	Repositorio	Disposición	Relleno y sellado	Roca almacén	Emplazamiento
Alemania	Vitrificados y combustible gastado (LWR, THTR)	Acero inoxidable	Profundidad: 870 m	En pozos verticales individuales	Buffer y backfill de sal triturada en el concepto inicial	Sal en el concepto inicial de referencia	Goeben en el concepto de sal y Konrad en la formación oolítica
				En cámaras para el resto de residuos	Bentonita y mezcla de bentonita y arena, en otros tipos de roca	Ampliado a otros tipos de roca (sedimentaria oolítica, granito)	
Bélgica	Vitrificados, combustible gastado y TRU			En túneles horizontales	Recubrimiento de los túneles con cemento. Buffer: bloques de bentonita compactada. Backfill: roca almacén triturada	Arcilla	Mol
Canadá	Combustible gastado tipo CANDU (sin enriquecimiento de uranio y 8 GWD/TU de quemado)	Titanio y perlas de vidrio como material de relleno 1,36 tU/contenedor	Profundidad: 500 -1000m	En pozos verticales individuales perforados en las galerías	Buffer y backfill: mezcla de arcilla y arena silicea o granito triturado en diferentes proporciones	Granito	Sin especificar. Se usan los datos del laboratorio subterráneo de 'Lac du Bonnet', Whiteshell (Pinawa, Manitoba)
			Área de almacenamiento: 4 km ² Zona de exclusión*: 46m				
EEUU	Residuos TRU	Bidones, contenedores de acero	Profundidad: 657 m	En cámaras	Sal triturada y MgO	Sal	WIPP (Carlsbad, Nuevo Méjico)
EEUU	Vitrificados y combustible gastado LWR	Contenedor multicapa	Profundidad: 300m	En túneles horizontales	Sin buffer	Tobas compactas fracturadas no saturadas	Yucca Mountain
Francia	Vitrificados, combustible gastado y MOX	Aleación de hierro	Profundidad: 500 m Área de almacenamiento: 3,7 km ²	En túneles horizontales	Buffer y Backfill de arcilla	Arcilla	Meuse (Haute Marne)
Finlandia	Combustible gastado BWR Quemado: 36 GWD/TU	Cobre con contenedor interno de acero y relleno con material granular 1,6 tU/contenedor	Profundidad: 500 m Área de almacenamiento: 0,2 km ² Sin zona de exclusión	En pozos verticales individuales en las galerías	Buffer: bentonita Backfill: arena y bentonita	Granito	Olkiluoto, Eurajoki. Seleccionado a partir de la evaluación de cinco emplazamientos investigados

* Distancia a las zonas de fractura importantes

*Tabla 1.
Conceptos de AGP representativos de los países con programas de gestión de RAA más avanzados*

Tabla 1.
 (Continuación).
 Conceptos de
 AGP
 representativos
 de los países con
 programas de
 gestión de RAA
 más avanzados

País	Residuo	Contenedor	Repositorio	Disposición	Relleno y sellado	Roca almacén	Emplazamiento
Japón	Vitrificados del reproceso de combustible gastado LWR (PWR&BWR) Quemado: 33 Gwd/tU	Acero al carbono, Grueso overpack 1,4 tU/contenedor	Profundidad: 500 –1000m Área de almacenamiento: 5 km² Zona de exclusión sin especificar	En túneles horizontales	Buffer y Backfill de bentonita	Amplio rango de rocas cristalinas y sedimentarias	Sin especificar
Suecia	Combustible gastado LWR (BWR&PWR) Quemado: 38 Gwd/tU	Cobre con relleno de hierro 1,5 tU/contenedor	Profundidad: 600 m Área de almacenamiento: 0,9 km² Zona de exclusión 100 m	En pozos verticales individuales en las galerías	Buffer: bentonita Backfill: mezcla de arcilla y arena sílicea o granito triturado en diferentes proporciones	Granito	Aprobada por el gobierno sueco la caracterización en detalle de los emplazamientos de Forsmark, Simpevarp y Tierp
Suiza	Vitrificados del reproceso del combustible gastado LWR (BWR&PWR) Quemado: 33 Gwd/tU	Acero inoxidable, Grueso overpack 1,4 tU/contenedor	Profundidad: 1000 m Área de almacenamiento: 0,5 km² Zona de exclusión: 100 m	En túneles horizontales	Soporte de los contenedores de bloques de bentonita compactada Buffer y Backfill de bentonita granular	Granito en el concepto inicial. Ampliado a otros tipos de roca (arcilla opalina)	Dos áreas potenciales: basamento cristallino de Aargau (al N de Suiza) y arcillas opalinas de Zurcher Weinland

2. LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO Y LA SEGURIDAD A LARGO PLAZO

El desarrollo de un sistema de AGP tiene lugar en una serie de etapas sucesivas (selección del diseño conceptual, caracterización y selección de emplazamiento, construcción, operación, sellado y clausura de la instalación) y sigue un proceso de toma de decisiones largo y flexible, que permite la incorporación de los avances científicos y tecnológicos del refinamiento del sistema a medida que se progresa. La toma de decisiones asociada al desarrollo del AGP, implica evaluar la seguridad a largo plazo del sistema de almacenamiento, para poder tener una garantía razonable de que dicho sistema no supone un riesgo inaceptable para el medio ambiente ni para la salud de las generaciones actuales y futuras.

La realización de evaluaciones de la seguridad, es también un proceso iterativo, que tiene lugar a lo largo de las diferentes etapas del desarrollo del AGP y supone una actividad de integración y puesta en común de las bases científicas y técnicas adquiridas en el desarrollo del sistema hasta un determinado momento. Dicha evaluación requiere realizar previsiones del comportamiento de los diferentes componentes del almacenamiento y de los procesos que determinan su evolución, así como del propio sistema en su conjunto, y evaluar sus consecuencias radiológicas a largo plazo para su comparación con los límites aceptables.

En general, se reconoce que la evaluación de la seguridad a largo plazo de un sistema de AGP incluye las siguientes actividades interrelacionadas (NEA, 1991, 1997b y 1999a):

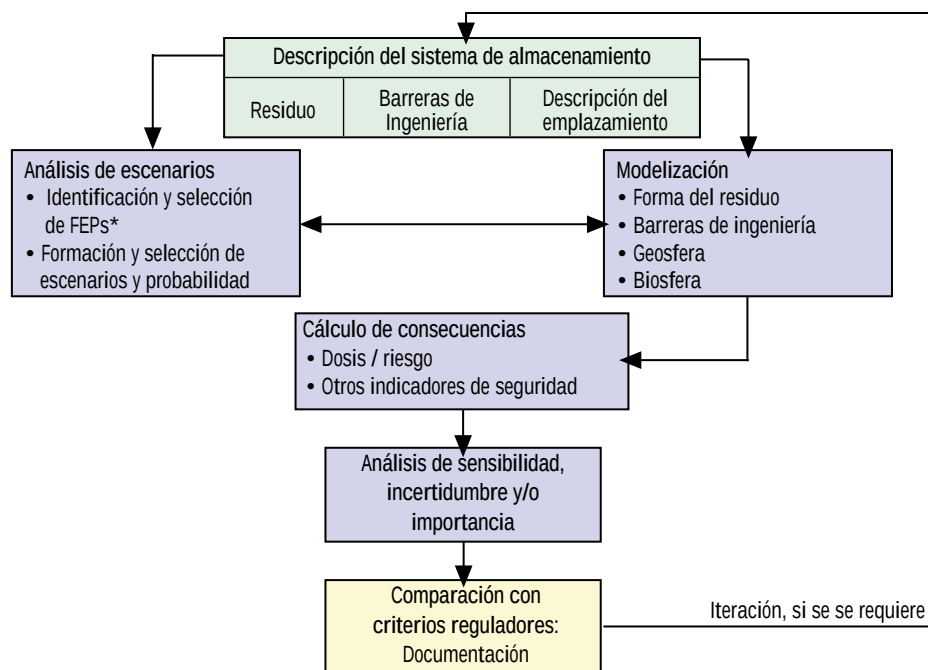
- La *definición del contexto* o premisas de la evaluación de seguridad.
- La *descripción del sistema*, mediante la identificación y caracterización del residuo o tipos de residuo, del diseño de las barreras de ingeniería y del emplazamiento (hipotético o real) considerados.
- La identificación y estudio de las potenciales situaciones futuras que puedan afectar el comportamiento a largo plazo del sistema ("*desarrollo de escenarios*"). Para ello, se identifican primero las características, sucesos y procesos importantes para la seguridad del almacenamiento y que pueden afectar su evolución (denominados FEPs¹¹), que se agrupan en FEPs internos al sistema de almacenamiento (sistema de referencia) y FEPs externos al mismo. La combinación de los FEPs del sistema de referencia da lugar al "escenario de referencia" o de evolución normal y la actuación de los FEPs externos sobre el sistema de referencia da lugar a otras situaciones futuras posibles o "escenarios alternativos".

¹¹ FEPs: Características, sucesos y procesos, del inglés Features, Events and Processes.

- *Desarrollo de los modelos* necesarios para representar el comportamiento del sistema, en cada uno de los escenarios considerados. El primer paso es el establecimiento del modelo conceptual, cuyas hipótesis se plasman después en modelos matemáticos y códigos de cálculo.
- *Evaluación integrada de comportamiento del sistema y de las posibles consecuencias radiológicas* derivadas del mismo, mediante la aplicación de los modelos formulados para los diferentes procesos y componentes del sistema de almacenamiento, una vez establecidos los parámetros de entrada y las condiciones de contorno de los mismos.
- *Análisis de la sensibilidad* de los resultados del cálculo de consecuencias frente a variaciones en las hipótesis o datos de partida y *análisis de las incertidumbres de la evaluación*, asociadas principalmente a las largas escalas temporales que deben considerarse.
- Comparación de los resultados con los objetivos de diseño y los criterios de seguridad y protección radiológica aplicables.

En la figura 4 se ilustran de forma simplificada los componentes de una evaluación de seguridad y su naturaleza iterativa.

Figura 4.
Representación esquemática de los componentes de la evaluación de la seguridad de un sistema de almacenamiento de residuos radiactivos.



* FEPs: Características, Sucesos y Procesos (del inglés Features, Events and Processes)

Aunque existe consenso internacional sobre esta aproximación general a la evaluación de la seguridad, las evaluaciones de seguridad realizadas dentro de los diferentes programas nacionales pueden variar en función de la fase de desarrollo del programa de AGP, de los objetivos del estudio, de los criterios de seguridad

aplicables, así como del tipo de residuo, del concepto de almacenamiento y del emplazamiento considerados (NEA, 1997b). Las actividades de organizaciones internacionales como la NEA, la OIEA y la CE son referencias clave para la definición del estado del conocimiento en este campo (NEA, 1991, 1997b, 1999a, 2000 y 2002; OIEA, 1996 y 1997; Baudoin et al., 2000).

En los últimos años se han producido numerosos hitos y avances significativos en los programas nacionales de AGP de países como EEUU, Finlandia y Suecia, entre los que cabe destacar:

- La entrada en operación en marzo de 1999 del almacenamiento geológico de WIPP (EEUU) para residuos de origen militar con transuránidos de vida larga, tras la certificación de la EPA en mayo de 1998.
- La ratificación del Parlamento finlandés de mayo de 2001 de la decisión del Gobierno de 2000 de iniciar los estudios de caracterización de detalle del emplazamiento de Olkiluoto seleccionado para el almacenamiento del CI.
- La decisión del Gobierno sueco de noviembre de 2001, que confirma el diseño del AGP conocido como KBS-3 y permite el inicio de los trabajos de investigación para la caracterización de tres emplazamientos potenciales.
- La aprobación del Congreso de los EEUU en julio de 2002 del emplazamiento de Yucca Mountain para el almacenamiento de los RAA de EEUU.

La toma de todas estas decisiones ha estado soportada en gran medida por una evaluación de la seguridad de los conceptos de AGP propuestos en cada caso (USDOE, 1996; Vieno y Nordman, 1999; SKB, 1999a; y USDOE, 1998) y su correspondiente evaluación independiente desarrollada por los organismos reguladores de cada país y, en algunos casos, por grupos de expertos en el marco de organizaciones internacionales. En el Anexo A se incluye un listado de los ejercicios de evaluación del comportamiento/ seguridad más significativos realizados en las últimas décadas por agencias de residuos y organismos reguladores de distintos países.

En España, Enresa ha realizado evaluaciones de la seguridad genéricas de los conceptos de AGP en formaciones graníticas y arcillosas:

- En 1997 publicó un primer ejercicio, de carácter preliminar (Enresa, 1997), con el objetivo de evaluar el diseño conceptual del AGP en un emplazamiento en granito, dando prioridad a alcanzar un entendimiento del funcionamiento global del sistema de almacenamiento que permitiera guiar actividades futuras en relación con el diseño, la selección de emplazamientos, estudios de I+D y la evaluación del comportamiento. Se buscó además implantar técnicas y metodologías de evaluación de la seguridad que permitiesen garantizar por un lado, transparencia en las fases de desarrollo del AGP y por otro, flexibilidad para las futuras actividades y ejercicios de evaluación.

- En cuanto al concepto de AGP en arcilla, se ha completado también una evaluación preliminar de la seguridad post-clausura, cuyos objetivos principales fueron obtener una comprensión global del funcionamiento del sistema y de las principales barreras del mismo, utilizar las técnicas metodológicas del ejercicio anterior en granito, y adquirir las bases científicas y tecnológicas de los procesos que rigen el comportamiento del AGP en un medio arcilloso (Enresa, 1999).
- Una vez desarrollada la metodología general de evaluación del comportamiento a largo plazo, implantado el sistema de trabajo y constituido el equipo en estos primeros ejercicios, la estrategia en este ámbito, de acuerdo con lo establecido en el PGRR vigente, consiste en mantener la capacidad de evaluación de la seguridad desarrollada, centrándose en la realización de ejercicios genéricos de evaluación, que se plasmarán en los ejercicios AGP-Básico en Granito y AGP-Básico en Arcillas, que integran los resultados de los programas de I+D y de los estudios de emplazamiento llevados a cabo por Enresa.

Por su parte, el CSN inició en 1997 un proyecto de intercomparación de los estudios de seguridad más significativos, realizados por agencias de residuos y organismos reguladores de otros países, con el objetivo general de adquirir capacidad reguladora propia, que permita al CSN abordar los desarrollos metodológicos, estudios y evaluaciones que puedan ser solicitados al Consejo en relación con el programa nacional del AGP. En concreto, con dicho proyecto se pretende: a) adquirir una visión amplia y sólida del estado del arte de las evaluaciones de seguridad de los sistemas de AGP, y b) asimilar los aspectos claves de este tipo de evaluaciones, analizando los aspectos en común y las diferencias en el tratamiento de dichos aspectos.

Los resultados del estudio, en el que se analizan un total de 14 ejercicios de evaluación de la seguridad realizados entre 1983 y 2000 en medios cristalinos, reflejan la evolución y el grado de desarrollo actual de los aspectos claves de la evaluación de la seguridad y proporcionan una base de partida para las futuras actividades del Consejo de Seguridad Nuclear en este ámbito. Estos resultados son también objeto de una publicación del CSN (CSN, 2003).

3. Argumentos para la adquisición e incremento de la confianza

Como se ha descrito en el apartado anterior, la evaluación de la seguridad a largo plazo de un sistema de AGP implica realizar previsiones sobre el comportamiento y evolución de los diferentes componentes y procesos del sistema de

AGP, así como del sistema en su conjunto, y evaluar sus consecuencias radiológicas a largo plazo para su comparación con los límites aceptables.

Sin embargo, se reconoce que no es posible una ilustración perfecta y detallada de todas las posibles situaciones y comportamientos futuros de un sistema de AGP y que la evaluación cuantitativa del comportamiento del sistema está sometida a incertidumbres, mayores a medida que se consideran periodos de tiempo más largos. Por ello, la evaluación cuantitativa de la seguridad debe completarse con una serie de argumentos complementarios (en lo que se conoce como uso de *múltiples líneas de razonamiento*) para aumentar la confianza en la seguridad y su comunicación a los agentes implicados en las decisiones (NEA, 1999a, OIEA, 1997, 2002).

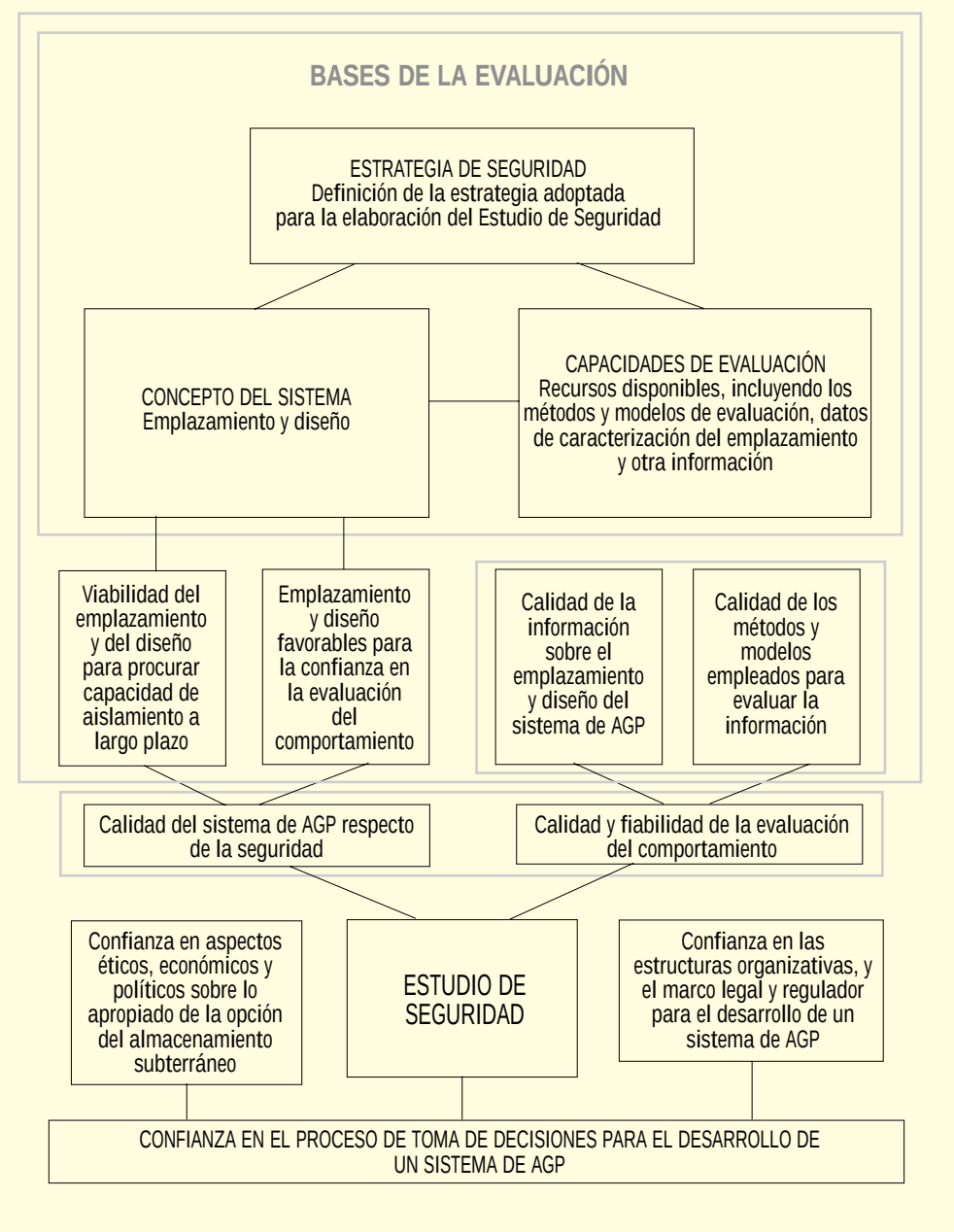
La necesidad de obtener confianza suficiente en la seguridad del AGP por parte del organismo regulador y los demás agentes implicados en la toma de decisiones, para poder avanzar en el proceso de desarrollo del AGP, ha dado lugar a la configuración del *Estudio de Seguridad* (“Safety Case”) que va más allá de la “evaluación de la seguridad”, al incluir, además de ésta, una evaluación de la confianza en los resultados obtenidos que reconozca el estado actual de desarrollo, describa los avances producidos y presente un plan de trabajo para abordar las cuestiones pendientes (NEA, 1999a).

Entre las múltiples líneas de razonamiento para el aumento de la confianza en la seguridad del AGP, se encuentran la realización de cálculos envolventes o simplificados que tratan de representar el “caso más desfavorable” del comportamiento del AGP, el uso de las evidencias tanto cualitativas como cuantitativas que pueden ofrecer los análogos naturales, la utilización de la información paleohidrogeológica de los emplazamientos en estudio y el uso de diferentes indicadores de seguridad complementarios a la dosis y el riesgo. El uso de estas múltiples líneas de razonamiento puede ayudar también a responder a las diferentes preguntas y expectativas de audiencias tanto técnicas como no técnicas implicadas en el proceso de toma de decisiones para el desarrollo del AGP (OIEA, 1997 y NEA, 2002).

Desde el punto de vista técnico, la confianza en la seguridad a largo plazo se basa principalmente en (NEA, 1999a): 1) la robustez del diseño conceptual, y 2) la calidad de los métodos de evaluación que se utilicen y la fiabilidad de su aplicación. No obstante, la confianza de los agentes sociales implicados descansa, además de en estos indicadores de la capacidad técnica de evaluación, en una aceptación general de los aspectos éticos, políticos, y económicos de la opción propuesta, y en la fiabilidad que ofrezca a estos agentes el marco legal y las instituciones administrativas y reguladoras implicadas en la toma de decisiones (ver figura 5).

El reconocimiento creciente de la importancia de estos aspectos éticos y sociales en la toma de decisiones asociada al AGP, y su respuesta por parte de las agencias de gestión de residuos y de los organismos reguladores implicados, está facilitando en algunos países el avance y la aceptación por parte del público de los programas de AGP.

Figura 5.
Elementos a considerar en la evaluación de la confianza en la seguridad a largo plazo del sistema de AGP (tomado de NEA, 1999a)



**El concepto de análogo.
Evolución histórica de los
estudios de análogos**

El concepto de analogía es de amplia utilización no sólo en el ámbito científico sino en otras muchas facetas de la vida. Su aplicación ha resultado ser fructífera a la hora de entender ideas e incluso de transferir soluciones entre campos del conocimiento aparentemente alejados o extraños entre sí. A la gran potencialidad del concepto de análogo y sus aplicaciones, va unida la necesidad de definir el concepto y precisar los detalles en cada uso concreto con objeto de aclarar el objetivo que se pretende y evitar malentendidos.

En el campo del AGP de residuos radiactivos por análogo natural se entiende *de la presencia en el medio ambiente de materiales o procesos que son similares a, o que pueden relacionarse con aquéllos que se predice ocurrirán en alguna parte del sistema de almacenamiento* (OIEA, 1989).

La disposición de los residuos radiactivos de alta actividad, especialmente del combustible gastado, en el sistema de almacenamiento ubicado a varios cientos de metros de profundidad en una formación rocosa, y los procesos que pueden tener lugar a largo plazo en este sistema, en cuanto a la dispersión de la aureola de contaminación en el medio, es una situación intrínsecamente análoga a la de los yacimientos minerales de uranio en forma de UO_2 que se dan en la naturaleza desde tiempos muy superiores a los que se consideran en el almacenamiento de residuos y a la de otras anomalías geoquímicas naturales.

Además de estas analogías aplicables a la barrera geológica y a la propia forma del residuo, cuya limitada solubilidad en determinadas condiciones le otorga una función de primera barrera de ingeniería, existen numerosos ejemplos de sistemas análogos, que abarcan un amplio espectro de procesos y ambientes, dados los diferentes conceptos de almacenamiento que se contemplan actualmente en el ámbito internacional.

Todos los análogos se pueden clasificar en unos pocos grupos, que son representativos de alguno de los componentes principales de un sistema de almacenamiento y de su evolución (Miller *et al.*, 2000):

- *Sistemas geoquímicos y geológicos naturales*, que aplican principalmente al propio residuo y a la geosfera;
- *Sistemas arqueológicos*, que aplican a las barreras de ingeniería de contenedor y materiales de relleno y sellado; y
- *Emplazamientos con contaminación antrópica o análogos antropogénicos*, de aplicación al conocimiento de los fenómenos de transporte en la biosfera (no contemplados en este proyecto).

Hasta el trabajo de Chapman *et al.* (1984) que sentó las bases de un tratamiento cuantitativo de los análogos naturales con aplicación a la evaluación del comportamiento, los primeros estudios de análogos fueron, en su mayoría, prolongaciones de estudios geológicos y geoquímicos de anomalías químicas o iso-

tópicas orientados a interpretar casos singulares como *análogos globales* de un sistema de almacenamiento completo. No se establecía aún en detalle una conexión con las necesidades derivadas del diseño del almacenamiento o de la evaluación de la seguridad.

La información obtenida en estos estudios iniciales fue fundamentalmente cualitativa, y la aproximación al análogo global resultó, en cierto modo, insatisfactoria, ya que, aunque en casi todos los análogos se pueden encontrar grupos de analogías aplicables a varios componentes y procesos de un sistema de AGP, la realidad es que no existen análogos naturales que sean totalmente representativos o adecuados para un sistema de almacenamiento específico en su conjunto, ni siquiera en los casos más completos representados por los yacimientos de uranio como Cigar Lake o por los reactores nucleares fósiles de Oklo (Miller *et al.*, 2000).

Por ello, posteriormente, los estudios de análogos se han enfocado hacia el *estudio de materiales y procesos individuales* para los que sí pueden encontrarse analogías más adecuadas y con un mayor potencial de proporcionar datos cuantitativos y cualitativos sobre el comportamiento a largo plazo de los sistemas de almacenamiento. Entre las pautas establecidas para el tratamiento más estricto de la analogía, está la definición de los siguientes requisitos esenciales a considerar en la selección de un análogo:

1. El proceso implicado debe estar claramente definido. Otros procesos que pudieran estar involucrados en el sistema geoquímico a estudiar deben ser identificables y susceptibles de ser evaluados cuantitativamente, de tal manera que sus efectos se puedan restar de los provocados por el proceso analizado.
2. La analogía química debería ser buena dado que no siempre es posible estudiar el comportamiento de un mineral, elemento o isótopo idéntico a aquél que se quiere evaluar.
3. La magnitud de los distintos parámetros físico-químicos debería poderse estimar preferiblemente por medios independientes y no diferir mucho de los esperables en el sistema de almacenamiento.
4. Los límites del sistema deberían ser identificables (saber si es un sistema abierto o cerrado y cuánto material ha estado implicado en el proceso estudiado).
5. La escala temporal del proceso debe ser medible, dada la importancia de este factor en el análogo.

El que la información de un análogo pueda ser aplicada en mayor o menor medida y de manera cualitativa o cuantitativa depende mucho de cuántas de estas condiciones se satisfagan y con qué grado de confianza o fiabilidad. Aunque,

parece claro que en todos los casos habrá limitaciones debido a la incapacidad de definir de manera precisa todas las condiciones.

Las limitaciones de los análogos que más claramente se han puesto de manifiesto se refieren a los siguientes aspectos: conocimiento incompleto de la historia del análogo en relación con los detalles de procesos y sucesos relevantes; manifestación de muchos procesos complejos solapados que dificulta o imposibilita su estudio individual; desconocimiento de las condiciones iniciales y de contorno de los materiales y procesos que constituyen la analogía; y analogías parciales entre los análogos y los sistemas de almacenamiento geológico que conducen a incertidumbres en la transferencia de información y en la relevancia de los datos del análogo. Debe reconocerse que los materiales estudiados son sólo una aproximación de los que aparecen en un sistema de AGP. Por ejemplo, la uraninita es un buen análogo de la composición global y forma cristalina del combustible irradiado, pero no contiene ni las segregaciones internas ni la misma cantidad de elementos transuránidos presentes en el mismo.

No obstante, los requisitos mencionados, que han pasado a ser “clásicos” en este campo, permiten circunscribir el interés de la observación de la naturaleza en general al estudio de una serie de sistemas naturales individualizados que son calificados como análogos y definen unos objetivos claros para este tipo de estudios.

Los desarrollos habidos en las dos últimas décadas en el estudio de los análogos reflejan la evolución del concepto de análogo y de los tipos de análogos estudiados y evidencian nuevos enfoques de los estudios.

La definición inicial de análogo natural como “... una ocurrencia de materiales o procesos que se parecen a los esperados en un sistema de almacenamiento geológico de residuos” (Côme and Chapman, 1986), se fue modificando en posteriores definiciones (OIEA, 1989; McKinley, 1993) para ir reflejando la creciente utilización de los análogos en la selección de materiales para el diseño, la identificación y comprensión de procesos relevantes para la evaluación del comportamiento de estos materiales y de la seguridad del sistema en su conjunto, y en el desarrollo y la comprobación de modelos, tanto conceptuales como matemáticos, a las escalas espaciales y temporales de interés.

El interés de los programas nacionales de AGP se ha centrado en diferentes tipos de análogos en función de la evolución de estos programas y de las demandas recibidas desde el punto de vista del diseño y de la evaluación de la seguridad. Muchos de los primeros estudios de análogos naturales estaban orientados a la determinación de la estabilidad y longevidad de las posibles formas químicas de los residuos y de los materiales del contenedor. En la última década, los estudios se han centrado principalmente en los procesos de transporte y retardo de radionucleidos en la geosfera, como consecuencia del importante papel que desempe-

ñan la dispersión y el retardo en dicha barrera en la seguridad a largo plazo del sistema de AGP. Recientemente, se observa una creciente atención en algunos programas de AGP hacia la consecución de diseños robustos, haciendo mayor hincapié en el papel de las barreras de ingeniería, que probablemente tendrá su efecto en los futuros estudios de análogos.

Más recientemente, a los usos referidos de los análogos, se ha venido a sumar el creciente interés por su utilización en demostraciones de la seguridad a audiencias no técnicas, y cualquier definición de análogos naturales debe reflejar esta aplicación de los mismos (Miller *et al.*, 2000).

Los estudios de análogos naturales y arqueológicos constituyen, por tanto, y así está reconocido en el ámbito internacional, una fuente para entender y explicar el comportamiento a largo plazo de materiales similares a los que formarán parte de los almacenamientos de residuos radiactivos de alta actividad, así como a identificar los sucesos y procesos que les pueden afectar, y a desarrollar modelos más adecuados para su representación, contribuyendo, en último término, al aumento de la confianza en la seguridad del sistema.

Por otra parte, las audiencias no familiarizadas con los aspectos técnicos del AGP podrán encontrar mas creíbles los resultados de la evaluación del comportamiento y la seguridad de un sistema de almacenamiento que vayan acompañados por paralelismos procedentes de observaciones en sistemas naturales. Por ello, los análogos naturales pueden desempeñar un papel relevante en la comunicación a las audiencias públicas, con o sin conocimientos científico-técnicos, usando un lenguaje fácil de entender.

Analogías de los sistemas de almacenamiento

Aunque, como ya se ha indicado, no existen análogos naturales que sean totalmente representativos o adecuados para un sistema de almacenamiento específico en su conjunto, si es posible encontrar sistemas naturales y arqueológicos en los que se dan grupos de analogías que aplican a varios componentes y procesos individuales de un sistema de almacenamiento geológico de residuos de alta actividad. De este modo, el estudio de las posibles *analogías* del sistema de AGP se ha centrado en las dos grandes áreas siguientes:

- los *materiales y componentes* que van a formar parte del sistema de almacenamiento (residuo, contenedor, materiales de relleno/ sellado y geosfera), y el comportamiento esperable de esos materiales a largo plazo en las condiciones del almacenamiento, y
- los *procesos* relevantes que pueden tener lugar en los distintos componentes del sistema de almacenamiento.

La identificación de los posibles análogos de los materiales, componentes y procesos importantes que pueden ocurrir en el sistema de almacenamiento, requiere estudiar las secuencias completas de fallo o *degradación* de las barreras del sistema de AGP y de posterior *movilización y transporte* o *retención* de los radionucleidos, y descomponer su compleja evolución en un número de mecanismos o procesos interrelacionados que se puedan evaluar de manera relativamente independiente.

En este capítulo se describen, en un primer apartado, los sistemas que pueden considerarse análogos de los diferentes componentes del sistema de AGP, y en el apartado siguiente, la analogía entre los principales procesos que operan en el sistema de AGP y los procesos particulares que tienen lugar en sistemas naturales y arqueológicos y que aportan información para la mejora de su comprensión.

1. ANALOGÍAS DE MATERIALES Y COMPONENTES DEL SISTEMA

Como ya se explicó en el capítulo 3, los principales componentes o barreras de un sistema de almacenamiento geológico de residuos radiactivos son: la propia *forma química del residuo* (combustible nuclear irradiado o vidrios de reproceso); el *contenedor* o cápsula en el que se aloja; los *materiales de relleno y sellado* que rodean al contenedor y lo aíslan de la roca y; el medio geológico o *geosfera* en el cual se ubica el repositorio. A continuación se describen brevemente cada uno de estos componentes del sistema de AGP y se indican los sistemas naturales y arqueológicos con los que presentan analogía.

1.1. El residuo radiactivo: formas químicas

Los residuos de alta actividad están constituidos básicamente por el combustible nuclear irradiado (CNI), cuando se ha optado por el “ciclo abierto” para la parte final del ciclo del combustible, (en países como Canadá, Finlandia, EEUU, Suecia y España) y por los residuos vitrificados procedentes del reproceso del CNI, en el caso en el que la opción adoptada sea el “ciclo cerrado” (en países como Francia y Japón).

1.1.1 El combustible nuclear irradiado

El combustible nuclear está constituido mayoritariamente por UO_2 cristalino (normalmente con más del 95% de UO_2) manufacturado en forma de pastillas que son incluidas en vainas de Zircaloy. Una vez irradiado, este material presenta una gran complejidad química. El inventario de radionucleidos existente en el combustible gastado está constituido por productos de fisión, actínidos y descendientes, y productos de activación formados a partir de las impurezas existentes en el UO_2 . Dicho inventario se distribuye entre las pastillas de combustible y en el hueco existente entre ellas y las vainas.

La elección de esta forma físicoquímica de las pastillas de UO_2 para su quemado en los reactores nucleares se debe a su gran estabilidad a elevadas temperaturas y su baja solubilidad. Esta gran estabilidad otorga a la propia matriz del combustible irradiado el papel de primera barrera en el AGP, ya que dificulta significativamente el proceso de disolución de radionucleidos en el caso de fallo o degradación de las otras barreras.

Los *óxidos naturales de uranio* que aparecen en los yacimientos de este elemento (la uraninita y una variedad menos pura, la pechblenda) se consideran análogos naturales del combustible gastado y pueden complementar la información sobre el comportamiento del mismo obtenida en experimentos de corta duración. Estos minerales tienen la misma composición de UO_2 que el combustible gastado, aunque existen algunas diferencias entre ellos. La matriz del material natural suele incluir como impurezas trazas de tierras raras (REE) (La, Ce, Gd), Th e Y y una gran cantidad de Ca, Fe y Si; si bien las mayores discrepancias están en el contenido de Pb radiogénico (a veces hasta un 25% en peso o más) que son un reflejo de la edad de las fases uraninita y pechblenda.

Desde el punto de vista cristalográfico, el combustible gastado y la uraninita son idénticos (ambos son cúbicos), aunque presentan importantes diferencias morfológicas entre ellos que, en ocasiones, hacen difícil la extrapolación de la información sobre el sistema natural para su uso en un ejercicio de evaluación del comportamiento. En el caso del combustible gastado la estructura cristalina

puede estar algo desorganizada por el intenso campo de radiación al que ha estado sometido en el reactor nuclear y por tanto, puede ser más soluble.

A pesar de estas diferencias, el estudio de la uraninita y su entorno proporciona claves importantes para la predicción del comportamiento de la matriz del combustible gastado a largo plazo y, en concreto, sobre el proceso de disolución y liberación de radionucleidos desde la matriz de combustible (ver apartado 2.1) y el retardo de estos en los productos de alteración secundaria.

El inventario radiactivo del combustible gastado incluye los radionucleidos de las series naturales (sobre todo ^{238}U), productos de fisión, actínidos e hijos de los actínidos y los productos de activación nuclear. La mayoría de estos radionucleidos no se encuentran en concentraciones medibles en los sistemas naturales (yacimientos de uranio) por lo que se deben utilizar análogos químicos para evaluar la aplicabilidad de los datos de laboratorio al medio natural a las escalas de tiempo geológicas. Estos análogos químicos, para ser tales, deben mostrar propiedades físicoquímicas similares a las de los radionucleidos de interés (estado de valencia, comportamiento redox y formación de complejos similares, tipo de especie y estequiometría parecidas, radios iónicos comparables, vida media suficientemente larga para asegurar comportamientos cinético y químico comparables...). El U y el Th, por ejemplo, dependiendo de su estado de valencia, se pueden usar como análogos químicos del Np, Pu y Pa. La mayoría de los lantánidos se correlacionan muy estrechamente con el Am y el Cm. El ^{129}I es un radionucleido que por su elevada movilidad bajo muy distintas condiciones requiere una atención especial. Para condiciones de alta temperatura en el campo próximo, su comportamiento se puede estudiar en yacimientos hidrotermales de cobre o plata, donde se haya detectado un enriquecimiento en yoduro.

1.1.2. La matriz de estabilización del residuo reprocesado

La matriz prevista en el concepto español para la solidificación e inmovilización de los residuos de alta actividad producidos durante el reprocesado¹² del combustible gastado es el *vidrio borosilicatado*, aunque hay conceptos que consideran otros tipos de formas químicas del residuo como son las *matrices minerales y cerámicas (SYNROC)*.

Las ventajas del vidrio como matriz de estabilización son su longevidad física y química en las condiciones del sistema de almacenamiento y su fácil producción. Los vidrios borosilicatados suelen ser los más usados como matriz debido a su estabili-

¹² Entre los residuos de alta actividad a gestionar en España están los residuos vitrificados procedentes del reproceso en Francia del combustible irradiado de la central nuclear Vandellós I, que serán devueltos a España en el 2010.

dad y a su temperatura de formación relativamente baja (1100 °C) lo que minimiza la pérdida de residuos por volatilización durante la vitrificación de los mismos.

Los materiales naturales análogos de estas matrices vítreas son los *vidrios volcánicos* que son fundamentalmente de composición aluminosilicatada. Entre estos, los vidrios basálticos son los materiales naturales más parecidos en su composición a los vidrios borosilicatados. Sin embargo, existen bastantes diferencias entre ellos. En particular, los vidrios naturales no contienen ninguno de los componentes del residuo y por tanto, los efectos inducidos por la radiación que podrían ocurrir en el sistema de AGP no pueden ser observados en los mismos. Además, el boro sólo aparece en cantidades traza en los vidrios naturales, por tanto, el impacto de este elemento sobre la durabilidad del vidrio tampoco puede estudiarse en los análogos naturales. Por otro lado, el ordenamiento de ciertos átomos (como el Na) puede ser distinto en los vidrios naturales y en los artificiales, pudiendo ser un factor de cierto impacto sobre la durabilidad a largo plazo (Angeli *et al.*, 1998).

Además de los vidrios volcánicos, el estudio de *vidrios arqueológicos* puede ayudar a entender el comportamiento a más corto plazo de la matriz vítrea de residuos procedentes del reproceso. Muchos de estos vidrios antiguos han sobrevivido sin grandes tasas de alteración a condiciones más destructivas (en cuanto a cambios de temperatura y humedad) que las esperables en un sistema de almacenamiento.

Existen abundantes estudios sobre análogos de vidrios naturales aunque realmente se han hecho desde un punto de vista geológico o mineralógico más que desde el punto de vista de su uso para la evaluación de la seguridad. Sin embargo, esto ha facilitado el tener ya un cuerpo de doctrina desarrollado sobre el comportamiento y caracterización de este tipo de materiales.

La mayoría de los vidrios naturales tienen edades superiores a los dos millones de años, habiéndose observado que la durabilidad del vidrio es mayor en los casos en que esos materiales están encajados en rocas que han impedido la llegada del agua hasta ellos. Se ha podido comprobar que bajas temperaturas y velocidades de flujo muy lentas limitan considerablemente la hidratación del vidrio haciendo que la disolución del mismo sea muy lenta. Por su parte, los vidrios arqueológicos parecen degradarse por los mismos mecanismos que los observados en los experimentos de laboratorio sobre vidrios borosilicatados. Su estudio puede ayudar a conocer mejor el tipo de alteración esperable en los residuos vitrificados presentes en un AGP.

Adicionalmente, aunque no es de aplicación al programa español, es de interés conocer que hay muchos minerales naturales muy estables que contienen elementos radiactivos en elevadas concentraciones (caso de la zirconolita), aunque ninguno es tan abundante como la uraninita. Esto ha conducido al desarrollo de las matrices minerales y cerámicas como alternativa a los vidrios borosilicatados para inmovilizar los residuos del reproceso. La composición de estas matrices está

basada en minerales naturales estables y poco solubles pertenecientes fundamentalmente al grupo de los óxidos de titanio y circonio y a las espinelas, y, en ellas, los radionucleidos del residuo quedan fuertemente enlazados en la red del mineral por sustitución isomorfa. La matriz más conocida es el SYNROC, aunque hay otras que están siendo actualmente investigadas. SYNROC es el nombre genérico de una serie de matrices multifásicas ricas en titanio, formadas por conjuntos minerales sintéticos (Savage, 1995) cuyos análogos son los propios minerales naturales en un ambiente semejante al que habrá en un sistema de almacenamiento.

Finalmente, aunque el proyecto se circunscribe al AGP de residuos de alta actividad, debe mencionarse que existe un buen número de análogos en los que se ha estudiado el comportamiento de la materia orgánica, que puede aparecer formando parte fundamentalmente de los residuos de baja y media actividad¹³.

1.2. El contenedor metálico: materiales Fe y Cu

Los metales dentro del sistema de almacenamiento aparecen formando parte de los contenedores de los residuos del combustible gastado o vitrificado y como refuerzos en las estructuras de cemento de las excavaciones. La mayoría de estos componentes serán de acero en el caso del concepto español. Sin embargo, pueden usarse también otros metales para los contenedores, como cobre (en los programas sueco o finlandés) y titanio (en el programa canadiense). Además, los metales pueden estar presentes como componentes de los propios residuos (varillas de Zircaloy, aleación con un 98% de Zr; tapaderas de acero e Inconel, aleación con un 73% de Ni).

En los conceptos de AGP del programa español, el contenedor de acero está diseñado para aislar los residuos procurando resistencia mecánica a la presión litostática, y a los esfuerzos derivados del hinchamiento de la bentonita y del incremento de volumen asociado a los productos de corrosión del mismo, durante unos pocos miles de años. Además reduce la importancia del proceso de radiólisis y aporta hierro al sistema contribuyendo a establecer y mantener un ambiente reductor en las proximidades del residuo, retardando así la liberación de los radionucleidos.

Aunque se han hecho muchos experimentos de laboratorio que han dado abundante información sobre los mecanismos de degradación del contenedor, debida fundamentalmente a procesos de corrosión (apartado 2.4), sus resultados son difícilmente extrapolables a un período de tiempo tan largo como el que aplica a un sistema de AGP. El estudio de los análogos arqueológicos per-

¹³ La naturaleza de la materia orgánica presente en los residuos de baja y media actividad es variable e incluye: resinas intercambiadoras, filtros, plásticos, papel y material de limpieza. Puede encontrarse también formando parte de las barreras de ingeniería (como el asfalto usado como matriz de inmovilización de residuos de baja actividad), o como aditivos orgánicos en el hormigón estructural y en los rellenos de cemento para impedir la separación cemento-agua y controlar la velocidad de endurecimiento. Los estudios de análogos en los que se analiza el comportamiento de la materia orgánica se refieren principalmente a la degradación de la celulosa.

mite obtener información sobre estos efectos en la escala de los cientos a los miles de años.

La principal dificultad para identificar análogos de los metales de un sistema de almacenamiento es que la mayoría de estos metales son aleaciones que no existen como tal en la naturaleza. Por ello los únicos análogos naturales que se han estudiado son de Cu, Fe y acero. Para el Cu existen tanto análogos arqueológicos como naturales (*depósitos masivos de cobre nativo*), mientras que para el acero se encuentran limitados en su mayoría a *artefactos arqueológicos*, aunque algunos estudios del proceso de corrosión de este material se han centrado en sistemas naturales de *yacimientos de hierro* nativo que, aunque no son exactamente iguales al hierro (acero) producido tecnológicamente (las asociaciones minerales naturales incluyen a menudo sulfuro, óxidos de Fe-Ti, magnetita y silicatos), son los únicos análogos naturales que se conocen hasta la fecha.

Por otra parte, las investigaciones de las varillas de refuerzo incluidas en viejos cementos en un ambiente químicamente reductor pueden proporcionar información útil sobre los productos de corrosión del acero en un ambiente similar al del almacenamiento.

La información que se puede obtener a partir del estudio de análogos metálicos se refiere a los siguientes aspectos de uso en la evaluación de la seguridad: (1) la durabilidad y longevidad del hierro, el acero y el cobre (velocidades y tipos de corrosión); y (2) las propiedades de los productos de alteración secundaria.

1.3. Materiales de relleno y sellado

1.3.1. Bentonitas

Las arcillas pueden usarse como material de relleno y sellado o incluso pueden constituir la propia roca encajante del sistema de almacenamiento. La arcilla seleccionada como material de sellado en todos los conceptos de almacenamiento geológico en formaciones graníticas y arcillosas, incluidos los contemplados en el programa español, es la bentonita, cuyo principal componente mineralógico es la *esmeclita*.

Las esmeclitas son arcillas expansivas, es decir, tienen capacidad de absorber agua o líquidos orgánicos entre sus capas estructurales provocando un aumento de volumen. Las esmeclitas tienen también elevada capacidad de intercambio y adsorción iónica y pueden actuar como tampones del pH y Eh. Otras propiedades físicas importantes son: baja permeabilidad (que limita el flujo del agua subterránea), elevada plasticidad (que permite a la bentonita fluir y sellar los espacios vacíos con una razonable capacidad de soportar carga de forma que asegura que el contenedor no colapse) y moderada conductividad térmica (que permi-

te disipar el calor radiogénico generado dentro del contenedor). Estas propiedades de hinchamiento, intercambio catiónico y aislamiento hidráulico, microbiológico y coloidal las convierte en uno de los elementos más importantes en los sistemas multibarrera de un almacenamiento de residuos radiactivos.

En un sistema de AGP, la bentonita sufrirá procesos químicos que pueden causar cambios en la capacidad del material para cumplir sus funciones como barrera, especialmente durante el pulso térmico. Los principales procesos que pueden dar lugar a la degradación de la bentonita son los procesos de precipitación química de fases minerales en los poros o huecos de este material (cementación) debido a la interacción agua-bentonita y la transformación progresiva de la esmectita en otro componente mineralógico denominado illita (illitización) cuando los cationes de cambio son reemplazados por el ion potasio de las aguas subterráneas. La illita tienen una capacidad de hinchamiento menor que la de la esmectita y mayores permeabilidades, por lo que la illitización supone una degradación de las propiedades iniciales de las bentonitas.

El estudio de *sistemas naturales* fundamentalmente *arcillosos* que han sufrido alteraciones a lo largo del tiempo debido a diferentes procesos geológicos pueden ser de gran ayuda en la comprensión del comportamiento de la bentonita a largo plazo. La información relevante que puede obtenerse de ellos como análogos naturales se dirige hacia:

- La caracterización de su estabilidad a largo plazo, incluyendo el análisis de los cambios en sus propiedades inducidos por procesos térmicos naturales (intrusiones ígneas, por ejemplo).
- La identificación de la importancia relativa de la difusión y advección y de las heterogeneidades físicas a pequeña escala en los mecanismos de transporte, así como la estimación de los coeficientes de difusión molecular.
- El estudio del movimiento de frentes redox, incluyendo los efectos producidos por la presencia de fracturas.
- El estudio de los procesos de especiación de radionucleidos y otros elementos traza en las aguas intersticiales de estos materiales, incluyendo la formación de complejos orgánicos gracias a la frecuente presencia de materia orgánica en los materiales arcillosos.

Las analogías de estos y otros procesos que pueden tener lugar en la barrera bentonítica de un sistema de AGP se tratan en el apartado 2.

1.3.2. Cemento y hormigón

El cemento se usará en mayor o menor medida en la construcción de todos los sistemas de almacenamiento de residuos radiactivos que se consideran actualmente. En el caso de los residuos de alta actividad el uso principal estará

limitado a la estabilización de los túneles de acceso durante la fase de construcción y como tapones permanentes para el sellado final de túneles y galerías. En los almacenamientos de baja y media actividad los volúmenes de cemento y hormigón serán mucho mayores (los componentes del residuo, la matriz de inmovilización, el material de relleno y las estructuras de ingeniería).

Las propiedades favorables del cemento para su uso como barrera son su resistencia mecánica, su baja permeabilidad y el mantenimiento de un ambiente alcalino a largo plazo. Las aguas intersticiales tendrán una composición química muy específica caracterizada por un pH muy elevado, de ahí que se hayan denominado hiperalcalinas. Esta última propiedad es de particular relevancia en el confinamiento de los residuos radiactivos puesto que la solubilidad de la mayoría de los radionucleidos y, por tanto, su potencial transporte, son sustancialmente menores en ambientes fuertemente alcalinos. Un aspecto beneficioso adicional de estos ambientes es la inhibición casi completa de la actividad bacteriana debido a las condiciones extremas de pH.

Los cementos y hormigones que está previsto utilizar en los sistemas de almacenamiento son cementos Portland cuyos principales productos de hidratación son compuestos CSH (silicatos hidratados de calcio). Estos compuestos forman un gel amorfo que proporciona la fuerza de enlace entre las partículas del cemento. Los geles CSH son termodinámicamente inestables y se transforman espontáneamente en formas cristalinas estables (Steadman, 1986). La velocidad de este proceso es demasiado lenta como para ser medida experimentalmente y no puede ser calculada fácilmente, de ahí el interés de los estudios de análogos. El proceso de degradación del cemento y la generación y evolución de la pluma hiperalcalina asociada, así como su estudio en sistemas análogos se describen en el apartado 2.9.

Hay dos aproximaciones al estudio de análogos de hormigones y cementos. La primera es estudiar los *cementos de edificios arqueológicos* o de *construcciones industriales antiguas*. El mayor problema de este tipo de análogos es que el cemento Portland de los hormigones actuales tiene propiedades fisicoquímicas distintas a las de los cementos antiguos basados fundamentalmente en la cal. Sin embargo, algunos de los cementos antiguos también contienen compuestos CSH, que han servido para preservarlos. La segunda aproximación es estudiar las apariciones naturales de minerales que sean análogos a los compuestos encontrados durante la hidratación del cemento Portland. La presencia de algunos de los minerales del cemento o de aguas de composición hiperalcalina como la del agua intersticial de estos materiales no es habitual en la naturaleza. Sin embargo, existen algunos *sistemas naturales* en los que se encuentran aguas hiperalcalinas originadas por complejas interacciones agua/roca en la alteración de rocas ultramáficas o en la alteración de calizas y margas metamorfizadas térmicamente.

Los aspectos de mayor interés que pueden estudiarse en estos análogos son:

- La longevidad del cemento y sus propiedades de enlace,
- la permeabilidad del cemento al agua y al gas,
- la especiación y solubilidad de los radionucleidos y otros elementos en condiciones de pH elevado,
- la interacción de fluidos de elevado pH con las rocas circundantes como analogía de las aguas intersticiales que migran del sistema de almacenamiento hacia la roca encajante,
- la naturaleza y viabilidad de los procesos geoquímicos inducidos microbiológicamente, y su influencia en el proceso de degradación del residuo y en la consiguiente movilización de los radionucleidos en el campo próximo y
- la naturaleza y estabilidad de las especies coloidales formadas en aguas de elevado pH, y en la interfase entre este agua y las aguas neutras.

1.4. La geosfera

En los conceptos de AGP, la roca hospedante tiene la función de proporcionar aislamiento físico respecto de potenciales impactos que provengan de la biosfera y servir de barrera frente a la intrusión humana, aportar un ambiente geoquímico y geomecánico estable y, limitar la cantidad de agua que entre en contacto con la bentonita. Además, en caso de fallo o degradación de las barreras de ingeniería, la propia estructura de la roca contribuye al retardo en la migración de los radionucleidos liberados desde el campo próximo.

Para poder cumplir sus funciones como barrera del sistema de AGP, las formaciones geológicas deben presentar unas características hidráulicas (baja permeabilidad y gradiente hidráulico), mecánicas, geoquímicas, y de estabilidad sísmica y estructural adecuadas. Los principales medios geológicos que están siendo considerados para el almacenamiento de residuos de alta actividad son formaciones salinas, medios graníticos y arcillosos. En esta exposición de los análogos de la geosfera y de los procesos que en ella tienen lugar, nos centraremos en los medios graníticos y arcillosos, ya que son los conceptos de AGP en estas formaciones los que se encuentran en fase más avanzada en el programa español.

Las formaciones graníticas adecuadas para el emplazamiento de un sistema de AGP se caracterizan por su baja permeabilidad y solubilidad, resistencia elevada a la alteración mecánica y química, estabilidad tectónica y conductividad térmica moderada. El principal mecanismo de transporte de solutos es la advección en las fracturas y fisuras del medio y el retardo de los radionucleidos es debido fundamentalmente a la interacción de éstos con los rellenos y superficies de fracturas y a la difusión en la matriz rocosa.

Las formaciones arcillosas comprenden litologías diversas que van desde arcillas y fangos no consolidados hasta rocas de bajo metamorfismo. Aunque

presentan propiedades hidráulicas, geoquímicas y de compactación variables, dependiendo de su origen, sus principales características son: muy baja permeabilidad, elevada capacidad de retención, plasticidad y capacidad autosellante variables, baja conductividad térmica, homogeneidad mineralógica/ química y elevada capacidad de retención. El transporte de solutos es por difusión, y el retardo de los radionucleidos es debido a la difusión y sorción de los mismos en la arcilla.

La mayoría de la información sobre el medio geológico en el que se prevé construir el sistema de AGP, se obtiene de observaciones de campo y de laboratorio, así como de experimentos en laboratorios subterráneos. Los datos e información obtenidos en los estudios de caracterización y evaluación de emplazamientos necesarios para el desarrollo del sistema de almacenamiento, son específicos de dicho emplazamiento y no tienen necesariamente por qué ser de utilidad para otros emplazamientos potenciales. Aunque los estudios del medio geológico en zonas en las que la información es transferible a otros emplazamientos, podrían considerarse como análogos de la geosfera de los conceptos de AGP en los que se contemplan litologías del mismo tipo.

Sin embargo, y siguiendo el convenio de Chapman et al. (1984), se ha tendido a no considerar estos emplazamientos como análogos naturales ya que, aunque el número de procesos de interés para el AGP a estudiar en estas zonas es muy grande, pocos de ellos responden al requisito de analogía química, al no contener estos medios en general concentraciones naturales apreciables de radionucleidos. Por ello, la tendencia ha sido a circunscribir el concepto de análogo a procesos individuales en los que se cumpla el requisito de analogía química y, por tanto, de presencia de radionucleidos de interés en el sistema análogo, como yacimientos de uranio. Las analogías de los principales procesos que pueden ocurrir en la geosfera de un sistema de AGP, se describen en el apartado 2.

2. ANALOGÍAS QUE ILUSTRAN LOS PROCESOS DE EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

El comportamiento y la evolución esperada de un almacenamiento geológico (AGP) de residuos radiactivos una vez clausurado y sellado, implica la entrada progresiva de agua en el sistema de almacenamiento, que provocaría el hinchamiento y saturación de la bentonita, terminando por alcanzar el contenedor. El contenedor, garantiza el confinamiento de los residuos durante un periodo de tiempo función de las características del material de al menos mil años, transcurrido el cual, el contenedor fallaría debido principalmente a su degradación por *corrosión*. Posteriormente, el agua subterránea entraría en contacto con el residuo,

provocando su *alteración y disolución* y la liberación gradual de los radionucleidos contenidos en el mismo.

Los radionucleidos liberados desde el residuo serían disueltos y transportados en el agua subterránea a través primero de los materiales de sellado del campo próximo. La bentonita saturada es prácticamente impermeable al agua, y por tanto, el transporte de solutos tiene lugar fundamentalmente por *difusión*. En estos materiales tendrán lugar procesos químicos que pueden dar lugar al retardo y retención de los radionucleidos (*disolución-precipitación de impurezas de la bentonita, sorción*) y a cambios en las propiedades de las barreras, asociadas especialmente a la etapa de pulso térmico (*cementación, transformación de la esmectita en illita*).

Los radionucleidos que alcanzan la geosfera, en el caso de medios fracturados, donde las fracturas constituyen vías preferentes del *flujo* del agua, son transportados fundamentalmente por *advección-dispersión*. En formaciones arcillosas, el principal mecanismo de transporte es la *difusión*. Asimismo tienen lugar una serie de procesos de reacción que condicionan la química de las aguas subterráneas y pueden dar lugar al *retardo y retención* de los radionucleidos (*sorción, disolución-precipitación entre el agua subterránea y la roca encajante, difusión en la matriz*).

En el sistema de AGP, además de estos procesos principales de liberación, migración y retención de radionucleidos, tienen lugar otros procesos que condicionan y tienen una gran influencia sobre ellos, que se pueden agrupar en procesos asociados con la radiación emitida por los radionucleidos presentes en los residuos (*radiólisis, posibilidad de alcanzar condiciones de criticidad*), *procesos térmicos* asociados a variaciones de temperatura de origen natural o inducidas por el calor generado por los residuos, *procesos* relacionados con las propiedades y comportamiento mecánico de las barreras de ingeniería y geológica, *procesos* asociados al *flujo de fluidos* (agua y gases) *procesos geoquímicos* que determinan la evolución geoquímica de las aguas intersticiales de la barrera de ingeniería y la barrera geológica.

En la tabla 2 se recogen los principales procesos que tienen lugar en cada uno de los componentes del sistema de AGP.

A continuación se presentan muy brevemente los procesos anteriores, su ocurrencia y relevancia en el comportamiento del sistema de almacenamiento y su estudio en sistemas naturales y arqueológicos. Una descripción más detallada de cada uno de los procesos y sus analogías se incluye en el Anexo B.

Los procesos se presentan agrupados por cada uno de los componentes del sistema de AGP que se ve afectado, dejando para el final los procesos que ocurren en varios componentes (e.g.: especiación/solubilidad, sorción, generación de coloides, actividad microbiana), en los que la descripción del proceso se refiere a su ocurrencia en todos ellos.

COMPONENTE DEL AGP	PROCESO
Combustible gastado/ residuo vitrificado	Alteración/ disolución
	Criticidad
	Efectos de la radiación (Radiólisis)
	Especiación – solubilidad
	Generación de coloides
Contenedor	Corrosión
	Generación de coloides
	Generación de gas
Materiales de relleno y sellado	Disolución - precipitación de impurezas
	Procesos de disolución-precipitación en campo variable de temperatura: cementación
	Transformación esmectita-illita
	Especiación – solubilidad
	Difusión molecular en la barrera bentonítica
	Sorción (adsorción e intercambio iónico)
	Generación y transporte de coloides
	Generación y transporte de gas
	Degradación del cemento y generación y evolución de la pluma hiperalcalina
	Advección y dispersión
	Flujo de fluidos
	Reacciones entre el agua subterránea y la matriz rocosa
	Especiación – solubilidad
Geosfera	Frente redox
	Difusión en la matriz rocosa
	Difusión molecular en formaciones arcillosas
	Sorción (adsorción e intercambio iónico)
	Precipitación- coprecipitación/ disolución
	Generación y transporte de coloides
	Generación y transporte de gas
	Procesos microbiológicos
	Procesos acoplados

Tabla 2.
Principales procesos que pueden tener lugar en un sistema de almacenamiento de residuos agrupados por los componentes del sistema que pueden verse afectados

2.1. Disolución de la matriz de residuo (combustible gastado o vidrio de reproceso)

La alteración química de la matriz de UO_2 del *combustible gastado* puede producirse por disolución simple o por procesos de transformación (oxidación) del UO_2 en óxidos con estequiometrías distintas. Estos procesos se encuentran relacionados y su actuación acoplada depende, fundamentalmente, del estado redox del sistema. El estudio de la secuencia de alteración de la uraninita (análogo de la matriz de UO_2) en yacimientos de uranio tanto en condiciones reductoras (*Oklo*, *Cigar Lake* y *Palmottu*), como en condiciones oxidantes (*Shinkolobwe*, *Koongarra* y *Krunkelbach*), ha proporcionado información cualitativa sobre la evolución del combustible gastado en distintas condiciones y datos cuantitativos de sus velocidades de disolución, contribuyendo a la verificación de modelos y códigos de liberación de radionucleidos.

Los principales procesos de alteración que pueden afectar a las *matrices boro-silicatadas* son la desvitrificación (cristalización en estado sólido) en la que pueden producirse fases más solubles que el vidrio original, y su disolución al entrar

en contacto con el agua subterránea tras el fallo del contenedor. Las observaciones realizadas en vidrios volcánicos naturales y vidrios arqueológicos han proporcionado información cualitativa sobre los procesos, datos cuantitativos de rangos de velocidades de disolución, y han evidenciado la estabilidad a largo plazo de estos materiales en un amplio rango de condiciones.

2.2. Criticidad

La acumulación de isótopos fisionables (^{235}U y ^{239}Pu) en el combustible gastado, en presencia de neutrones y de un moderador de neutrones como el agua subterránea, podría dar lugar a condiciones de criticidad en un sistema de AGP de residuos de alta actividad, generándose productos de fisión y calor. En el caso más extremo de inicio de una reacción de fisión divergente no controlada, podría dar lugar a daños considerables en el sistema de almacenamiento. El análogo natural de Oklo, en el que se alcanzaron condiciones de criticidad, constituye una oportunidad única de estudiar el transporte de radionucleidos transuránicos y la estabilidad de minerales de uranio en dichas condiciones, y se ha utilizado información del mismo para analizar la posibilidad de criticidad en un sistema de AGP de residuos de alta actividad, concluyéndose que es altamente improbable.

2.3. Radiólisis

Es el proceso de descomposición química de la materia por la incidencia de radiaciones ionizantes de alto poder energético. En el campo próximo de sistema de AGP, el fenómeno de radiólisis más importante es el del agua subterránea, produciéndose su ionización y excitación electrónica y generándose agentes oxidantes y reductores, que pueden afectar a la corrosión del contenedor, la disolución del UO_2 y la solubilidad de los radionucleidos. El proceso se ha estudiado en yacimientos de uranio con elevados campos de radiación como *Oklo* o *Cigar Lake* y en otros yacimientos como *Cluff Lake* y *Rabit Lake* (Canadá) *Shinkolobwe* y *Menzenschwand* (Alemania), contribuyendo al aumento del conocimiento de su efecto sobre la oxidación y degradación de la uraninita, y al desarrollo y mejora de los modelos de simulación del proceso.

2.4. Corrosión

Es el deterioro de un metal, fruto de la reacción con el medio que le rodea y constituye la principal causa de fallo del contenedor en un sistema de AGP, pudiendo darse de forma generalizada y/o localizada, dependiendo de las características del medio geológico, el agua subterránea, el sistema de almacenamiento y el propio material del contenedor. Puede dar lugar también a la

generación de productos de alteración secundarios y gases. Su estudio en análogos arqueológicos metálicos (*Cañón de Kronan*, *Sarcófago de Tournai*, *análogos arqueológicos españoles*, etc.) proporciona una forma de cuantificar el comportamiento de los materiales frente a la corrosión en la escala de los cientos a los miles de años, y ha evidenciado la capacidad de algunos de los productos de corrosión del contenedor para retardar la migración de radionucleidos en el campo próximo.

2.5. Procesos de disolución-precipitación de impurezas en la bentonita

Los procesos de *disolución-precipitación de los componentes accesorios presentes en la bentonita* (cuarzo, feldspatos, carbonatos, sulfuros, etc.) constituyen uno de los principales controladores de la evolución geoquímica de las aguas en dicha barrera, y algunos de estos procesos (precipitación de pirita o siderita) favorecen el mantenimiento de un ambiente reductor en la bentonita. Las observaciones fundamentalmente en el análogo de *Cigar Lake* relativas al papel de los sulfuros y carbonatos ferrosos dispersos en el halo arcilloso (análogo de la bentonita) en dicho mantenimiento de un ambiente reductor y estabilizador del depósito de uranio, han servido para corroborar las extrapolaciones sobre este efecto basadas en estudios de laboratorio y simulaciones teóricas.

2.6. Procesos de disolución-precipitación en campo variable de temperatura: cementación en la barrera bentonítica

Los procesos de precipitación química de fases minerales en los poros o huecos de la bentonita en su interacción con el agua por efectos termohidroquímicos, se denomina *cementación*. Puede afectar a las propiedades reológicas de la bentonita aumentando su fragilidad, reduciendo su capacidad de hinchamiento, y disminuyendo, así, sus cualidades como barrera. Sin embargo, el estudio de la cementación de fases silíceas en los análogos naturales de *Busachi* (Cerdeña) y *Kinneulle* (Suecia) ha mostrado que la intensidad de estos procesos no parece ser lo suficientemente importante como para constituir un fenómeno relevante para la integridad de la barrera. Esto confirmaría los resultados de laboratorio, ampliándolos a las escalas de tiempo asociadas a la evaluación de la seguridad.

2.7. Transformación de esmectita a illita: illitización

Es un proceso de reemplazamiento mineral en el que se produce un intercambio de los cationes de la esmectita por el K^+ de las soluciones intersticiales, que

sucede de forma natural en sistemas geológicos a temperaturas relativamente elevadas y puede darse en la etapa de impacto térmico del sistema de AGP, originándose illita, que presenta peores propiedades como barrera que la esmectita. Los procesos diagenéticos y los asociados a intrusiones ígneas se consideran análogos del proceso y su estudio (*Kinneulle, Hamra, Busachi, Burgsvik, Forsmark, Ignaberga, Murakami, Orciático*, etc.) ha proporcionado datos sobre la intensidad o los rangos de tiempo necesarios para que se produzca el proceso (confirmando que dichas escalas temporales deberían ser superiores a las consideradas en la evaluación de la seguridad), y ha permitido la verificación y calibración de los modelos cinéticos empleados para su descripción. En *Cigar Lake*, el halo arcilloso que rodea al yacimiento de uranio está constituido fundamentalmente por illita, por lo que su estudio permite analizar el comportamiento de este material como barrera.

2.8. Especiación-solubilidad: cálculo de los límites de solubilidad

Las propiedades de especiación-solubilidad de los radionucleidos son propias de cada elemento y dependen de las características químicas del agua subterránea tras su interacción con las barreras del campo próximo. El cálculo de los límites de solubilidad de los radionucleidos en los sistemas de AGP, mediante el uso de modelos geoquímicos y bases de datos termodinámicos, permite determinar la concentración específica que cada radionucleido presentará en su transporte desde el residuo hasta la biosfera, aunque en la mayoría de los ejercicios de evaluación, conservadoramente, se aplica sólo en el campo próximo. Los estudios de análogos naturales (*Oman, Poços de Caldas, Cigar Lake, Maqarin, El Berrocal, Oklo y Palmottu*), en los que se han realizado ejercicios de “predicción ciega”¹⁴, han facilitado la comprobación y aumento de la confianza en las bases de datos termodinámicos, los modelos geoquímicos conceptuales y los códigos numéricos asociados.

2.9. Degradación del cemento: generación y evolución de la pluma hiperalcalina

La degradación del cemento comprende varias etapas en función de las características del medio, que irán condicionando, debido a la interacción hormigón-agua subterránea, el desarrollo y evolución de una aureola de fluidos de pH elevado (pluma hiperalcalina) y sus efectos sobre los materiales del campo próximo (solubilidad de radionucleidos, corrosión del metal, degradación de la bentonita, alteración de la roca encajante). El estudio de análogos arqueológicos e industriales (*Conducción de Acquarosa, Muralla de Adriano, Tanque del Castillo de Uppsala*) o naturales (*Oman, Maqarin*), puede aportar información

¹⁴ BPM: Blind Predictive Modelling exercises

sobre estos procesos y su efecto sobre el transporte de radionucleidos, ayudar en la modelización conceptual del desarrollo de la pluma hiperalcalina y, mediante los ejercicios de “predicción ciega” realizados, contribuir a la comprobación de códigos y metodologías de modelización.

2.10. Flujo de fluidos

El flujo del agua subterránea en la geosfera del sistema de AGP, en medios fracturados (granito), se concentra en el sistema de fracturas, que actúan como vías preferentes del mismo y cuya geometría y disposición condicionan las características del flujo. Afecta al transporte y dispersión de los radionucleidos, a su retardo (al determinar la cantidad de superficie disponible para difusión en la matriz y para sorción), a las tensiones litológicas, a la temperatura y al flujo y transporte de gas en la roca. Los estudios en análogos naturales (*Oklo*, *Cigar Lake*, *Palmottu*, *El Berrocal*, *Poços de Caldas*) pueden aportar información y ayudar a corroborar las predicciones de los estudios de campo y de laboratorio sobre aspectos como los tiempos de tránsito del agua desde el almacenamiento hasta la biosfera, y han contribuido al desarrollo y comprobación de modelos conceptuales y códigos numéricos de flujo, así como al desarrollo y prueba de técnicas de campo novedosas para la caracterización hidrogeológica.

2.11. Advección y dispersión

La advección (transporte de las sustancias disueltas en un fluido debido al movimiento del mismo) y la dispersión hidrodinámica (transporte de masa, de forma natural, desde las zonas de mayor concentración a las de menor concentración de soluto debido a la difusión molecular y a la dispersión mecánica) son los fenómenos que controlan el transporte de los radionucleidos disueltos en las aguas subterráneas en la geosfera de un sistema de AGP, en el caso de formaciones fracturadas. Aunque son procesos clásicos muy estudiados en hidrogeología, su estudio en análogos naturales (*Oklo*, *Palmottu*, *EL Berrocal*, *Maqarin*, etc.) ha proporcionado abundante información sobre los parámetros involucrados en el transporte advectivo-dispersivo de solutos y ha contribuido al desarrollo de modelos conceptuales de dicho transporte.

2.12. Difusión molecular

En un sistema de AGP, la difusión molecular (transporte neto debido al movimiento aleatorio de zonas de mayor concentración a las de menor concentración) es el principal mecanismo de transporte en los materiales de sellado (bentonita) y en la geosfera, en el caso de formaciones arcillosas. En medios frac-

turados (granito), es importante la difusión molecular de solutos en la zona de roca que bordea las fracturas, denominada “difusión en la matriz”.

La difusión molecular en medios arcillosos se ha estudiado fundamentalmente mediante experimentos de laboratorio e “in situ”. Así, la aportación de los análogos a la *difusión en la bentonita* es más limitada, aunque se ha estudiado con cierto detalle en *Cigar Lake*. La *difusión en formaciones arcillosas* se ha estudiado en varios análogos (*Loch Lomond*, *Koongarra*, *Dunarobba*,) aportando datos cuantitativos para la difusión de algunas especies de interés, y evidenciando el conservadurismo de los coeficientes de difusión obtenidos en ensayos de laboratorio.

En formaciones fracturadas, la *difusión en la matriz* actúa como sumidero de radionucleidos, provocando tanto una disminución en las actividades máximas como un retardo en el avance de los radionucleidos hacia la biosfera. Es uno de los procesos más extensamente considerado y contrastado en los estudios de análogos naturales (*Palmottu*, *Poços de Caldas*, *El Berrocal*, *East Bull Lake*), permitiendo avanzar en el conocimiento de los factores que lo regulan (volumen de la porosidad interconectada, importancia de los límites de grano, las microfracturas y la mineralogía de la matriz), obtener rangos de valores de difusividad aparente y sus incertidumbres, conocer la importancia relativa de la difusión en la matriz frente a otros mecanismos de retardo, y comprobar modelos del proceso.

2.13. Procesos de interacción agua-roca

Comprenden el conjunto de procesos que condicionan las características y evolución de las aguas que van a entrar en contacto con las barreras del sistema y la evolución de ciertas características mineralógicas del medio sólido debida a la interacción con las aguas subterráneas y de interés en la retención de radionucleidos. Se tratan de forma conjunta en la evaluación de la seguridad bajo la denominación de “procesos geoquímicos”, que determinan el comportamiento de los materiales de las barreras de ingeniería y el transporte de radionucleidos en la geosfera. Su estudio en análogos naturales ha contribuido al desarrollo y comprobación de modelos conceptuales para la disolución-precipitación de fases minerales secundarias, evidenciado su importancia en el mantenimiento de la estabilidad hidroggeoquímica en medios fracturados (*Cigar Lake*, *Poços de Caldas*), y su trascendencia en la retención de radionucleidos (*Palmottu*, *El Berrocal*). La aplicación de metodologías y códigos de modelización geoquímica o de flujo y transporte reactivo y la realización de ejercicios de “predicción ciega” en estos análogos, permite aumentar la confianza en los mismos.

2.14. Procesos de retardo: sorción y precipitación/ coprecipitación

En un sistema de AGP, los principales procesos de retardo de los radionucleidos en su interacción con los materiales del sistema, ralentizando el progreso a

través del mismo y reduciendo su concentración en solución son: sorción, precipitación-coprecipitación, difusión en la matriz, filtración molecular y exclusión iónica, siendo muy difícil distinguir entre los mismos y, por tanto, asignar un determinado efecto a un único proceso.

La *sorción* es la fijación de especies químicas disueltas a las superficies cargadas eléctricamente de los minerales, que engloba de forma genérica a la adsorción y al intercambio iónico. Su estudio en la *bentonita* no se ha considerado con profundidad en los análogos naturales, aunque si se ha estudiado en *formaciones arcillosas* (*Loch Lomond*) y en los *materiales de relleno de fracturas graníticas* (*Palmottu, El Berrocal*), que son los responsables de los procesos de retardo y sorción en medios fracturados.

La *precipitación* y *coprecipitación* son procesos de fijación o inmovilización estructural de solutos en un mineral nuevo. Su estudio en análogos (*Oklo, El Berrocal, Palmottu, Koongarra, Poços de Caldas, Tono Mine, Needle's Eye, Broubster y Maqarin*) ha aportado evidencias que apoyan el modelo conceptual del proceso y ha permitido probar diferentes modelos y códigos de cálculo del mismo.

2.15. Estado redox y frentes redox

El *estado redox* de un sistema acuoso se define por las concentraciones de todas las especies oxidadas y reducidas presentes. Su caracterización en un sistema hidrogeoquímico natural es una tarea metodológica intensiva debido a los múltiples procesos que lo condicionan y a la dificultad de determinar algunos datos fundamentales como el Eh. Los trabajos para la caracterización de los procesos redox en análogos naturales (*Palmottu, Oklo*), han contribuido al refinamiento y mejora de las metodologías disponibles para la determinación in situ del potencial redox en aguas subterráneas y han aportado información a modelos conceptuales de evolución del estado redox.

Los *frentes redox* se crean en el límite entre dos sistemas que interactúan con diferentes ambientes de oxidación. Las principales causas de su desarrollo en el sistema de AGP son: los agentes oxidantes y reductores generados en la radiólisis del agua próxima al contenedor; la introducción de aire y aguas oxidantes en las fases previas a la clausura del almacenamiento; y la entrada de aguas de recarga oxidantes. Como la solubilidad y especiación de muchos radionucleidos está muy condicionada por el estado redox del sistema, su potencial migración o retardo se ve afectada al atravesar un frente redox. Su estudio en sistemas naturales (*Poços de Caldas, Oklo, Cigar Lake*) puede ayudar a entender su dinámica bajo distintos escenarios, aportando información sobre los procesos asociados al desarrollo de frentes, los parámetros que influyen en la evolución y migración de los mismos y los valores de sus velocidades de propagación, contribuyendo al desarrollo y mejora de modelos conceptuales de evolución de frentes redox, etc.

2.16. Generación y transporte de coloides

Los coloides son partículas sólidas de tamaño pequeño (1 micra - 1 nm) dispersas en las aguas, con una superficie específica asociada muy elevada. En el sistema de AGP pueden existir en el medio natural o generarse por la degradación de las barreras de ingeniería. Pueden adsorber radionucleidos y constituir un mecanismo adicional de transporte, quedando los radionucleidos sorbidos a la fase coloidal excluidos de posibles efectos de retardo o de retención. Su estudio en análogos naturales (*Oklo*, *Cigar Lake*, *Palmottu*, *Poços de Caldas*, *Koongarra*, *El Berrocal*, *Maqarin*) ha contribuido a mejorar el conocimiento sobre sus procesos de generación en las barreras de ingeniería, los tipos, concentraciones y estabilidad de coloides en la geosfera, sus reacciones con los radionucleidos y el grado de reversibilidad de las mismas, su movilidad y transporte, etc., han aportado datos cuantitativos sobre algunos procesos relativos al transporte coloidal de radionucleidos y han contribuido a la verificación y aumento de confianza de códigos.

2.17. Procesos microbiológicos

En un sistema de AGP, los microorganismos pueden existir en el medio natural o ser introducidos durante la construcción de la instalación. Su viabilidad y posibilidad de subsistencia dependerán de los campos de radiación, la competencia por el agua con la bentonita, y la disponibilidad de fuentes de energía y nutrientes. La actividad microbiana puede contribuir a la degradación de las barreras de ingeniería, incrementar la solubilidad de los radionucleidos en el campo próximo, disminuir su capacidad de sorción y favorecer su transporte hasta la biosfera, al ser sorbidos de forma selectiva e irreversible sobre los microorganismos. Su estudio en análogos (*Palmottu*, *Poços de Caldas*, *El Berrocal*, *Oman*, *Maqarin*) se ha centrado en los tipos de microorganismos y su efecto en las condiciones hidrogeoquímicas y de migración de radionucleidos; la disponibilidad de nutrientes y fuentes de energía para los microorganismos; y su tolerancia a las condiciones extremas de radiación, temperatura y alcalinidad en el campo próximo del sistema de AGP.

2.18. Procesos acoplados

Los procesos térmicos, mecánicos, hidrodinámicos, de transporte de solutos, geoquímicos y radiológicos que pueden tener lugar en un sistema de AGP están relacionados entre sí y deben analizarse de forma acoplada, refiriéndonos a dicho acoplamiento con el término *procesos acoplados*. Su estudio en proyectos de análogos ha contribuido a su considerable desarrollo en los últimos años, especialmente en relación con los denominados modelos de transporte reactivo (relativos al acoplamiento de procesos hidrodinámicos, de transporte de solutos y geoquímicos). En concreto, su estudio en algunos

análogos (*Oklo, Maqarin, Poços de Caldas*) ha permitido desarrollar y verificar nuevos códigos de transporte reactivo, estudiar la génesis y comportamiento de frentes redox y contrastar diferentes modelos conceptuales de flujo y geoquímicos.

En la tabla 3 se incluye una clasificación de los análogos más significativos considerados en el estudio, en función de su aportación a los diferentes procesos posibles en los distintos componentes de un sistema de almacenamiento. En las filas de la tabla se listan los diferentes procesos que pueden darse en el sistema de AGP, y en las columnas los componentes del sistema. Los análogos se disponen en la tabla en función de sus analogías con los diferentes procesos y propiedades posibles en los distintos componentes o subsistemas del sistema de AGP. Así, por ejemplo, los análogos en los que se haya estudiado el proceso de la radiólisis, por su analogía con el proceso radiolítico que cabe esperar en un AGP debido al efecto de la radiación emitida por el residuo sobre el agua circundante, se listan en la casilla de cruce de la columna de ese proceso (efectos de la radiación) y la fila correspondiente al componente del combustible gastado.

La posibilidad de ocurrencia de un determinado proceso en un componente dado del sistema se destaca mediante un sombreado en gris de la casilla correspondiente, independientemente de que se haya identificado o no algún análogo en el que se estudie dicho proceso, esto permite visualizar qué aspectos de interés para la evaluación de la seguridad han sido abordados desde el área de los análogos naturales hasta la fecha.

	Componentes y subsistemas				
Procesos y Propiedades	Residuo: Combustible gastado y vidrios	Contenedor	Bentonita	Cemento/Hormigón	Geosfera e Interfase geosfera/biosfera
Disolución alteración del residuo / inventario/ distribución	Poços de Caldas Koongarra Cigar Lake Oklo El Berrocal Palmottu Shinkolobwe Peña Blanca				
Criticidad	Oklo				
Efectos de la radiación (radiólisis, cambios estructurales...)	Oklo Cigar Lake Cluff Lake Rabbit Lake Shinkolobwe Menzenschwand	Oklo			Nódulos ricos en U
Corrosión		Kronan Trespaderne Mijangos Las Matillas Cerro Muriano Tournai			
Disolución/ precipitación de impurezas en la bentonita			Cigar Lake		

Tabla 3. Resumen de la aportación potencial de los análogos naturales y arqueológicos estudiados en función de su analogía con los procesos posibles en los distintos componentes de un sistema de almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos.

Tabla 3.
(Continuación).
Resumen de la
aportación potencial
de los análogos
naturales y
arqueológicos
estudiados en
función de su
analogía con los
procesos posibles en
los distintos
componentes de un
sistema de
almacenamiento
geológico profundo de
residuos radiactivos.

Procesos y Propiedades	Componentes y subsistemas				
	Residuo: Combustible gastado y vidrios	Contenedor	Bentonita	Cemento/ Hormigón	Geosfera e Interfase geosfera/biosfera
Cementación			Kinekulle Busachi		
Transformación esmectita-illita			Kinekulle Busachi Cigar Lake		
Especiación/ solubilidad	Koongarra		Cigar Lake Oklo Oman	Oman Maqarin	Poços de Caldas Koongarra Cigar Lake Oklo El Berrocal Palmottu Oman Maqarin Needle's Eye Broubster
Difusión en medios arcillosos					Koongarra Loch Lomond Dunarobba
Sorción (Intercambio iónico, adsorción)					Loch Lomond El Berrocal Palmottu
Advección y dispersión					Poços de Caldas Koongarra Oklo Cigar Lake Palmottu El Berrocal Maqarin
Flujo de fluidos (agua/ gas/ bifásico)			Sistemas geotermiales Cigar Lake Kinnekulle Dunarobb		Oklo Cigar Lake Palmottu El Berrocal
Precipitación / Coprecipitación			Oklo Poços de Caldas	Maqarin	Poços de Caldas Koongarra Oklo Cigar Lake Palmottu El Berrocal Maqarin Tono Mine Needle's Eye Broubster
Difusión en la matriz					Cigar Lake Koongarra El Berrocal Palmottu Poços de Caldas Maqarin Oklo Tono Mine Marysvale Nódulos ricos en U

	Componentes y subsistemas				
Procesos y Propiedades	Residuo: Combustible gastado y vidrios	Contenedor	Bentonita	Cemento/ Hormigón	Geosfera e Interfase geosfera/biosfera
Interacción agua matriz rocosa				Maqarin Oman	Poços de Caldas Koongarra Cigar Lake Oklo El Berrocal Palmottu Maqarin Oman Kinnekulle Tono Mine Needle's Eye Broubster Steenkampskraal
Estado redox / frentes redox	Poços de Caldas Oklo Palmottu Shinkolobwe			Oman	Poços de Caldas Cigar Lake Oklo Palmottu
Generación y transporte de coloides	Oklo		Cigar Lake	Maqarin Oman	Poços de Caldas Koongarra Cigar Lake Oklo El Berrocal Palmottu Krunkebach Steenkampskraal Tono Mine
Procesos microbiológicos			Dunarobba	Maqarin Oman	Poços de Caldas El Berrocal Palmottu
Efectos térmicos (generación de calor, secado bentonita, expansión térmica, cambios química agua...)	Oklo				
Procesos mecánicos: Hinchamiento/ deslizamiento/ fluencia			Cigar Lake Oklo Kinnekulle		
Generación y transporte de gas	Oklo				
Procesos acoplados termo-hidro- mecánicos (T-H-C), transporte reactivo				Maqarin	Oklo Poços de Caldas Maqarin

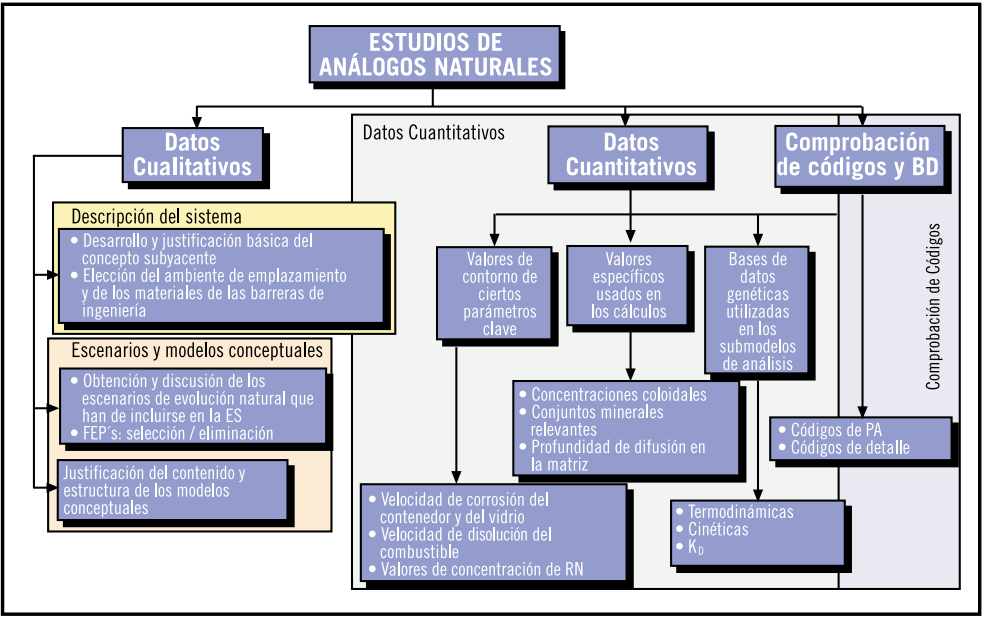
Tabla 3.
(Continuación).
*Resumen de la
aportación potencial
de los análogos
naturales y
arqueológicos
estudiados en
función de su
analogía con los
procesos posibles en
los distintos
componentes de un
sistema de
almacenamiento
geológico profundo de
residuos radiactivos.*

Contribución de los análogos a las áreas de la evaluación de la seguridad

El estudio de la contribución de los análogos naturales y arqueológicos a la evaluación de la seguridad de los sistemas de almacenamiento geológico de residuos, descrito en este documento, se inició con la identificación de las principales grandes áreas de ésta susceptibles de recibir apoyo de los estudios de análogos, y la descripción de la aportación potencial de la información de dichos análogos a la evaluación de la seguridad. Posteriormente, se llevó a cabo la revisión de un amplio conjunto de ejercicios de evaluación y, en ocasiones, de informes de apoyo a los mismos o de referencias citadas en ellos, en busca de las contribuciones reales que los análogos han hecho a la evaluación de la seguridad (ver tabla 4).

En este apartado se esboza la aportación potencial y real de los estudios de análogos a cada una de las áreas de la evaluación de la seguridad de los sistemas de AGP identificadas como susceptibles de recibir apoyo de estos: 1) diseño conceptual del sistema de almacenamiento; 2) definición y selección de escenarios y desarrollo de modelos conceptuales; 3) aportación de datos cuantitativos; y 4) comprobación de códigos y bases de datos. Esta contribución de los análogos a la evaluación de la seguridad se ilustra esquemáticamente en la figura 6.

Figura 6.
Esquema de la aportación de los estudios de análogos naturales a las áreas de la evaluación de la seguridad de sistemas de AGP identificadas como susceptibles de recibir apoyo de los mismos



1. DEFINICIÓN DEL SISTEMA (DISEÑO CONCEPTUAL)

La definición y descripción del sistema es una de las actividades iniciales en la evaluación del comportamiento, que implica definir los límites del sistema e identificar sus componentes y las relaciones entre ellos y con el entorno. Se trata de una actividad que se realimenta con los resultados de las sucesivas evaluaciones de la seguridad, obteniéndose así una definición más detallada del sistema a evaluar a medida que se avanza en este proceso iterativo.

El estudio de las analogías naturales que han estado presentes en la corteza terrestre durante millones de años, especialmente de los yacimientos de uranio como anomalías geoquímicas que han estado sometidas a una evolución natural a escalas espaciales y temporales similares a las que se consideran en el AGP, está estrechamente ligado no tanto a la génesis como a la evolución del propio concepto de AGP. De hecho, la prueba “independiente” de que el AGP es un concepto razonable es que ha resultado en gran medida “copiado”, aunque no intencionadamente, de la naturaleza. Es esta quizá la conclusión más clara que se puede extraer del estudio de yacimientos de uranio, como análogos naturales de un AGP.

Una de las aportaciones potenciales de los análogos en este ámbito es, por tanto, su capacidad para ayudar a identificar tanto materiales que hayan demostrado tener propiedades favorables para la seguridad del sistema multibarrera, como procesos o situaciones que reproducen las funciones de estas barreras, pudiendo llegar a contribuir a la definición o modificación del diseño conceptual del AGP.

No obstante, el estudio realizado en cuanto a la aportación real de los análogos al diseño conceptual del sistema de AGP, pone de manifiesto que, hasta ahora, los estudios de análogos naturales no se han utilizado en este sentido. Sin embargo, la fiabilidad a largo plazo del comportamiento de los materiales de las barreras de ingeniería puede validarse mediante el estudio de los análogos naturales.

Además, muchos de los procedimientos, metodologías y técnicas de muestreo y análisis que se utilizan para abordar el estudio de los análogos naturales o arqueológicos pueden ser de utilidad en la tarea de la caracterización de materiales de las barreras de ingeniería y del emplazamiento a distintas escalas.

2. ANÁLISIS DE ESCENARIOS Y DESARROLLO DE MODELOS

Los análogos pueden ayudar a identificar los principales factores (características del sistema y su entorno, procesos y sucesos, denominados en terminología anglosajona FEP's) que afectan a la evolución a largo plazo del sistema de almacenamiento, al aportar evidencia de los mismos en los sistemas análogos y, en algunos casos, incluso de las condiciones bajo las que se pueden producir. En este sentido, contribuyen a definir los escenarios o estados futuros más plausibles para los que deberá estudiarse el comportamiento del sistema de AGP.

Pueden también ayudar a determinar las relaciones e influencias existentes entre estos factores o FEP's y su importancia relativa a lo largo del tiempo bajo condiciones específicas, ya que integran los resultados de procesos a gran escala tanto espacial como temporal. Suministran, además, información sobre procesos que no se pueden estudiar ni, a veces, detectar en el laboratorio por las escalas espacial y temporal involucradas. De este modo, contribuyen a aumentar la confianza en el resultado del desarrollo de escenarios, ya que permiten

garantizar que no se han olvidado sucesos o procesos de relevancia que podrían pasar desapercibidos en estudios de laboratorio no expuestos a la complejidad de un sistema natural.

Además de ayudar a identificar los factores de mayor relevancia a partir de los cuales se definirán los escenarios a considerar en la evaluación de la seguridad, los estudios de análogos pueden contribuir a profundizar, a un nivel de mayor detalle, en el conocimiento de los procesos individuales que pueden afectar a la integridad de los diferentes componentes de un AGP y a desarrollar modelos conceptuales de los mismos, dada la analogía existente entre dichos procesos del sistema de AGP y los procesos que ocurren en sistemas naturales, como se ha indicado en el apartado 2 del anterior capítulo.

Para predecir el comportamiento a largo plazo de las barreras del sistema de almacenamiento y el transporte de radionucleidos a través de éste, se usan distintos modelos basados en extrapolaciones en el tiempo de las propiedades iniciales de las barreras, considerando mecanismos de degradación potenciales debidos a futuros cambios en las condiciones geológicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas del emplazamiento. El estudio de análogos proporciona una oportunidad para contrastar estos modelos y sus hipótesis desde una perspectiva a largo plazo. Sin embargo, para que el análogo sea de utilidad, debe estar limitado a un proceso determinado o a una combinación de procesos relevantes en el modelo global de la evolución de un sistema de almacenamiento. Debería además confirmarse que el/los procesos pueden ocurrir, bajo qué condiciones se dan y que sus efectos y las escalas espaciales y temporales implicadas son similares a los simulados por el modelo del proceso para un conjunto equivalente de condiciones.

3. APORTACIÓN DE DATOS CUANTITATIVOS

La tarea de obtención de datos necesarios para la aplicación de los modelos que permiten la evaluación del comportamiento del sistema de AGP, se realiza a partir de experimentos de laboratorio, estudios de campo, y mediante juicio de expertos. El estudio de los análogos naturales y arqueológicos puede apoyar los valores numéricos de ciertos parámetros obtenidos en laboratorio o, en su defecto, reducir incertidumbres en los rangos razonables de estos valores paramétricos.

4 COMPROBACIÓN DE MODELOS Y BASES DE DATOS

Uno de los pasos necesarios para incrementar la confianza en la evaluación de la seguridad es la validación o aumento de la confianza en los modelos que simulan el comportamiento del sistema, que permita garantizar que dichos modelos reproducen adecuadamente los procesos que pretenden modelar. Además, es preciso conocer

los rangos de aplicabilidad de los modelos, para asegurar que se utilizan dentro del rango adecuado.

La “validación” de los modelos predictivos empleados en la evaluación de la seguridad”, en el sentido estricto del término, no puede realizarse. Por un lado, no se puede describir el sistema por completo y controlar las condiciones de contorno e iniciales y la variación espacial y temporal de la importancia de los procesos, y por otro lado, tampoco es posible comprobar las predicciones de los modelos mediante la comparación con la observación directa del sistema por las largas escalas de tiempo que se deben considerar.

Los análogos naturales ofrecen la posibilidad de: 1) calibrar los modelos de algunos procesos que han tenido lugar en condiciones naturales y durante lapsos de tiempo similares a los que se darán en la evolución de un sistema de AGP; 2) estudiar la aplicabilidad de las bases de datos asociadas (a modelos geoquímicos principalmente) en dichas condiciones; y 3) reducir las incertidumbres y el conservadurismo que dichos modelos suelen incorporar.

Los análogos proporcionan, además, un campo “neutral” para las intercompares de modelos, que también contribuyen a aumentar la confianza en los resultados de los modelos y, por tanto, en la capacidad de predicción del comportamiento del sistema de AGP a largo plazo (NEA, 1999b).

En la tabla 5 se sintetiza el uso real de la información de los análogos naturales en los ejercicios de evaluación de la seguridad de sistemas de almacenamiento de residuos radiactivos realizados por agencias de residuos y organismos reguladores de diferentes países.

Tabla 4. Ejercicios de evaluación considerados en el estudio. Se indica la información consultada en cada uno de ellos (IP: Informe Principal; IA: informe de Apoyo; RB: referencias bibliográficas; PR: Peer Review) y los análogos citados.

Ejercicio	País	Organización / Año	Información consultada	Análogos citados
Project-90	Suecia	SKI / 1991	IP, IA, RB	A. Arqueológicos, Poços
SITE-94	Suecia	SKI / 1996	IP, IA, RB, PR	El Berrocal, Cigar, Poços, referencias generales a análogos
SKB-91	Suecia	SKB / 1992	IP	Cigar, Hamra, Poços, Broubster
SR-97	Suecia	SKB / 1999	IP, IA, RB, PR	Cigar, Kinnekulle, Poços, El Berrocal, Omán, Maqarin, Krunkelbach, Nevada Test Site, Broubster, A. Arqueológicos (Kronan), Koongarra, Oklo, Palmottu, Dunarobba
TVO-92	Finlandia	YJT / 1992	RB	Cigar, Palmottu, Poços, Cañón Kronan
TILA-99	Finlandia	POSIVA / 1994	IP, IA, RB	Cigar, Palmottu, Hyrkkölä, Poços, El Berrocal, Omán, Maqarin
KRISTALLIN-I	Suiza	NAGRA / 1994	IP, IA, RB	Vidrios basálticos, A. Arqueológicos, Hamra, Busachi, Poços
GEWÄHR	Suiza		RB	A. Arqueológicos, Oklo
AGP-Granitos	España	ENRESA / 1997	IP, IA	Referencias indirectas a análogos
AGP-Arcillas	España	ENRESA / 1999	IP	Referencias indirectas a análogos
Mol, Marivoet et al., (1996)	Bélgica	ONDRAF/ NIRAS / 1996	IP, RB	No hay referencias a análogos
NIREX-95	Gran Bretaña	NIREX / 1995	IP	No hay referencias a análogos
NIREX-97	Gran Bretaña	NIREX / 1997	IP, IA, RB, PR	No hay referencias a análogos
H-12	Japón	JNC / 1999	IP	Vidrios Basálticos, A. Arqueológicos, Oklo, Koongarra, Hamra, Busachi, Murakami, Tono Mine, Maqarin, Poços, Nevada Test Site
AECL-94	Canadá	AECL / 1994	IP, IA, RB	Cigar, Oklo, Kinnekulle, Avonlea
NRC-IPA Phase II	USA	CNWRA	IP, RB	Peña Blanca, Valles Caldera, Santorini
TSPA-VA	USA	US. DOE / 1998	IP, IA, RB, PR	A. climáticos y Termo-Hydro Chemical, Peña Blanca, Santo-rini, Cigar, Poços, Nevada Test Site, Oklo
TSPA-SR	USA	US. DOE / 1998	IP, IA, PR	Múltiples referencias (revisión de información de análogos)

Poços de Caldas	AECL-94 (Canadá)	Gewähr (Suiza)	Kristallin-1 (Suiza)	SKB-91 (Suecia)	SITE-94 (Suecia)	SR-97 (Suecia)	TVO-92 (Finlandia)	TILA-99 (Finlandia)	TSPA-VA (EEUU)
	Apoyo al conservadurismo del modelo de disolución del CG		Establecimiento de condiciones de contorno sobre el frente redox. Apoyo a la capacidad de retención de nucleidos por los productos de corrosión del contenedor. Apoyo a la dificultad de determinar los procesos de difusión en la matriz. Comprobación de códigos y bases de datos termodinámicos y datos de solubilidad	Datos para contraste de los límites de solubilidad. Apoyo al modelo de propagación del frente redox. Corroborar la hipótesis de importancia limitada de los coloides en los procesos de retención y transporte	Apoyo al modelo de propagación del frente redox.	Datos para contraste de los límites de solubilidad. Apoyo al modelo de propagación del frente redox. Soporte a las hipótesis sobre los procesos de coprecipitación y transporte coloidal	Proporcionar datos de coloides y población microbiana para el desarrollo de modelos	Datos para e contraste de los límites de solubilidad	Comprobación de códigos y bases de datos termodinámicos
Koongarra						Apoyo al planteamiento del transporte en el escenario de fallo del contenedor. Aporte de datos de profundidad de difusión en la matriz			
Cigar Lake	Demostrar la estabilidad a largo plazo del sistema análogo al AGP. Apoyo al conservadurismo del modelo de disolución del CG		Demostrar la estabilidad a largo plazo del sistema análogo al AGP. Comprobación bases de datos termodinámicos	Prueba el conservadurismo de la tasa de oxidación radiolítica del combustible gastado. Contraste de los valores de solubilidad	Prueba del conservadurismo del modelo de radiólisis y disolución oxidante del CG	Verificación de los límites de solubilidad. Desarrollo y prueba del conservadurismo del modelo de radiólisis. Comprobación bases de datos termodinámicos	Corroborar el modelo de disolución del CG	Desarrollo del modelo de disolución del CG. Verificación de los límites de solubilidad. Comprobación bases de datos termodinámicos	Apoyo a la estabilidad del CG en condiciones reductoras
Oklo	Apoyo al modelo del comportamiento del CG	Apoyo al modelo conceptual de liberación de radionucleidos	Comprobación bases de datos termodinámicos	Apoyo el modelo de oxidación radiolítica del combustible		Apoyo en el planteamiento del escenario de criticidad. Desarrollo y prueba de código de mezcla de aguas subterráneas y códigos hidrogequímicos			Apoyo a modelos conceptuales de procesos de movilización y transporte de nucleidos. Apoyo al planteamiento de escenario de intrusión ígnea y criticidad. Comprobación códigos hidrogequímicos

Tabla 5. Uso de la información procedente de los estudios de análogos en los ejercicios de evaluación de la seguridad y/o comportamiento de los sistemas de almacenamiento de residuos radiactivos

Tabla 5.
 (Continuación).
 Uso de la
 información
 procedente de los
 estudios de análogos
 en los ejercicios de
 evaluación de la
 seguridad y/o
 comportamiento de
 los sistemas de
 almacenamiento de
 residuos radiactivos

	AECL-94 (Canadá)	Gewähr (Suiza)	Kristallin-1 (Suiza)	SKB-91 (Suecia)	SITE-94 (Suecia)	SR-97 (Suecia)	TVO-92 (Finlandia)	TILA-99 (Finlandia)	TSPA-VA (EEUU)
El Berrocal					Datos de profundidad de difusión en la matriz	Datos de referencia de límites de solubilidad		Datos cualitativos y metodologías de estudio de escenarios climáticos	
Palinotou						Datos cualitativos y metodologías de estudio de escenarios climáticos Datos de profundidad de difusión en la matriz Comprobación código de mezcla de aguas subterráneas		Datos cualitativos y metodologías de estudio de escenarios climáticos	
Kinnekulle	Apoyo al modelo conceptual de comportamiento de la bentonita Comprobación de código para el proceso de ilitización				Apoyo al modelo conceptual de cementación silíceo	Apoyo al modelo conceptual de cementación silíceo Comprobación de código para el proceso de ilitización			
Dunarobba						Evidenciar el papel de la arcilla como barrera para la actividad microbiana			
Maqarín			Contraste de modelos y valores de solubilidad			Apoyo al desarrollo de modelos conceptuales de evolución de pluma hipercalcina Corroborar la durabilidad a largo plazo de los sistemas/barreras de hormigón		Apoyo al desarrollo de modelos conceptuales de evolución de pluma hipercalcina	Comprobación de códigos de transporte reactivo
Oman			Contraste de modelos y valores de solubilidad			Comprobación bases de datos termodinámicos		Comprobación bases de datos termodinámicos	
Cañón de Kronan	Prueba de modelos de corrosión del cobre						Corroborar tasa de corrosión del cobre		

Aplicación de los análogos en la comunicación

Los análogos naturales y arqueológicos tienen la potencialidad de proporcionar algunas de las mejores evidencias y fundamentos para aumentar la confianza en la seguridad del almacenamiento geológico profundo de los residuos radiactivos, ya que, además de aportar datos o servir como casos de comprobación de los modelos de la evaluación, pueden proporcionar ilustración e información de carácter no técnico a un amplio rango de audiencias. De hecho, en ambientes ajenos a la evaluación de la seguridad, este uso de los análogos se considera como una de las principales razones de ser de los mismos.

Los análogos son uno de los principales argumentos que pueden utilizarse ante audiencias no técnicas para explicar el comportamiento a largo plazo del sistema de almacenamiento. En general, existe un amplio consenso sobre el hecho de que muchos grupos no familiarizados con los aspectos técnicos del almacenamiento geológico encontrarán más creíbles aquellas conclusiones de una evaluación del comportamiento que vayan acompañadas de ejemplos naturales paralelos para su comparación y comprensión (Miller et al., 2000).

1. MÉTODOS Y SOPORTES DEL USO DE LOS ANÁLOGOS EN LA COMUNICACIÓN

En la actualidad, existen buenos ejemplos de la utilización de la información de los análogos para ilustrar aspectos relevantes de la seguridad del AGP en la comunicación al público, tanto por parte de agencias de gestión de residuos y organismos reguladores de diferentes países, como por otras instituciones, organismos o particulares. Este uso de la información de los análogos con fines divulgativos se ha llevado a cabo a través de muy diversos soportes: vídeos, folletos, artículos, recursos de Internet (páginas web) exposiciones itinerantes y otro tipo de actividades de cara al público.

Entre el material sobre análogos naturales *editado o desarrollado directamente por organismos reguladores o agencias de residuos* caben destacar los siguientes:

- Los distintos tipos de *folletos divulgativos* sobre análogos naturales publicados por agencias de residuos europeas como NIREX (Reino Unido), POSIVA (Finlandia) o SKB (Suecia), así como dos folletos incorporados en la página web del Proyecto Yucca Mountain de EEUU titulados: *Oklo: natural nuclear reactors*, dedicado a dicho análogo y *Scientists look to nature for insight into how a repository would perform*, en el que se explica de forma sencilla la utilidad del estudio de los análogos para la evaluación del comportamiento del concepto de almacenamiento de Yucca Mountain. Entre los análogos considerados se citan algunos especialmente “gráficos” para el público como el caso de las cuevas de Altamira en España. Estos folle-

tos constituyen uno de los soportes de comunicación al público más utilizados, en los que se transmiten aspectos concretos de forma clara y directa.

- El vídeo *Vestigios del futuro* (“Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal”), resultado de una colaboración internacional en el marco de la Comunidad Europea (coordinada por NAGRA, y en la que participaron además, SKB, NIREX, CEC, US-DOE, ONDRAF, Enresa y AECL) y de una amplia distribución, en el que se emplean distintos análogos naturales y arqueológicos (Cigar Lake, Oklo, Poços de Caldas, Dunnaroba, la muralla de Adriano, etc.) para ayudar a comprender al público los procesos que pueden afectar a largo plazo al sistema de almacenamiento y contribuir a aumentar la confianza en la seguridad del concepto de AGP. Con objetivos similares, SKB ha editado una serie de tres vídeos titulados: *Nature’s own repository* (dedicado al análogo de Cigar Lake), *Nature’s own technology* (sobre análogos arqueológicos) y *Nature’s own nuclear waste* (centrado en el análogo de Oklo). Asimismo, Enresa ha editado un vídeo sobre los trabajos desarrollados en el análogo de El Berrocal (España) y su relación con la evaluación de la seguridad del almacenamiento.
- Las publicaciones divulgativas de carácter más general sobre el AGP, como la titulada *This is how we manage Sweden’s radioactive waste* (SKB Activities, 1995) en la que se dedican algunas páginas a los análogos y a su utilización en el ámbito de la evaluación de la seguridad, haciendo referencia a un buen número de análogos naturales y arqueológicos.
- Las páginas web de agencias de residuos y organismos reguladores, en las que hay numerosas referencias a análogos, aunque algunas son listados de proyectos y enlaces a documentos de carácter técnico. Por su interés divulgativo destacan las páginas de NAGRA, POSIVA y SKB, y la del proyecto *Yucca Mountain*, en las que se alude a determinados análogos naturales y arqueológicos en relación con la efectividad a largo plazo de las barreras del almacenamiento, y su utilidad para el estudio de la evolución del sistema de almacenamiento.
- La exhibición itinerante que realiza SKB todos los veranos a bordo del barco Sigyn por las costas suecas y finlandesas, en la que se presentan distintos análogos (Cigar Lake, Oklo, Dunarobba, el cañón del Kronan, etc.). Esta exposición permite una mayor interrelación con el público, que puede plantear dudas y preguntas que son respondidas por personal técnico puesto a disposición de la exhibición.

Entre el material editado por otros organismos, de forma independiente a los organismos reguladores y las agencias de residuos, destacan las páginas web de organizaciones internacionales como OIEA y NEA, así como la página web del

Natural Analogue Working Group (NAWG; <http://www.natural-analogues.com/>), que constituye una referencia básica si no la más importante en cuanto al estudio y la divulgación de los análogos naturales y su aplicación a los estudios de AGP.

En la tabla 6 se ilustra el uso potencial de los análogos analizados en la comunicación al público y su utilización real, cuando existe, indicándose el medio o soporte empleado para dicha comunicación.

2. ASPECTOS DEL AGP ILUSTRADOS MEDIANTE EL USO DE LOS ANÁLOGOS

El material revisado en relación con el uso de los análogos con fines divulgativos incluye tanto análogos naturales como arqueológicos e ilustra fundamentalmente el concepto de AGP y aspectos del comportamiento de los materiales de las barreras y de los procesos que pueden controlar su evolución temporal, como se indica a continuación:

- La *idoneidad del diseño multibarrera* de un AGP y su comportamiento a largo plazo es un aspecto frecuentemente destacado en el uso divulgativo de los análogos mediante esquemas simples que presentan las similitudes entre el análogo de Cigar Lake y el AGP. Este análogo ilustra claramente el paralelismo existente entre el contexto geológico del yacimiento y la mayoría de los conceptos de almacenamiento considerados internacionalmente. Dicha similitud, junto con la estabilidad del yacimiento a escalas de tiempo geológicas (sin huellas de su presencia en superficie) constituyen una ilustración clásica en la divulgación de la seguridad de un AGP.
- El *comportamiento de los materiales de las barreras* y la perdurabilidad en el tiempo de sus propiedades de aislamiento constituye otro aspecto frecuentemente ilustrado en el material divulgativo sobre análogos. Las observaciones realizadas en estos sistemas confirman la estabilidad y longevidad de los distintos tipos de contenedores (acero y cobre fundamentalmente), de las matrices borosilicatadas, del cemento y hormigón y la capacidad de aislamiento de las barreras bentoníticas a largo plazo.
- *Procesos relevantes para la evolución del almacenamiento*. Los análogos ponen de manifiesto la efectividad de los procesos de retención de radionucleidos a largo plazo en las barreras de ingeniería y, especialmente, en la geosfera.

3. IDENTIFICACIÓN DE AUDIENCIAS Y ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN

El conjunto denominado “audiencias no técnicas” incluye amplios colectivos de diversa índole tales como los agentes sociales y políticos involucrados en la toma de decisiones, distintas organizaciones no gubernamentales, ecologistas y el

público en general. Todos ellos tienen en común el hecho de no estar familiarizados con los aspectos conceptuales y técnicos de un AGP. Esta característica también es común a una gran parte de audiencias de tipo “técnico” o con alguna preparación científica, si bien en estos casos la comunicación debe tener una orientación diferente a la del resto de los grupos. En general, la comunicación y demostración de la seguridad debe adaptarse a los niveles socioculturales de los diferentes grupos, adecuando el mensaje a sus características (NEA, 2002).

El empleo de la información de los estudios de análogos en la comunicación a audiencias no técnicas, se ha dirigido mayoritariamente hacia el público en general, por lo que su uso divulgativo incide en la simplificación y en destacar el paralelismo existente entre los análogos y el sistema de AGP. En estos casos, se ha puesto de manifiesto la dificultad de encontrar el equilibrio adecuado entre el modo de presentar las pruebas aportadas por los análogos sobre la seguridad a largo plazo de los sistemas de AGP de un modo lo suficientemente simple como para facilitar su comprensión por audiencias no técnicas ni especialistas y, al mismo tiempo, con el rigor científico necesario para no minimizar o trivializar su valor.

El uso de medios audiovisuales permite una presentación más completa y detallada de los resultados obtenidos en los estudios de análogos y de su repercusión para el AGP. En este tipo de soporte se suelen incluir tanto análogos naturales como arqueológicos utilizando mensajes muy variados sobre el concepto de AGP, los materiales de la barrera y los procesos de migración de radionucleidos.

Se ha podido comprobar la dificultad del público para entender procesos geológicos, que ocurren en la escala de decenas o centenas de miles de años, circunstancia que exige una adecuada selección de los análogos considerados y un mayor esfuerzo en su tratamiento. Por otro lado, la mayor familiaridad del público con los materiales arqueológicos y las escalas de tiempo involucradas en la historia de este tipo de hallazgos, hace de los análogos arqueológicos un tipo de analogía cercana y adecuada para la comunicación a audiencias no técnicas.

Casi todos los medios de comunicación utilizados hasta el momento son básicamente pasivos. La experiencia iniciada por SKB en Suecia con las exhibiciones a bordo del barco Sigyn, que permiten una mayor interacción con el público, al poder éste plantear dudas y preguntas que son respondidas por personal técnico puesto a disposición de la exhibición, constituye una experiencia muy positiva que está teniendo una buena acogida (Smellie et al, 2000).

Tabla 6. Resumen del uso potencial y real de la información de los análogos naturales y arqueológicos en la comunicación al público de algunos aspectos relevantes del concepto y la seguridad de los sistemas de AGP

Análogo	Aportación potencial a la comunicación	Uso real en la comunicación al público
Poços de Caldas (Brasil)	Morro do Ferro: Evidencia que la movilidad del torio desde su yacimiento es muy baja Osamu Utsumi: Muestra la capacidad de los frentes redox que pueden darse en el campo próximo de un AGP para retener y retardar los radionucleidos	En el video "Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal"
Koongarra (Australia)	Ilustración de la capacidad del campo próximo y la geosfera en un AGP para la retención de radionucleidos aún en el caso de un posible fallo de sellado del sistema	
Cigar Lake (Canadá)	Ejemplo ilustrativo de un sistema de almacenamiento por el paralelismo entre éste y el sistema geológico natural Ilustración de la capacidad de aislamiento del sistema multibarrera del AGP: depósito de uranio de 1.300 Ma, sin rastro de él en superficie	Objeto del vídeo "Nature's own repository" editado por SKB y en el vídeo "Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal" Páginas web de Posiva (www.Posiva.fi/englant/index.html), SKB (www.skb.se) y NAGRA (www.Nagra.ch/) En la exhibición de SKB en el barco Sygn
Oklo (Gabón)	Evidencia que la radiactividad es un fenómeno natural: incluso han tenido lugar reacciones nucleares en cadena en la naturaleza (reactores naturales) Prueba que los productos de las reacciones nucleares pueden ser retenidos en los sistemas naturales.	Objeto del vídeo "Nature's own nuclear waste" de SKB y en el vídeo "Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal" Folletos: "Oklo: natural nuclear reactors" y "Scientists look to nature for insight into how a repository would perform" Páginas web de Posiva (www.Posiva.fi/englant/index.html), SKB (www.skb.se), Yucca Mountain (www.ocrwm.doe.gov) y de una universidad (www.curtin.edu.au/curtin/centre/waisrc/OKLO/index.shtml) En la exhibición de SKB en el barco Sygn
El Berrocal (España)	Ejemplo global y sencillo de la seguridad del AGP, al mostrar la limitada movilidad del uranio en el plutón granítico	Objeto de un vídeo editado por Enresa
Palmottu (Finlandia)	Muestra la estabilidad del combustible gastado	
Kinnekuille (Suecia)	Evidencia la longevidad y el mantenimiento de las propiedades deseadas de la barrera arcillosa	
Dunarobba (Italia)	Ilustración de la capacidad aislante y de preservación de las arcillas durante largos periodos de tiempo (más de un millón de años)	Amplia difusión de su existencia En el video "Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal" En las páginas web de Nagra (www.nagra.ch) y SKB (www.skb.se) En la exhibición de SKB en el barco Sygn
Loch Lomond (Escocia)	Ilustración de la excelente capacidad de aislamiento de la arcilla	En el video "Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal" En la exhibición de SKB en el barco Sygn
Omán	Ilustración de las condiciones hipercalinas asociadas a la existencia de sellos de cemento/hormigón en el almacenamiento	

Análogo	Aportación potencial a la comunicación	Uso real en la comunicación al público
Maqarin (Jordania)	Ilustración del efecto sobre la seguridad del AGP de las condiciones hiperalcalinas asociadas a la existencia de sellos de cemento/hormigón en el almacenamiento	Página web de SKB (www.skb.se)
Cañon de Kronan (Suecia)	Ilustración de la resistencia a la corrosión y longevidad del cobre, aumentando la confianza en su conveniencia como material del contenedor	En el video "Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal" Página web de SKB (www.skb.se) En la exhibición de SKB en el barco Sygn
Clavos de Inchtuthil (Reino Unido)	Evidencia que donde hay grandes volúmenes presentes de acero parte de éste puede no verse afectado por la corrosión debido a la protección de las capas oxidadas	En el video "Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal"
Sarcófago de Tournai (Bélgica)	Ilustración del papel de la capa protectora de corrosión en los metales para evitar el deterioro de los mismos	
Acquarossa (Italia)	Evidencia el buen grado de conservación de un hormigón con carbonatos en su interior	
Muralla de Adriano (Reino Unido)	Demostración comprensible de la durabilidad del cemento	En el video "Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal"
Tumba de Changsha (China)	Evidencia de la capacidad aislante de la arcilla	

*Tabla 6.
(Continuación).
Resumen del uso
potencial y real de
la información de
los análogos
naturales y
arqueológicos en la
comunicación al
público de algunos
aspectos relevantes
del concepto y la
seguridad de los
sistemas de AGP*

Fichas ilustrativas de los análogos seleccionados

1. SELECCIÓN DE LOS ANÁLOGOS A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

La gran cantidad y dispersión de la información sobre análogos existente en el ámbito internacional, el distinto grado de detalle y profundidad de los estudios de análogos, así como su diferente interés para el programa español de AGP, hizo necesaria una selección de los análogos más significativos a considerar en el estudio del CSN, atendiendo a los siguientes criterios:

- Representatividad en los análogos de los conceptos de almacenamiento geológico profundo para residuos de alta actividad que se contemplan en el programa español tanto en granito como en arcillas.
- Relevancia de los estudios de análogos, valorada en función de la cantidad y calidad de la información aportada por los mismos y del número de organizaciones implicadas. Se ha prestado una atención especial a aquellos estudios en los que han participado organismos reguladores.
- Capacidad potencial de aportar información a los distintos aspectos de la evaluación del comportamiento a largo plazo de los materiales y componentes de los sistemas de AGP y relevancia reconocida de la aportación proporcionada a las evaluaciones de la seguridad consultadas de forma preliminar (SKI, 1991 y 1996; Goodwin *et al.*, 1994; Nagra, 1994; Neal *et al.*, 1994; USDOE, 1998; SKB, 1999a ; Vieno y Nordman, 1999; y JNC, 2000).

El marco de referencia para esta selección podría verse modificado en el futuro debido a la evolución del concepto de análogo, a posibles desarrollos en los estudios de estos sistemas, así como a cambios asociados al avance del programa de AGP español al que se pretende aplicar las lecciones aprendidas en este estudio, ya que se encuentran aún en fases iniciales de definición. Si se considerara necesario, podría actualizarse la selección atendiendo a dichas modificaciones.

Como resultado del proceso de selección, se han considerado un total de 43 análogos naturales geológicos clasificados, en función de la importancia de la información que pueden aportar a la evaluación de la seguridad, en 10 análogos principales y 33 secundarios, así como 8 análogos arqueológicos, agrupados, atendiendo al mismo criterio, en 6 principales y 2 secundarios¹⁵.

¹⁵ Entre los análogos principales no se han estudiado los sistemas hidrotermales, los análogos de materiales como el vidrio o bitumen y los análogos antropogénicos por estar fuera del alcance del proyecto o por tratarse de sistemas mucho más específicos, e incluso en algunos casos no ser estrictamente análogos naturales.

Los *análogos naturales*, a su vez, se han clasificado en función del sistema geológico que representan, de la forma siguiente:

- Yacimientos de uranio
- Medios arcillosos
- Ambientes hiperalcalinos

Los *análogos arqueológicos*, se han agrupado como sigue:

- Análogos metálicos
- Análogos del cemento y el hormigón
- Análogos de la barrera arcillosa.

Además, dada la riqueza arqueológica de la Península Ibérica y la realización de un proyecto anterior por el grupo de la UCM sobre análogos arqueológicos nacionales (Enresa, 2000), se han analizado los hallazgos arqueológicos españoles siguientes (seleccionando los más representativos entre todos los estudiados en los últimos años): Barra de Trespaderne (Burgos), Clavo de Las Matillas (Madrid), Clavos de Mijangos (Burgos), Clavos de Cerro Muriano (Córdoba).

En la tabla 7 se presentan los análogos descritos y en la figura 6 su situación geográfica.

Tabla 7.
 Análogos naturales
 y arqueológicos
 analizados
 (véase su
 localización en la
 figura 6)

Nivel	Tipo de sistema	Análogo	
Análogos Principales	Yacimientos de Uranio	Poços de Caldas (Brasil) Koongarra (Australia) Palmottu (Finlandia)	Oklo (Gabón) Cigar Lake (Canadá) El Berrocal (España)
	Análogos Arcillosos	Kinnekkulle (Suecia)	Dunarobba (Italia)
	Ambientes Hiperálcalinos	Omán	Maqarin (Jordania)
	Arqueológicos metálicos	Cañón del Kronan (Suecia) Clavos romanos (Inchtuthil, Reino Unido) Sarcófago de Tournai (Bélgica)	Yacimientos españoles: • Barra de Trespaderne • Clavo de Las Matillas • Clavos de Mijangos • Clavos de Cerro Muriano
	Arqueológicos cerámicos y vítreos (cementos, vidrios)	Acquarossa (Italia) Muro de Adriano (Escocia)	
	Arqueológicos arcillosos	Tumba de Changsha (China)	
Otros Análogos/ Análogos secundarios	Yacimientos de Uranio	Tono Mine (Japón) Shinkolobwe (Zaire) Needle's Eye (Reino Unido) Broubster (Reino Unido) South Terras (Reino Unido)	Krunkelbach (Alemania) Marysvale (EEUU) Lianshanguan (China) Steenkampskraal (Sudáfrica) Kanyemba (Zimbabue) Peña Blanca (Méjico)
	Estudios en sedimentos	Loch Lomond (Reino Unido) Llanura Abisal de Madeira (Portugal)	Nódulos ricos en U (Suiza, Reino Unido, Holanda) Gorleben (Alemania)
	Zonas de contacto con rocas ígneas	Stock Eldora (EEUU) Stock Alamosa River (EEUU)	Valles Caldera (EEUU)
	Materiales arcillosos	Orciático (Italia) Condados de Li An y An Ji (China)	Murakami (Japón)
	Alteración de rocas	Rompeolas de Falmouth (Reino Unido)	Plutón de Eye Dashwa (Canadá)
	Sistemas hidrotermales	Granito de Auriat (Francia) Newberry (EEUU)	Plutón de East Bull Lake (Canadá)
	Hierro y Cobre	Bühl (Alemania) Disko (Groenlandia)	Keweenaw (EEUU) Hyrkköla (Finlandia)
	Vidrio y SYNROC	Vidrios basálticos Vidrios riolíticos	Zirconolitas
	Arqueológicos metálicos	Santorini (Grecia)	
	Arqueológicos cerámicos y vítreos (cementos, vidrios)	Tanque del Castillo de Uppsala (Suecia)	

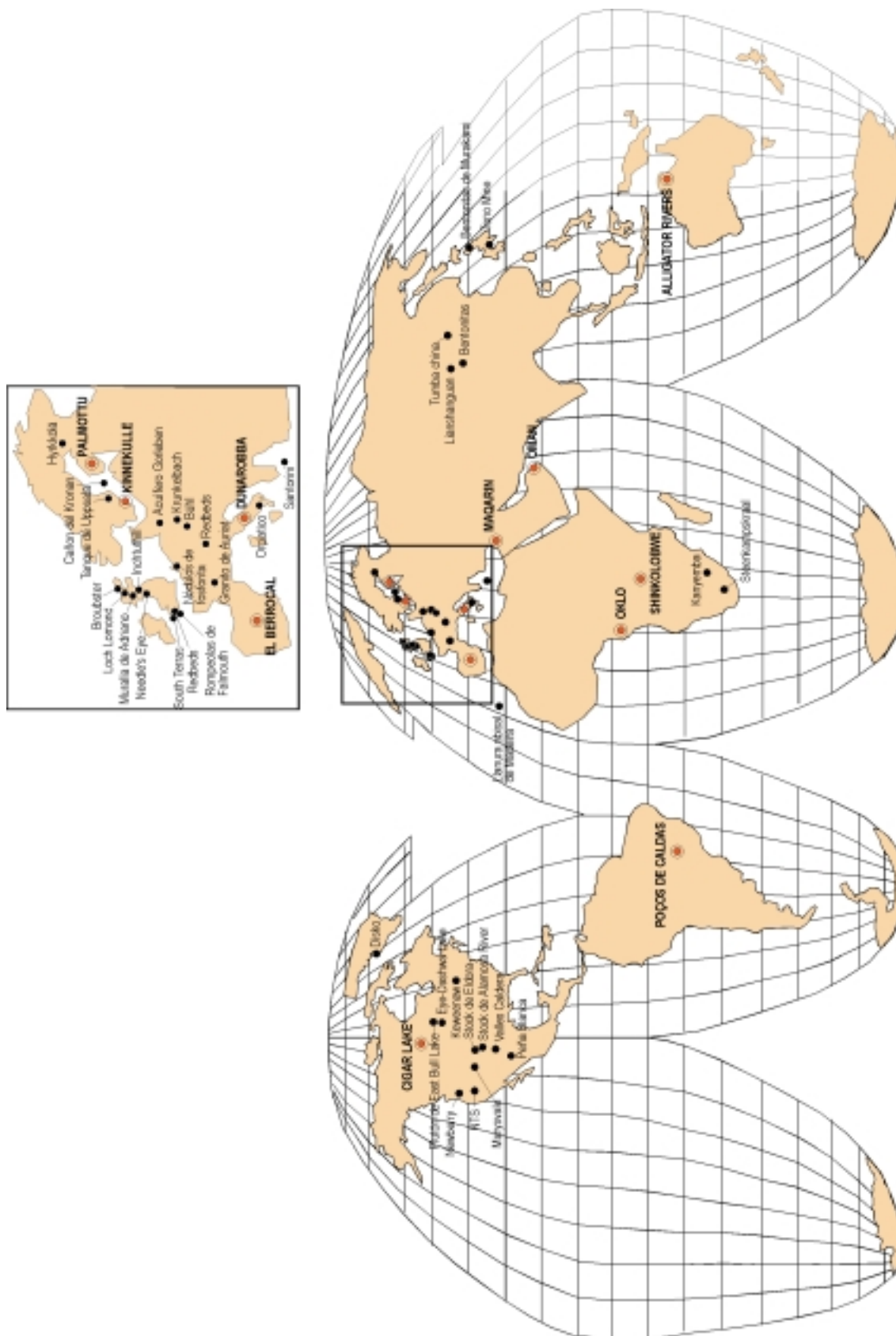


Figura 6.
*Localización
geográfica de los
análogos naturales
y arqueológicos
estudiados*

2. DESCRIPCIÓN DE ANÁLOGOS: FICHAS ILUSTRATIVAS

Tras la selección de los análogos más significativos a considerar en el proyecto, se llevó a cabo el análisis detallado de los estudios de dichos análogos realizados por distintas organizaciones internacionales, agencias de residuos y organismos reguladores. El resultado de este análisis se ha recogido en un documento del proyecto, que constituye el segundo volumen de esta publicación en el que se describen de forma detallada los análogos naturales y arqueológicos de los sistemas de AGP seleccionados para su estudio en el proyecto, incluido un análisis preliminar sobre su aportación potencial a la evaluación de la seguridad y la comunicación.

En concreto, para cada análogo, se presenta la descripción del sistema natural, que es, obviamente, mucho más extensa para los análogos naturales. En ese caso, la descripción incluye el marco geológico en el que se sitúa el sistema, las características mineralógicas y geoquímicas de las fases sólidas (en los yacimientos de uranio¹⁶, las menas metálicas o las arcillas), la hidrogeología y los modelos de flujo del agua subterránea, cuando existe información disponible. Esta información se completa con la descripción hidrogeoquímica de los distintos sistemas acuosos presentes¹⁷ y de los ejercicios de modelización geoquímica realizados en cada caso.

Una vez descrito y caracterizado el sistema, se analiza por qué y de qué es análogo dicho sistema y se indica de forma preliminar la aportación de los estudios realizados a los distintos aspectos de la evaluación de la seguridad (descripción del sistema, escenarios y modelos conceptuales, aportación de datos cuantitativos, comprobación de modelos y bases de datos), así como su contribución a la comunicación.

Para cada uno de los análogos principales seleccionados y analizados, se han elaborado, a partir de las correspondientes descripciones detalladas antes referidas, fichas sintéticas inspiradas en las desarrolladas en su día por De Putter & Charlet (1991), que intentan dar una visión gráfica de los aspectos más destacables en ellos. Cada una de las fichas incluye:

- objetivos del estudio del análogo y organismos involucrados en el mismo,
- localización geográfica del análogo,
- descripción del sistema natural o del hallazgo arqueológico e información relevante,
- analogías principales que presenta con respecto a los materiales y procesos de un sistema de almacenamiento,
- aportación a la evaluación de la seguridad y a la comunicación y

¹⁶ En el caso de los yacimientos de uranio, se ha intentado también describir la historia sobre su génesis.

¹⁷ En el estudio de estos sistemas naturales se han producido avances notables en cuanto a metodologías de muestreo y análisis, que no se han abordado por considerarse fuera del alcance del presente documento de síntesis.

- algunas de las referencias bibliográficas más significativas donde se puede ampliar la información sobre el análogo incluida en la ficha.

A continuación se incluyen las fichas descriptivas de los análogos principales seleccionados clasificadas en los siguientes grupos: *yacimientos de uranio*, *materiales arcillosos* y *ambientes hiperalcalinos* (correspondiendo a la división hecha de los análogos tipo medios geológicos) y *análogos arqueológicos*.

2.1. Yacimientos de uranio

De los tres grupos más relevantes de sistemas naturales analizados, los yacimientos de uranio son los mejor representados dentro del proyecto con seis análogos calificados de principales y 11 entre los secundarios (ver tabla 7).

Su interés como análogos naturales estriba en los mecanismos que han sido responsables de su formación y de cualquier removilización subsiguiente de radionucleidos. Los yacimientos secundarios y las regiones removilizadas adyacentes a los yacimientos son incluso de más interés debido a que normalmente se forman a temperaturas que son más representativas de las condiciones del sistema de almacenamiento (<100 °C) que las propias condiciones de formación del yacimiento.

Una de las limitaciones de muchos yacimientos para su estudio como análogos es que suelen estar a profundidades relativamente someras en las que flujos importantes de aguas subterráneas oxigenadas dominan los procesos de transporte, lo cual difiere de las condiciones de bajo flujo y ambiente reductor que son de esperar en un sistema de AGP. Sin embargo, este tipo de situaciones ha sido usado para aumentar el grado de conocimiento sobre la evolución de un sistema de almacenamiento que se ve sometido a condiciones mucho más agresivas de lo que inicialmente se espera y en el que falla la capacidad de retención prevista.

Una cuestión importante a tener en cuenta en la caracterización de estos sistemas es que aquellos yacimientos sometidos a explotación minera pueden estar perturbados, lo que puede hacer difícil el conocimiento de las condiciones de contorno de los sistemas geoquímico e hidrogeológico.

Las principales características de los yacimientos de uranio y los procesos que tienen lugar en su entorno, cuyo estudio es de potencial interés como análogos son:

- la composición y el comportamiento de *estabilidad y corrosión/disolución a largo plazo de la uraninita* como análogo del combustible gastado,
- el papel de los *procesos redox* en la movilización y el retardo de los radionucleidos, incluyendo los frentes redox y otras discontinuidades geoquímicas,
- los controles de la *especiación y solubilidad* de los radionucleidos en las aguas subterráneas, incluyendo la formación y el comportamiento de los *coloides*,

- los *procesos de retardo* que afectan a los radionucleidos removilizados, incluyendo los fenómenos de sorción sobre superficies y la difusión en la matriz,
- la posibilidad de usar las series de desequilibrio radiactivo para estimar la longevidad de varios procesos de movilización y retención, y
- la influencia de *coloides y poblaciones bacterianas* en la movilidad de los radionucleidos.



POÇOS DE CALDAS (Brasil)

El proyecto se desarrolló entre 1986 y 1989 bajo supervisión de SKB, NAGRA, UK-DoE y US-DOE.

Los principales objetivos del estudio fueron la caracterización geoquímica del transporte de radionucleidos sensibles a cambios en las condiciones redox y la comprobación de códigos y bases de datos termodinámicos.

Descripción del análogo

Poços de Caldas es una caldera volcánica de 35 km de diámetro situada en la región de Minas Gerais (sur de Brasil), una de las zonas con mayor nivel de radiactividad natural del mundo. Esta caldera se formó hace unos 75 millones de años y la posterior actividad hidrotermal en la zona dio lugar a la formación de numerosas acumulaciones metálicas, entre las que se encuentran la mina a cielo abierto de *Osamu Utsumi*, en la que dominan los minerales de Uranio (U) con Torvo (Th) y lantánidos (REE) subsidiarios y la mineralización rica en Th y REE de *Morro do Ferro*.

En *Osamu Utsumi* (figura 1) la característica más importante es la formación de un frente redox, de removilización del uranio y otros elementos desde la zona mineralizada, al que va asociada la aparición de un enriquecimiento de uranio a ambos lados del frente: como pechblenda en la zona reducida y asociado a oxihidróxidos de hierro en la zona oxidada (fotografía 1).

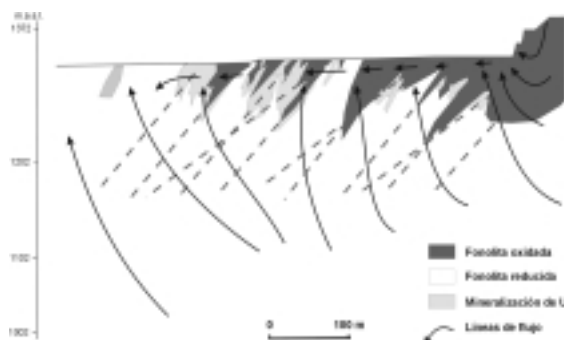


Figura 1. Esquema del entorno de la mineralización de *Osamu Utsumi* y direcciones de flujo predominante (Modificada de Chapman et al., 1991)

Este frente se originó por la infiltración de aguas meteóricas oxidantes y su interacción con el terreno. La disposición de las zonas oxidadas y reducidas (figura 1) corresponde a esta situación pasada, en la que la penetración de la meteorización tuvo



Fotografía 1. Frente redox (gentileza de Jonh Smellie)



Fotografía 2. Frente redox a partir de una fractura (gentileza de Fred Karlsson, SKB)

lugar preferentemente a través de las fracturas (fotografía 2). En la actualidad, la hidrogeología de Osamu Utsumi está muy influenciada por la explotación del yacimiento, de forma que lo que se observa es un flujo ascendente de aguas reductoras en zonas que originalmente eran de recarga de aguas oxidantes. Las velocidades de flujo son, en general, altas ($2 \cdot 10^{-2}$ m/día) dominando la advección sobre la difusión.

En *Morro de Ferro* (figura 2), a diferencia de Osamu Utsumi, las condiciones hidrogeológicas no se han visto afectadas por la explotación minera, lo cual ha permitido estudiar mejor los procesos de interacción agua-roca y constatar la inmovilidad de los elementos transuránicos bajo condiciones normales de pH y Eh.

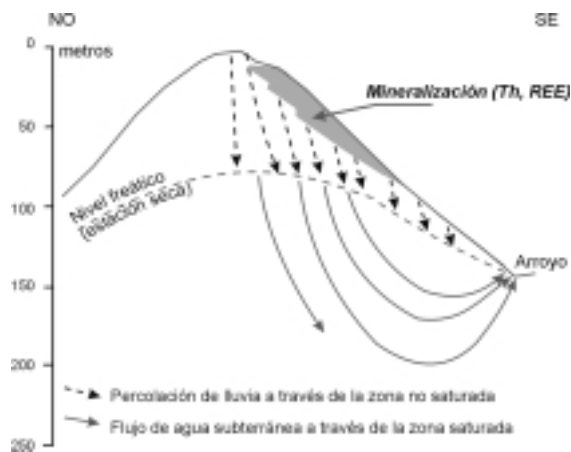


Figura 2. Representación esquemática de la interacción agua-roca en Morro do Ferro (Modificada de Chapman et al., 1991).

Analogías

Las principales analogías son:

- La disolución de la uraninita y la pechblenda es análoga del proceso de disolución del combustible gastado incluyendo el estudio de los lantánidos (presentes en concentraciones muy elevadas en este sistema), como análogos químicos de los actínidos.
- Los procesos de retención de uranio y otros elementos traza en los oxihidróxidos de hierro en la parte oxidada del frente redox son análogos de los posibles procesos de retención en los productos de corrosión del contenedor.
- El frente redox desarrollado en *Osamu Utsumi* es análogo del que se puede desarrollar en el campo próximo de un sistema de almacenamiento debido a la radiólisis.
- La caracterización de las interacciones entre los radionucleidos, las fases coloidales y las superficies minerales

ayuda a la comprensión de la estabilidad coloidal y de los procesos de migración de estos elementos en un sistema natural.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad

Las principales aportaciones consisten en:

- Apoyo al modelo conceptual de estabilidad del combustible gastado en condiciones reductoras: la disolución oxidante de la uraninita se produce en condiciones de Eh superior a 300 mV (los valores deducidos en laboratorio y usados en los ejercicios de evaluación se sitúan en 120 mV).
- Apoyo al modelo conceptual de corrosión del contenedor: los radionucleidos son inmovilizados por coprecipitación y sorción en los oxihidróxidos de hierro.
- Datos cuantitativos sobre la velocidad de avance de un frente redox: 1-20 mm en 1000 años.
- Comprobación de aproximaciones distintas de modelización del transporte-reactivo.
- Verificación de bases de datos termodinámicos en diferentes condiciones redox.

Este análogo se ha utilizado en varios ejercicios de evaluación de la seguridad como: AECL-94 (Canadá) Kristallin-1 (Suiza), SKB-91, SITE-94 y SR 97 (Suecia), TSPA-VA (EE.UU) y TVO-92 y TILA-99 (Finlandia)(ver capítulo 6, tabla 5).

Aportación a la comunicación

En *Morro de Ferro*, las numerosas muestras de agua recogidas, demuestran que la movilidad del torio del depósito es extremadamente baja (dos veces menor que la permitida en el agua de bebida).

En *Osamu Utsumi*, se evidencia que los frentes redox que pueden darse en el campo próximo de un AGP pueden retardar la movilidad y retener los radionucleidos.

Se emplea en el video "Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal" realizado por diferentes agencias de residuos europeas (ver capítulo 7, tabla 6).

Referencias

- Chapman, N.A., McKinley, I.G., Shea, M.E. and Smellie, J. (-1991). The Poços de Caldas project. Summary and implications for radioactive waste management. (Technical Report SKB TR 90-24), SKB, Stockholm, Sweden.
- Gumtensperger, M.A., Lindquist, J. (1999). "Public Perception and natural analogues". Report EUR 17543 EN p. 543. Proceedings of the Fourth Conference of the EC on the Management and Disposal of Radioactive Waste, Luxembourg.



KOONGARRA (Australia)

El proyecto (Alligator Rivers Analogue Project ARAP) comenzó en 1987 a cargo de OECD/NEA, ANSTO, JAERI, PNC, SKI, UK-DoE y USNRC, y concluyó en 1992. Los objetivos fundamentales del Proyecto fueron contribuir al desarrollo de modelos de transporte de radionucleidos.

Descripción del análogo

El estudio se ha centrado en el yacimiento de uranio (U) de Koongarra, situado en el Geosinclinal de Pine Creek, al norte de Australia, en la zona de Alligator Rivers. Este yacimiento se formó hace aproximadamente 1800 millones de años debido a una importante actividad hidrotermal. Aunque en esta zona existen varios cuerpos mineralizados ricos en uranio (hasta 1% de riqueza) en el proyecto ARAP se ha considerado solamente el yacimiento de Koongarra (figura 1) ya que

esta mineralización es la que ha sufrido en mayor medida alteración y meteorización durante los últimos 1-3 Ma.

La mayor parte del flujo del agua subterránea tiene lugar en esta zona a través de los esquistos parcialmente meteorizados de la formación Cahill. La recarga de este acuífero se produce desde la formación Kombolgie a través de la falla Koongarra, y por la infiltración directa del agua de lluvia. Esta última componente de la recarga produce una dilución y da lugar a una estratificación vertical de las características hidroquímicas en la formación Cahill.

Debido a la intensa meteorización, el uranio y otros elementos contenidos inicialmente en las venas mineralizadas (en forma de uraninita y pechblenda) han sufrido procesos de disolución y precipitación posterior, pasando a las aguas subterráneas y reteniéndose por distintos procesos. Estos procesos han dado lugar a

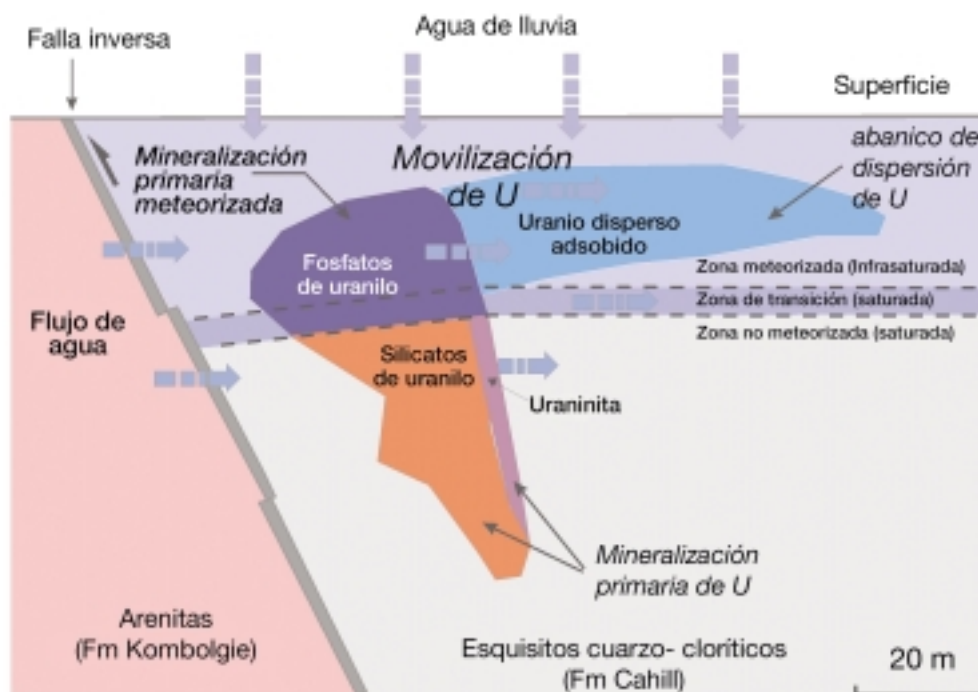


Figura 1. Morfología de la mineralización de Koongarra. En el esquema se muestra la posición de las diferentes zonas de meteorización en profundidad y los minerales de uranio que caracterizan cada sector de la mineralización. También se indican las vías de flujo del agua subterránea.

la aparición de distintas zonas de mineralización secundaria y de una aureola de dispersión de U (de unos 80 m desde el cuerpo mineralizado hacia el sur), donde se pueden diferenciar varias zonas en función de su mineralogía (figura 1):

- Silicatos de uranio secundarios por alteración in situ de los minerales primarios.
- Fosfatos secundarios de uranio actualmente lavados por las aguas subterráneas.
- Uranio disperso asociado (por sorción y coprecipitación) a arcillas y oxihidróxidos de hierro.

Las características de cada una de las zonas, la distribución de uranio en ellas y los procesos que las han originado son los temas más estudiados en este sistema.

Analogías

El efecto producido por los procesos de lixiviación de la uraninita en condiciones oxidantes, la migración y retención de radionucleidos y el movimiento de frentes de meteorización, resultan analogías excelentes del comportamiento esperable en un sistema de almacenamiento geológico de RAA en una fase avanzada de degradación en condiciones normales o en caso de fallo en la capacidad de retención y sellado.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad

Las principales aportaciones consisten en:

- Apoyo al modelo conceptual de estabilidad del combustible gastado en condiciones reductoras.
- Apoyo al modelo conceptual de procesos de inmovilización por precipitación, coprecipitación y sorción de radionucleidos en minerales secundarios (fosfatos, minerales de la arcilla y oxihidróxidos de hierro).

- Desarrollo de un modelo conceptual de sorción.
 - Constatación de la escasa relevancia de la difusión en la matriz.
 - Constatación de la importancia del proceso de retroceso alfa.
 - Datos cuantitativos sobre la velocidad de migración del U: 25-100 mm en 1000 años.
 - Verificación de la metodología de generación de escenarios desarrollada por SKI.
 - Contraste de modelos de flujo, geoquímicos, de transporte reactivo, de sorción y bases de datos termodinámicas.
- Se ha utilizado en el ejercicio sueco SR 97 (SKB, 1999) para ayudar a la definición del escenario de fallo del contenedor (Ver tabla 5, capítulo 6).

Aportación a la comunicación

Podría utilizarse para ilustrar la capacidad del campo próximo y la geosfera de un sistema de AGP para retener y retardar los radionucleidos aún en el caso de un posible fallo de sellado del sistema.

Referencias

- Duerden, P., Lever, D.A., Sverjensky, D.A. and Townley, L.R. (1992). Alligator Rivers Analogue Project Final Report, Vol. 1: Summary of findings. (Final Report DOE HMIP RR 92/071), DOE-UK, London, UK, 138 p.
- NEA (1994). ARAP. The international Alligator rivers analogue project. Background and results. OECD Nuclear Energy Agency, París, Francia, 77 p.
- SKI (1996). SKI SITE-94. Deep repository performance assessment project. 2 vols. (Technical Report SKI R 96/36), SKI, Stockholm, Sweden, 305-660 p.



CIGAR LAKE (Canadá)

El proyecto se desarrolló entre 1984 y 1993 como fruto de la cooperación de AECL, COGEMA y CLMC. En 1989 se incorporó al estudio SKB y algo después el US-DOE a través del LANL. En 1995, SKB financió una revisión de los datos obtenidos durante el proyecto anterior con el propósito de aprovechar esa información a la luz de los resultados de otros análogos y con la ayuda de modelos no utilizados en su momento (Cigar Lake es el único de los grandes análogos cuyos datos han sido reevaluados en un proyecto posterior). Sus objetivos fueron la evaluación de la estabilidad de la uraninita, la evaluación de códigos y bases de datos termodinámicos, el estudio del transporte a través de la bentonita y del papel de los coloides y compuestos orgánicos en el transporte de radionucleidos.

Descripción del análogo

El yacimiento de uranio de Cigar Lake se localiza en la cuenca de Athabasca, provincia de Saskatchewan, Canadá. Se formó hace 1300 millones de años por la actividad de fluidos hidrotermales ricos en uranio a 150-200°C, y no hay huellas en superficie de su presencia a 450 m de profundidad. Se trata de un depósito de uraninita y pechblenda (con una riqueza media del 14% de U) rodeado de un halo arcilloso e instalado en un sistema hidrológico activo con aguas muy diluidas que pierden su carácter inicial oxidante por reacción con las arenitas encajantes y se hacen reductoras en el entorno del yacimiento (figura 1).

Los resultados de la caracterización hidrogeológica y de los modelos de flujo indican la existencia de un sistema de flujo local somero, otro intermedio y un sistema de flujo profundo semi-regional (figura 2). Las variaciones espaciales de la topografía controlan el flujo hasta una profundidad de 200 m. A partir de esta profundidad el flujo es cuasi-horizontal con un gradiente del orden del 0.3%.

Los estudios realizados en este sistema se han centrado en la caracterización de los procesos de génesis del yacimiento y en los procesos que han dado lugar a la distribución actual de los radionucleidos, teniendo en cuenta la interacción de las aguas subterráneas y todos los procesos que influyen en el transporte y retención que les han podido afectar a lo largo de su historia geológica (fundamentalmente la radiólisis, la actividad microbiana, el transporte coloidal y el aislamiento del halo arcilloso).

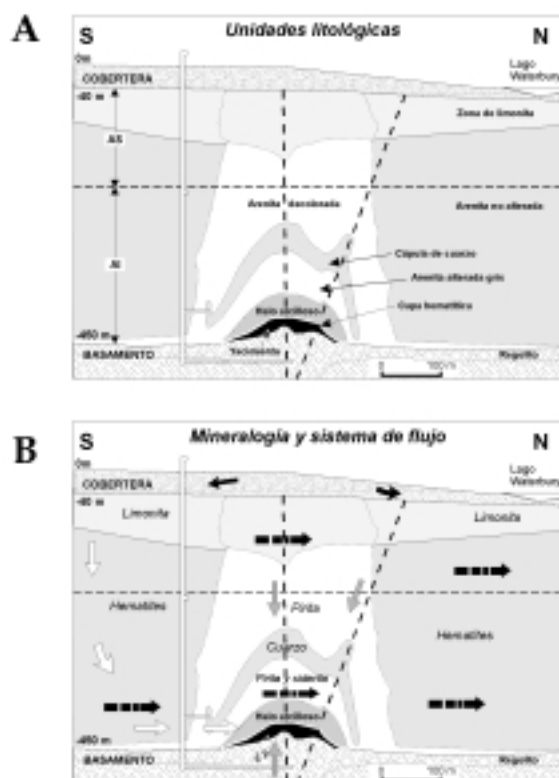


Figura 1. Corte geológico: A) Litologías y halos de alteración hidrotermal asociados el origen del yacimiento y B) modelo de evolución hidrogeoquímica (Modificada de Cramer y Smellie, 1994)



Figura 2. Esquema de flujo a las escalas local, intermedia y semirregional con indicación de las velocidades del agua (Modificada de Winberg y Stevenson, 1994)

Analogías

Cigar Lake representa una analogía a gran escala de los conceptos internacionales de AGP de RAA en formaciones cristalinas (figura 3). Se encuentra a 450 m de profundidad (similar a las consideradas en un AGP), rodeado por un halo arcilloso (barrera bentonítica), encajado en materiales areníticos con circulación activa de aguas subterráneas (geosfera) y sin huella en superficie de su existencia desde hace 1300 Ma (estabilidad a largo plazo del concepto de AGP).

Aportaciones a la evaluación de la seguridad

Sus principales aportaciones son:

- Apoyo al modelo conceptual de estabilidad del combustible gastado en condiciones reductoras: la disolución oxidante de la uraninita se produce en condiciones de Eh superior a 200 mV (los valores deducidos en laboratorio y usados en los ejercicios de evaluación, se sitúan en 120 mV, valor más conservador).
- Apoyo al modelo conceptual de aislamiento hidráulico y filtro de coloides de la bentonita, representada por el halo arcilloso.
- Desarrollo de modelos radiolíticos más elaborados.
- Apoyo al modelo conceptual de sorción irreversible de nucleidos en coloides.
- Datos cuantitativos de solubilidad de elementos traza.
- Datos cuantitativos sobre la velocidad de disolución de la uraninita: 10^{-8} - 10^{-9} año⁻¹.

La información de este análogo se ha empleado con los fines antes citados en

numerosas evaluaciones de la seguridad: AECL-94 (Canadá); Kristallin-1 (Suiza); Project-90, SKB-91, SITE-94 y SR 97 (Suecia); TSPA-VA (EE.UU); TVO-92 y TILA-99 (Finlandia).

Aportación a la comunicación

Cigar Lake es un ejemplo claro e ilustrativo de un sistema de almacenamiento generado por la propia naturaleza y de la capacidad de aislamiento del mismo y, por tanto, es uno de los análogos más utilizados en la comunicación a diversas audiencias.

Ha sido objeto del video “Nature’s own repository” editado por SKB y se cita en el video “Traces of the future”, en folletos, páginas web y en la exposición de SKB a bordo del barco Sygn (ver Tabla 6).

Referencias

Cramer, J.J. and Smellie, J.A.T. (Ed.) (1994). Final Report of the AECL/SKB Cigar Lake Analog Study. (Tech. Rep SKB TR 94-04), AECL, Pinawa, Manitoba, Canada.

Smellie, J.A.T. and Karlsson, F. (1996). A reappraisal of some Cigar Lake issues of importance to performance assessment. (Technical Report SKB 96-08), SKB, Stockholm, Sweden, 93 p.

Goodwin, B.W., McConnell, D.B., Andres, T.H., Hajas, W.C., LeNeveu, D.M., Melnyk, T.W., Sherman, G.R., Stephens, M.E., Szekely, J.G., Bera, P.C., Cosgrove, C.M., Dougan, K.D., Keeling, S.B., Kitson, C.I., Kummén, B.C., Oliver, S.E., Witzke, K., Wojciechow et al. (1994). The disposal of Canada’s nuclear fuel waste: postclosure assessment of a reference system. (Technical Report AECL-10717), AECL, Pinawa, Manitoba, Canada, 684 p.

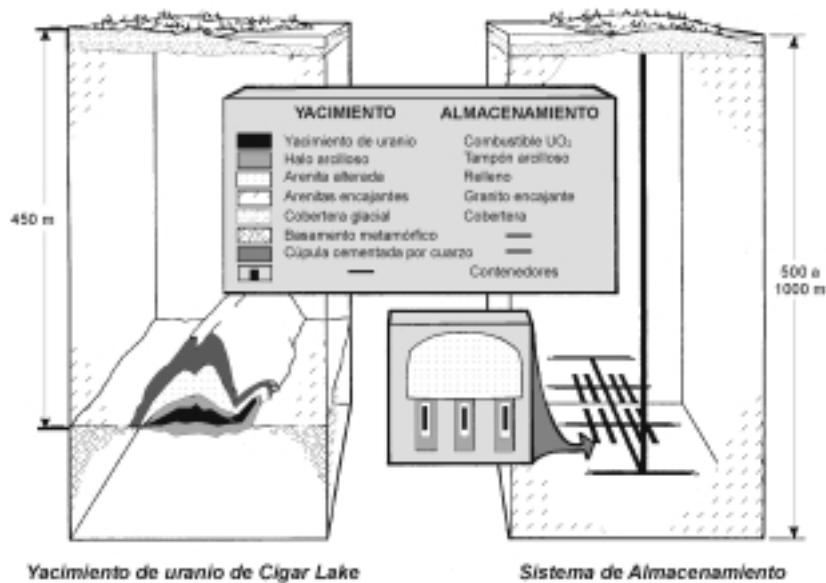


Figura 3. Yacimiento de uranio de Cigar Lake y principales analogías con las barreras previstas en un AGP de RAA. Modificada de Goodwin et al., 1989)



OKLO (Gabón)

Iniciado en 1989, el proyecto denominado “Oklo como análogo natural”, financiado por la CEC, CEA, SKB, ANDRA y Enresa, finalizó en 1999.

Sus principales objetivos fueron el estudio de los procesos de alteración de la uraninita, y de transporte y retardo de los radionucleidos a muy largo plazo.

Descripción del análogo

Los yacimientos de uranio de Oklo (sudeste de Gabón) tienen como característica distintiva el ser reactores naturales de fisión (foto 1) en los que tuvieron lugar de forma espontánea reacciones nucleares en cadena hace 2000 Ma. Por ello, Oklo es el único lugar en la Tierra en el que se ha encontrado isótopos de uranio en una relación $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ de 0.0038 que se desvía notablemente del valor medio, 0.0072.



Fotografía 1. Afloramiento de un reactor nuclear en Gabón. (Gentileza de L.P. del Villar)

Estos reactores naturales de Oklo se encuentran en la cuenca sedimentaria de Franceville. Se han descubierto 15 reactores, todos ellos situados en el yacimiento de Oklo/Okélobondo hasta una profundidad de 400 m (figura 1), salvo uno descubierto en Bangombé, a 11 metros de profundidad (figura 2). En todos los casos los reactores están en la zona de contacto entre las arenitas de la formación FA (a través de las que circularon fluidos oxidantes enriquecidos en uranio) y las lutitas ricas en materia orgánica de la formación FB, donde se acumuló el uranio en forma de uraninita, por las condiciones reductoras de la zona.

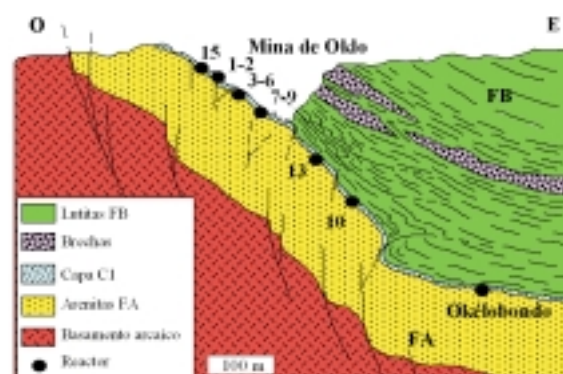


Figura 1. Corte idealizado del yacimiento de uranio de Oklo/Okélobondo. Se han proyectado algunos de los reactores a las profundidades a las que se encuentran. (Modificada de Gauthier - Lafaye, 1996)



Figura 2. Corte idealizado del yacimiento de Bangombé mostrando los distintos sondeos realizados para su estudio (BAX01 a BAX07). (Modificada de Duro et al., 2000).

Los reactores son cuerpos zonados, caracterizados por dos facies principales: (a) el núcleo del reactor, con un contenido de U de hasta el 87%, donde tuvo lugar la reacción de fisión (está compuesto por granos de uraninita embebidos en una matriz arcillosa); y (b) las arcillas del reactor, que rodean el núcleo y están formadas por arcillas hidrotermales, fundamentalmente clorita e illita (fotografía 2). Los diferentes ambientes en que se sitúan los reactores han permitido estudiar y modelizar su estabilidad y la distribución de los radionucleidos en condiciones distintas y desde distintos puntos de vista.

Analogías y aportaciones a la evaluación de la seguridad

Los procesos de alteración ocurridos en estos yacimientos convierten a Oklo en un análogo único del comportamiento a largo plazo de los productos de fisión y de activación en un AGP de RAA. Sus principales aportaciones a la evaluación de la seguridad son:

- Apoyo al modelo conceptual de estabilidad del combustible gastado en condiciones reductoras: más del 90% de la uraninita de los reactores ha permanecido estable durante 2000 millones de años.

- Apoyo al modelo conceptual de capacidad de aislamiento y retención de la barrera arcillosa.
- Comprobación de la capacidad de retención de radionucleidos en oxihidróxidos de hierro, fosfatos y grafito y de la escasa influencia de la radiólisis (por tamponamiento de la materia orgánica).
- Incremento del conocimiento de un escenario de criticidad.
- Constatación del control de las condiciones redox en los reactores por la radiólisis del agua y la presencia de materia orgánica.

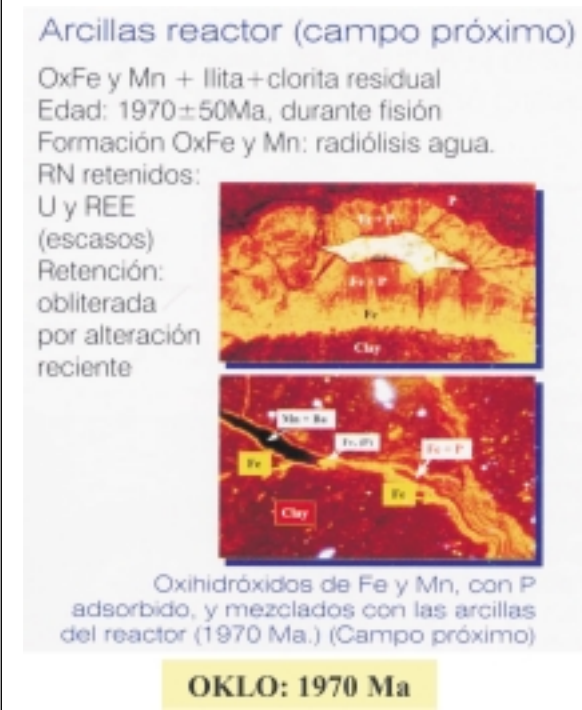
Se ha utilizado en ejercicios como AECL-94 (Canadá), SR 97 (Suecia) y TSPA-VA (EE.UU - Ver tabla 5, capítulo 6).

Aportación a la comunicación

Supone una de las mejores evidencias de que los productos de las reacciones nucleares pueden ser retenidos en sistemas naturales, y es uno de los análogos con mayor potencial para la información al público: es objeto del video “Nature’s own nuclear waste” de SKB y se explica en el video “Traces of the future”, en folletos, páginas web y en la exposición de SKB a bordo del barco Sygn (Ver tabla 6, capítulo 7).

Referencias

Gauthier-Lafaye, F., Ledoux, E., Smellie, J., Louvat, D., Michaud, V., Pérez del Villar, Oversby, V. and Bruno, J. (Ed.) (2000). *Final Report: OKLO - Natural Analogue Phase II. Behaviour of nuclear reaction products in a natural environment (The Oklo site, Gabon, Western Africa).* (Final Report EUR-X), EC-NST, Luxembourg.



Fotografía 2. Zonación en las arcillas del reactor (gentileza de L.P. del Villar).



EL BERROCAL (España)

El proyecto de El Berrocal comenzó en 1988 bajo supervisión de Enresa y Ciemat y con la participación de CIMNE, CEA/IPSN, AEA Technology, BGS, INTERA y JRC-CEC. El proyecto terminó en 1995.

Los principales objetivos del proyecto fueron comprender los procesos de transporte de los radionucleidos naturales en un ambiente granítico fracturado.

Descripción del análogo

El Berrocal se localiza a 92 km al sur de Madrid, en la parte sureste de la Sierra de Gredos (Sistema Central). Se trata de un plutón granítico con una morfología subredondeada y una superficie aflorante de unos 22 km², que está enriquecido en uranio y torio. Se calcula que el emplazamiento del plutón se produjo hace unos 297 millones de años.

El entorno geológico de El Berrocal se caracteriza por la presencia de una intensa fracturación, lo que favoreció (hace al menos un millón de años la actividad hidrotermal en las proximidades de las fracturas. Como consecuencia de esta actividad se produjo la removilización del uranio (U), el torio (Th) y otros elementos, inicialmente contenidos en el plutón en

forma de uraninita dispersa, y la posterior reprecipitación de los mismos en la mineralización principal (*dique mineralizado de cuarzo y uranio*, figura 1) y en forma de venas mineralizadas secundarias.

Los procesos posteriores de meteorización removilizaron el U, Th y el resto de elementos hasta su retención (por sorción o precipitación) en los minerales de relleno de las fracturas (silicatos, fosfatos, silicofosfatos de U y asociado a oxihidróxidos de hierro, carbonatos y minerales de la arcilla).

El sistema hidrogeológico está fuertemente condicionado por las discontinuidades presentes (fracturas y diques de cuarzo con uranio) que constituyen vías preferentes de flujo de agua subterránea.

Los estudios realizados abarcan la caracterización y modelización del sistema de interacción agua-roca teniendo en cuenta las diferentes litologías, los distintos ambientes fisicoquímicos y de flujo de las aguas y las variadas formas sólidas en las que se encuentra el uranio.

Analogías

Las principales analogías encontradas en este sistema son la presencia de uraninita y pechblenda (como análogos del combustible nuclear gastado) sometidas a distintos procesos de alteración y los efectos de dichos procesos sobre la movilización y retención de radionucleidos en la geosfera tanto en los rellenos de fractura como por la difusión en la matriz.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad

Las principales aportaciones del Berrocal a la evaluación de la seguridad son:

- Apoyo al modelo conceptual de estabilidad del combustible gastado.
- Apoyo al modelo conceptual de difusión en la matriz y de retención en la geosfera, fundamentalmente mediante los procesos de precipitación, coprecipitación y sorción en los minerales de relleno de fracturas.
- Elaboración de modelos de transporte de radionucleidos favorecido por los complejos fluorurados y carbonatados, así como por la actividad microbiana.
- Comprobación de la modelización hidrogeológica en tres dimensiones asumiendo el enfoque mixto de fracturas embebidas en un medio poroso equivalente.

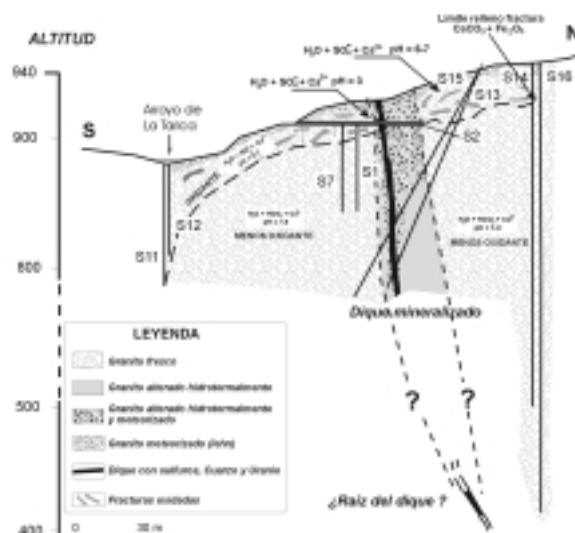


Figura 1. Esquema litológico y geoquímico del entorno de El Berrocal. También se muestran los sondeos realizados para su estudio (S1 a S16). (Modificada de Pérez del Villar et al., 1993)

• Datos cuantitativos sobre profundidad de penetración por difusión en la matriz: 35-80 mm. • Datos cuantitativos sobre límites de solubilidad de elementos de interés en la evaluación de la seguridad. Los datos proporcionados por este análogo han sido utilizados en ejercicios de evaluación de la seguridad como SITE-94 y SR 97 (Suecia)(Ver tabla 5, capítulo 6). Aportación a la comunicación En El Berrocal la movilidad del uranio ha estado restringida a las proximidades de las fracturas y no se observa ura-	nio fuera del plutón granítico. Este hecho podría usarse para incrementar la confianza del público en el concepto de almacenamiento. Este análogo ha sido objeto de un vídeo editado por Enresa (Ver tabla 6, capítulo 7). Referencias Enresa (1996). El Berrocal Project. Characterization and validation of natural radionuclide migration processes under real conditions on the fissured granitic environment. Volumes I-IV. (Topical Reports PTNP 01-04/96), Enresa, Madrid, Spain.
--	--



PALMOTTU (Finlandia)

El proyecto del análogo de Palmottu comenzó en 1988 como fruto de la cooperación de la CEC, GTK, STUK, SKB, Enresa y BRGM y se completó en 1999.

EL principal objetivo de este proyecto consistió en el estudio del transporte de radionucleidos en macizos cristalinos fracturados.

Descripción del análogo

La mineralización de uranio y torio de Palmottu se localiza en el suroeste de Finlandia y aparece asociada a rocas cristalinas: gneisses y granitos. Esta mineralización se formó debido a una actividad hidrotermal de hace 1700-1800 millones de años. Se calcula que contiene un millón de toneladas de mena con un promedio de riqueza del 0.1% de uranio y forma una estructura vertical, paralela a los diques graníticos, que se extiende hasta profundidades de unos 400 m (figura 1).

Durante la reciente historia geológica el área ha estado sometida a glaciaciones, la última de las cuales terminó hace unos 10000 años. Estas etapas alternaron con periodos interglacia-

res favoreciendo la entrada de aguas oxidantes procedentes de la fusión de los hielos hacia zonas profundas siguiendo los sistemas de fractura.

La interacción de la roca con las aguas subterráneas ha dado lugar a una serie de subsistemas hidroquímicos característicos (figura 2) que han condicionado la movilización de uranio y torio. Estos elementos, inicialmente contenidos en la mineralización, han migrado hacia las zonas de fractura, en cuyas proximidades reprecipitan como minerales secundarios. El análisis de este comportamiento y de sus efectos han sido el principal objetivo de estudio en este sistema. Se pueden diferenciar tres sistemas de flujo (figura 2):

- 1) Superficial, situado por encima de la fractura subhorizontal. Es la zona más permeable, caracterizada por aguas jóvenes y bicarbonatadas cálcicas.
- 2) Profundo, situado por debajo del anterior. Aguas bicarbonatadas-sódicas y tiempos de residencia que oscilan entre siglos y unos pocos miles de años.
- 3) Profundo cuasi-estancado. Aguas con velocidades de flujo muy bajas y su composición química sulfatada-sódica o

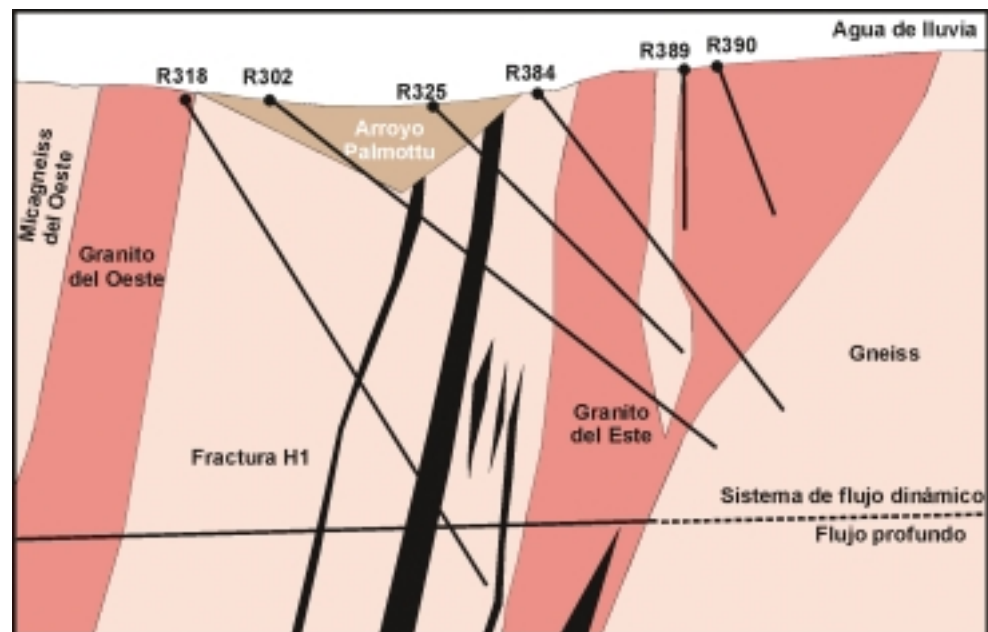


Figura 1. Corte esquemático de las distintas litologías presentes en el sistema Palmottu. (Modificada de Blomquist et al., 2000)

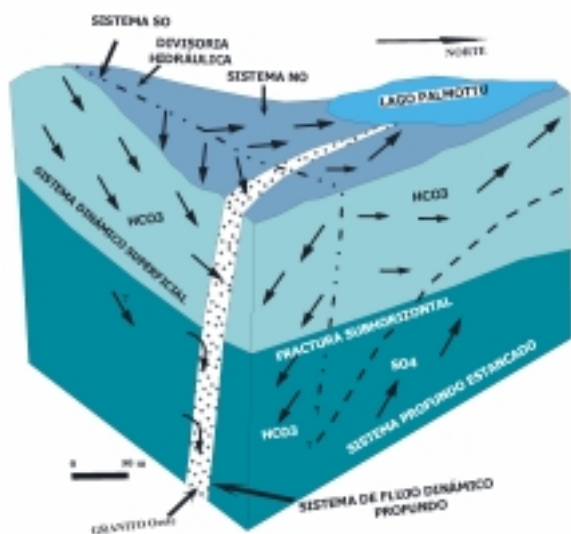


Figura 2. Esquema del entorno del granito del E y sistemas de flujo dominante. (Modificada de Blomqvist y Ruskeeniemi, 1997)

clorurada-sódica. Los valores de ^{18}O sugieren que estas aguas se pudieron recargar en épocas glaciares hace 10^5 años.

Analogías

Las principales analogías encontradas en este sistema son la presencia de uraninita (como análogo del combustible) sometida a distintos procesos de alteración y los efectos de dichos procesos sobre la movilización y retención de radionucleidos en una roca cristalina similar a las consideradas como probables en algunos conceptos de sistemas de almacenamiento.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad

Las principales aportaciones de este estudio a la evaluación de la seguridad son:

- Apoyo al modelo conceptual de estabilidad del combustible gracias al modelo planteado para la disolución de la uraninita y a la constatación del control del Eh por el propio sistema del uranio.
- Confirmación de la capacidad de la roca para mantener condiciones reductoras pese a la entrada de flujos oxidantes.
- Apoyo al modelo conceptual de retención de radionucleidos en la geosfera, fundamentalmente mediante los procesos de precipitación, coprecipitación y sorción en los minerales de relleno de fracturas.
- Datos cuantitativos sobre la profundidad de penetración por difusión en la matriz: 25 mm.
- Datos cualitativos y metodologías de estudio de escenarios climáticos (aspectos paleohidrogeológicos relacionados con glaciaciones).

La información de este análogo ha sido utilizada en los ejercicios de evaluación de la seguridad SR 97 (Suecia) y TVO-92 y TILA-99 (Finlandia).

Aportación a la comunicación

Este análogo evidencia la estabilidad del combustible gastado, por lo que podría emplearse para incrementar la confianza del público en el concepto de AGP.

Referencias

- Blomqvist, R et al. (Ed.) (2000). The Palmottu natural analogue project. Phase II: transport of radionuclides in a natural flow system at Palmottu. (Final Report EUR-X), EC-NST, Luxembourg, Luxembourg, 171 pp.
- Vieno, T., Hautajärvi, A., Raiko, H., Ahonen, L. and Salo, J.P. (1992). TVO-92 safety analysis of spent fuel disposal. (Report YJT 94-21), YJT, Helsinki, Finland.

2.2. Materiales arcillosos

Respecto a la caracterización de la estabilidad a largo plazo de la bentonita, se considera que los análogos de estos materiales arcillosos pueden suministrar información de relevancia sobre cinco aspectos de interés en la evaluación de la seguridad (Miller *et al.* 2000):

- La longevidad y alteración de las bentonitas,
- las funciones como barrera hidráulica y filtro de coloides,
- los cambios fisicoquímicos en las bentonitas relacionados con el calentamiento inducido por el contenedor (transformación esmectita-illita),
- el colapso del contenedor, y
- las interacciones con otros materiales de las barreras de ingeniería.

Sin embargo, los datos proporcionados por los análogos naturales en algunos de los temas antes mencionados no son del todo fiables, escasos o simplemente no existen todavía, tal como ocurre, por ejemplo, en los casos del colapso del contenedor o en el de la interacción con otros materiales de las barreras de ingeniería.

En relación con los cambios fisicoquímicos debidos al calentamiento, los estudios en análogos se han centrado en el análisis de los procesos de cementación y, en general, en el de los cambios mineralógicos inducidos por los efectos térmicos de intrusiones magmáticas y sus repercusiones sobre las propiedades (degradación) de la barrera. Sin embargo, los resultados obtenidos en la mayoría de estos análogos (como, por ejemplo, en el análogo de Orciático en Italia; Benvegnú *et al.*, 1988) no parecen muy representativos ya que el análisis se ha centrado en los materiales más próximos a la intrusión, sometidos a temperaturas muy superiores a las esperadas en el sistema de almacenamiento.

De todos los temas de interés señalados, el de la longevidad y velocidad de degradación de la bentonita (transformación de esmectita a illita) es el que ha sido más profusamente analizado tanto en análogos como a partir de datos procedentes de estudios científicos sobre sistemas naturales de estas litologías.

El creciente énfasis en el estudio de los procesos acoplados termohidromecánicos o termohidroquímicos y sus efectos a largo plazo en la barrera bentonítica ha aumentado el interés del estudio de este tipo de análogos en los que puede abordarse la comprobación de los códigos capaces de modelizar este tipo de procesos (Gera *et al.*, 1996; Pellegrini *et al.*, 1999).

De los análogos de materiales arcillosos estudiados (ver tabla 7), destaca el de Kinnekulle, uno de los estudiados de forma más completa y prolongada, cubriendo actualmente la investigación de los complejos procesos acoplados termohidromecánicos que condicionan la estabilidad a largo plazo de la barrera de bentonita. Además de dicho análogo, se incluye el del bosque de Dunnaroba, cuyos troncos de árboles de madera se han conservado millones de años debido a la capacidad de aislamiento de las arcillas donde quedaron sepultados.



KINNEKULLE

(Suecia)

Desde la década de los 80 existe un importante número de trabajos sobre las bentonitas de Kinnekulle, tanto desde un punto de vista científico, como de su utilización como análogo de la longevidad de los materiales arcillosos en la barrera de ingeniería (estos últimos realizados, fundamentalmente dentro de las actividades de SKB). Esta circunstancia ha favorecido la utilización y reevaluación de los resultados obtenidos en Kinnekulle, que continúa en la actualidad. El objetivo del estudio de este análogo por SKB ha sido analizar los procesos que dan lugar a la cementación de esmectita afectada por calor.

Descripción del análogo

Hace 450 millones de años (Ordovícico, figura 1) se produjo el depósito de cenizas volcánicas sobre una serie de sedimentos arcillosos y calcáreos en Kinnekulle. Los niveles de cenizas fueron cubiertos por materiales similares a los anteriores, quedando intercalados en una serie de sedimentos marinos de una potencia de varios cientos de metros. Estas cenizas se transformaron en capas bentoníticas-esmectíticas y se consolidaron sometidas a una presión de enterramiento de 5-10 MPa y alcanzando una densidad de 2.0-2.2 g/cm³, una porosidad del 30-40% y un contenido de agua del 15-25%.

Pérmico	Diabasa	20 m	
Silúrico	Arenitas y lutitas	60 m	
Ordovícico	Calizas silíceas	1 m	Bentonita (2 m)
	Calizas	80 m	
Cámbrico	Lutitas negras	15 m	Glauconita (1 m)
	Arenitas	15 m	
Precamb.	Gneises		

Figura 1. Columna geológica de Kinnekulle. A techo de las calizas del Ordovícico aparece la capa bentonítica principal. (Modificada de Pusch y Madsen, 1995).

Hace 300 millones de años (Pérmico), la serie se vio penetrada lateralmente por una intrusión magmática que generó un dique diabásico de varias decenas de metros de espesor que se emplazó a unos 95 m por encima del nivel bentonítico principal (de unos 2 m de espesor). El pulso térmico asociado a esta intrusión afectó a los sedimentos circundantes y colaboró en su transformación a rocas sedimentarias consolidadas.

Las estimaciones realizadas con métodos indirectos sobre la temperatura a la que estuvo sometida la capa bentonítica indican que ésta no superó los 160 °C. Otro de los aspectos de interés estudiados fue el grado de alteración sufrido por las bentonitas debido al calentamiento, tanto la transformación de esmectita a illita (mayor en los bordes que en el centro), como la cementación por sílice. Estos estudios se completaron con ejercicios de modelización del proceso de degradación junto con un análisis de sensibilidad a los parámetros de influencia sobre dicha degradación.

Analogías

Las bentonitas de Kinnekulle son una buena analogía de la barrera arcillosa y de su comportamiento en cuanto a los siguientes aspectos de interés en la evaluación de la seguridad de esta barrera: la longevidad y los cambios fisicoquímicos debidos al calentamiento.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad

Las principales aportaciones del análogo a la evaluación de la seguridad son:

- Apoyo al modelo conceptual de comportamiento de la barrera arcillosa: a pesar del efecto térmico sobre estas bentonitas, la degradación sufrida no ha provocado alteración de sus propiedades como barrera a la liberación de radionucleidos.
- Identificación mediante análisis de sensibilidad de los parámetros que intervienen en el proceso de transformación: temperatura, concentración de potasio y energía de activación.
- Desarrollo de códigos para la modelización del proceso de transformación esmectita-illita, y comprobación de la aplicabilidad de códigos acoplados.

La información de este análogo se ha utilizado explícitamente en los ejercicios AECL-94 (Canadá) y SR 97 (Suecia).

Aportación a la comunicación

El análogo de Kinnekulle muestra la longevidad y el mantenimiento de las propiedades deseadas de la barrera arcillosa, por lo que podría utilizarse para incrementar la confianza del público en la seguridad del sistema de AGP (Ver tabla 6, capítulo 5).

Referencias

Pusch, R., Takahase, H. and Benbow, S. (1998). *Chemical processes causing cementation in heat-affected smectite. The Kinnekulle bentonite*. (Technical Report SKB TR 98-25), SKB, Stockholm, Sweden.
SKB (1999b). SR 97. *Processes in the repository evolution. Background report to SR 97*. (Technical Report SKB TR 99-07), SKB, Stockholm, Sweden.



DUNAROBBA (Italia)

En 1992, dentro del Proyecto MIRAGE (CCE), comenzó el estudio general de este análogo. Sus resultados fueron publicados en 1997.

Los objetivos del proyecto se centraron en el análisis de la capacidad de aislamiento de los materiales arcillosos.

Descripción del análogo

El Bosque Fósil de Dunarobba, situado en las proximidades de Todi (Italia Central) está constituido por 50 troncos de árboles fósiles (de hace 2 millones de años) todavía en su posición de vida original. La característica más sobresaliente de estos árboles fósiles, y que los diferencia notablemente del resto de los existentes en el registro geológico, es que se encuentran todavía constituidos por madera.

El Bosque de Dunarobba se desarrolló hace 2 millones de años en un sistema palustre del margen de un lago no muy profundo que se fue rellenando con materiales fundamentalmente lutíticos: arcillas y limos laminados con frecuentes intercalaciones de niveles arenosos y de gravas y abundante

materia orgánica (fotografías 1 y 2). Debido a la elevada velocidad de sedimentación (3m/1000 años), el bosque quedó enterrado y aislado rápidamente del medio oxidante externo. Por encima del nivel en el que se halla el bosque, la serie se hace más homogénea y pasa a estar constituida casi por completo por arcillas limosas laminadas típicas de un ambiente lacustre profundo, mucho menos permeables que las arcillas infrayacentes. De hecho, el excepcional grado de preservación de los troncos se debe al aislamiento generado por esos materiales que actuaron de barrera geológica frente a los procesos de degradación orgánica.

El área de Dunarobba se encuentra afectada por procesos neotectónicos activos y los mapas de distribución de gases en suelos indican, además, que se sitúa en una de las vías preferenciales de migración de fluidos en la cuenca. Estos procesos no favorecerían, en principio, la preservación del bosque fósil.

A escala de cuenca, el relleno lutítico no se comporta como una barrera efectiva frente a la migración de fluidos debido al cortocircuito provocado por los sistemas de fracturación. Sin



Fotografía 1. Foto panorámica del bosque de Dunarobba. (Miller et al., 1994)



Fotografía 2. Detalle de uno de los troncos de árbol. (Miller et al., 1994)

embargo, a menor escala, estos sistemas de fracturación delimitan bloques que mantienen un comportamiento coherente como barrera por su baja conductividad hidráulica (figura 1). En uno de estos bloques se sitúa el bosque y esta circunstancia explica su preservación en una zona en la que existe un importante sistema de discontinuidades en los materiales.

Analogías y aportaciones a la evaluación de seguridad

El Bosque Fósil de Dunarobba se considera análogo de la capacidad de aislamiento a largo plazo de los materiales arcillosos, puesto que estos materiales han aislado y preservado la materia orgánica a una escala temporal de millones de años. Su principal aportación a la evaluación de la seguridad es el apoyo al modelo conceptual de comportamiento de la bentonita como barrera hidráulica y de limitación de la degradación microbiana: conservación de la madera en una zona poco propicia. Se hace referencia a este análogo en el ejercicio SR 97 (Suecia) (Ver tabla 5, capítulo 6).

Aportación a la comunicación

El extraordinario grado de conservación del bosque tiene su mayor potencial en la comunicación a audiencias no técnicas para ilustrar la capacidad de aislamiento de la bentonita. La difusión de su existencia se ha realizado en ámbitos muy distintos, tanto actuales (periodísticos) como históricos (hay referencias al mismo desde el siglo XVII).

Es uno de los análogos más utilizado en la comunicación al público: se cita en el video “Traces of the Future”, en folletos y páginas web como las de Nagra y SKB, así como en la exhibición itinerante de SKB a bordo del barco Sygn (Ver tabla 6, capítulo 7).

Referencias

Valentini, G., Lombardi, S., Bozzano, F. and Scarascia Mugnozza, G. (Ed.) (1997). *Analysis of the geoenvironmental conditions as morphological evolution factors of the sand-clay series of the Tiber valley and Dunarobba forest preservation*. (Report EUR 17479), EC-NST, Luxembourg.

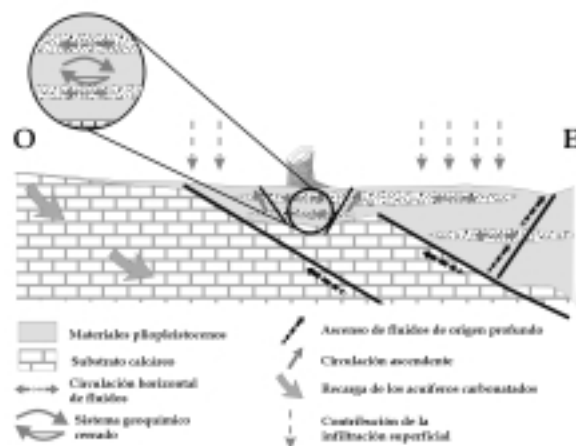


Figura 1. Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico en la cuenca de Dunarobba. (Modificada de Valentini et al., 1997).

2.3. Ambientes hiperalcalinos

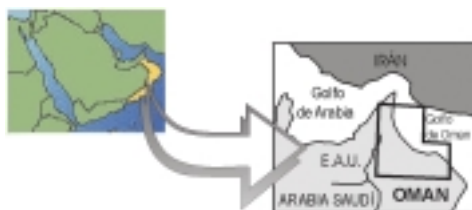
Los ambientes hiperalcalinos son apariciones naturales de minerales secundarios análogos a los que se forman durante la hidratación del cemento Portland y que dan lugar a aguas intersticiales caracterizadas por un pH muy elevado. El estudio de este tipo de sistemas naturales puede ser de utilidad en los siguientes aspectos de interés para la seguridad de un almacenamiento:

- La longevidad del cemento y sus propiedades de enlace,
- la permeabilidad del cemento al agua y al gas,
- la especiación y solubilidad de los radionucleidos en condiciones de pH elevado,
- la interacción de fluidos de elevado pH con las rocas circundantes, como analogía de las aguas intersticiales que migran del sistema de almacenamiento hacia la roca encajante,
- la naturaleza y viabilidad de procesos geoquímicos inducidos microbiológicamente y su influencia en el proceso de degradación del residuo,
- la naturaleza y estabilidad de las especies coloidales formadas en aguas de elevado pH, y en la interfase entre estas aguas y las neutras.

Uno de los mejores ejemplos naturales de ambientes hiperalcalinos es el que se puede observar en Maqarin. En Maqarin, las reacciones de baja temperatura con las fases minerales del entorno natural (hidratación, carbonatación y sulfatación) han creado un conjunto de minerales de alteración, muchos de los cuales son comunes a los existentes en la pasta del cemento (portlandita, ettringita y silicato tricálcico hidratado o CSH).

Otro ejemplo son las surgencias hiperalcalinas de Omán, cuyas características hidroquímicas y algunos de sus precipitados minerales asociados (portlandita) son muy similares a las condiciones que se supone existirán en un almacenamiento con cemento.

A diferencia de Omán, el área de Maqarin presenta rocas enriquecidas en una serie de elementos análogos a los relevantes en un inventario de radionucleidos de un sistema de almacenamiento (isótopos de U, Sr, Ba, Se, Mo, REE, Co, Ni, Cu, Zn y Pb). Además, en esta zona el proceso de alteración sigue activo actualmente y las fuentes hiperalcalinas y otras descargas de aguas subterráneas asociadas con esta alteración ofrecen una oportunidad única para estudiar: (a) la movilidad de los elementos traza análogos en sistemas de aguas alcalinas; (b) evaluar los efectos a largo plazo de la hidratación del cemento y la estabilidad de las fases del cemento; (c) investigar la interacción de una pluma hiperalcalina con la roca encajante y (d) analizar la geomicrobiología del sistema de aguas hiperalcalinas.



El proyecto del análogo de Omán fue compartido por UK Nirex Ltd. y NAGRA y finalizó en 1987.

El interés de éste análogo se centró en el estudio de las aguas hiperalcalinas y la concentración y especiación de elementos traza en solución.

Descripción del análogo

El estudio se ha centrado en cinco de las surgencias hiperalcalinas próximas a Muscat, al noreste de Omán. Las surgencias estudiadas (identificadas por su nombre en la figura 1) aparecen en una cadena montañosa de estructura paralela a la costa de Omán y formada por materiales ígneos del manto superior (principalmente harzburgitas) y de la corteza oceánica (ofiolitas).

Durante la elevación (obducción) de estos materiales se produjo la penetración en los mismos de aguas superficiales que, al ir profundizando e interaccionando con los minerales ultramáficos de la roca, se transformaron en aguas subterráneas hiperalcalinas (valores de pH en torno a 11) y frecuentemente muy reductoras, que pueden volver a la superficie en

forma de surgencias (las cinco estudiadas aparecen situadas en la figura 1).

En dos de las surgencias se realizaron estudios de las poblaciones microbianas presentes en las aguas. Los resultados obtenidos muestran una gran variedad (aunque en escasas concentraciones) de microorganismos adaptados a estas extremas condiciones.

Los cálculos de modelización geoquímica llevados a cabo en las aguas de Omán se enfocaron casi exclusivamente a estudiar la validez y aplicabilidad de códigos geoquímicos y bases de datos termodinámicos usados en la evaluación de la seguridad, válidos en otro tipo de condiciones pero no comprobados en sistemas de características tan extremas como éstas (hiperalcalinas y reductoras).

Analogías

Muchos de los conceptos de almacenamiento considerados en la actualidad incluyen grandes volúmenes de cemento que determinan la presencia en el campo próximo de aguas muy alcalinas (pH 13 o superior). Las aguas de Omán se asemejan en gran medida a esas aguas ya que son fuertemente alcalinas y reductoras. Por ello, Omán constituye un análogo para el estudio de dichas aguas hiperalcalinas y de su efecto sobre los procesos de transporte de radionucleidos en el sistema de AGP.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad

Las principales aportaciones del análogo a la evaluación de la seguridad son:

- Apoyo a los modelos de liberación y migración de los radionucleidos en un ambiente geoquímico difícil de simular en laboratorio.
- Comprobación de la adaptación de las comunidades microbianas a condiciones extremas: el factor limitante es el aporte de nutrientes, tal y como suele considerarse en las evaluaciones de la seguridad.
- Constatación de la escasa influencia de coloides a pesar de su abundancia, debido a su inestabilidad en estas condiciones.
- Comprobación de que el modelo de control redox no es aplicable en condiciones extremas.
- Apoyo al desarrollo metodológico en la definición de escenarios climáticos mediante la determinación de variacio-

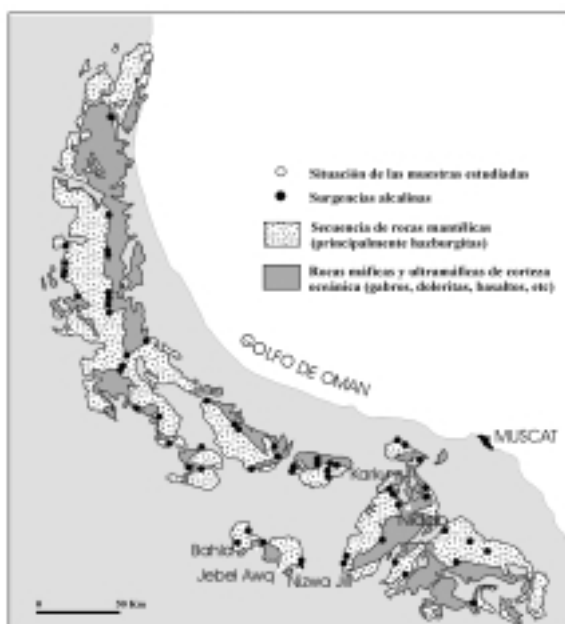


Figura 1. Esquema geológico y situación de las surgencias estudiadas en Omán. (Modificada de Bath et al., 1987).

nes climáticas a partir del estudio isotópico en los precipitados de las surgencias hiperalcalinas.

- Comprobación de la aplicabilidad de códigos geoquímicos, de transporte reactivo y bases de datos termodinámicos en condiciones extremas.

Información de este análogo se ha utilizado en las evaluaciones de la seguridad Kristallin-1 (Suiza), SR 97 (Suecia) y TILA-99 (Finlandia), (Ver tabla5, capítulo 6).

Aportación a la comunicación

Este análogo podría emplearse para ilustrar el comportamiento de los componentes de las barreras constituidas de cemento y hormigón.

Referencias

Bath, A.H., Christofi, N., Neal, C., Philp, J.C., Cave, M.R., McKinley, I.G. and Berner, U. (1987). *Trace element and microbiological studies of alkaline groundwaters in Oman, Arabian Gulf: a natural analogue for cement pore-waters*. (Technical Report NTB 87-16), NAGRA, Wettingen, Switzerland.



MAQARIN (Jordania)

En 1990 comenzó el proyecto del análogo Maqarin, a cargo de NAGRA, Ontario Hydro y UK Nirex Ltd. En 1991 se unió al proyecto el SKB y en 1993, el UK-HMIP.

Descripción del análogo

El emplazamiento de Maqarin (NO de Jordania) es un lugar único en el mundo. Se caracteriza por el desarrollo de una capa de cemento debida a la alteración de minerales metamórficos generados durante la combustión espontánea de unas margas muy ricas en materia orgánica en la que se alcanzaron temperaturas de hasta 1000 °C. La interacción posterior de las aguas de infiltración con el conjunto de minerales naturales de cemento originó el desarrollo de aguas subterráneas con pH elevado (hasta 13) y condiciones oxidantes y del cortejo de minerales secundarios característicos en la evolución de una aureola hiperalcalina (figura 1). Las descargas de estas aguas subterráneas se producen a lo largo de las laderas del río Yarmouk, en general a través de los coluviones y depósitos de ladera en los que se han centrado las observaciones y la toma de muestras.

Además de la caracterización de los materiales sólidos de la zona de cemento, se realizó un estudio exhaustivo de las aguas subterráneas y de su interacción con el encajante, dando lugar al desarrollo de un modelo conceptual de evolución de una aureola hiperalcalina. Adicionalmente, se estudió la distribución de elementos traza en los minerales del cemento y en los minerales secundarios generados por la interacción de la pluma hiperalcalina (Ver tabla 1).

Analogías y aportaciones a la evaluación de la seguridad

Maqarin es el mejor análogo conocido del comportamiento a largo plazo de una aureola hiperalcalina esperable en un sistema de almacenamiento con cemento. Las principales analogías se muestran en la figura 2.

Tanto en el caso de las aguas hiperalcalinas de Maqarin como en el de un hipotético sistema de almacenamiento que incluya cemento, se producen tres etapas distintas de evolución (figura 2): 1) Percolación de las aguas meteóricas (A); 2)

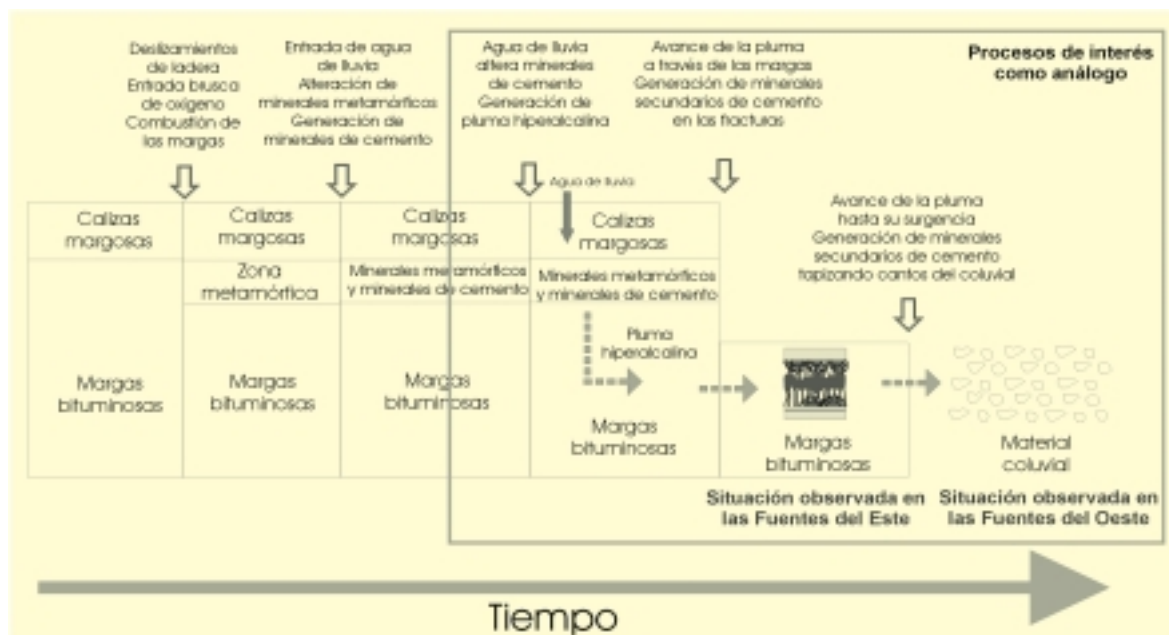


Figura 1. Esquema temporal de los procesos que han dado lugar al desarrollo de una zona de cemento, a la pluma hiperalcalina y a los minerales secundarios producidos por interacción de la pluma con el encajante margoso.

Interacción de estas aguas con el cemento (B); y 3) Flujo de las aguas hiperalcalinas cargadas en elementos capturados en los procesos de interacción con la roca fracturada y con la matriz rocosa (C).

La principal información aportada por de este análogo es el comportamiento de algunos elementos traza en condiciones geoquímicas extremas, así como la propia evolución de las características del agua. Además, se ha estudiado el efecto potencial del sellado de las fracturas sobre la difusión en la matriz.

Otras aportaciones de interés en la evaluación de la seguridad son:

- Apoyo a los modelos conceptuales y desarrollo de nuevos modelos para la evolución de aureolas hiperalcalinas desde un sistema de almacenamiento con cemento y su orientación frente al flujo subterráneo.
- Aunque la porosidad de la matriz cerca de las fracturas se ve reducida por el bloqueo de los poros por los minerales secundarios, los datos geoquímicos indican que la matriz rocosa sigue siendo accesible a la interacción agua-roca, lo que podría retardar el transporte de los radionucleidos no sorbentes, transportados por advección por las aguas hiperalcalinas a través de las fracturas aún abiertas.
- Prueba de la aplicabilidad de códigos geoquímicos, de transporte reactivo y bases de datos termodinámicos en condiciones extremas.
- Comprobación de los códigos de predicción de poblaciones microbianas.

La información de este análogo se ha utilizado en los ejercicios Kristallin-1 (Suiza) SR 97 (Suecia), TILA-99 (Finlandia) y H12 (Japón).

Aportación a la comunicación

Este análogo podría utilizarse para ilustrar el comportamiento de los componentes de las barreras de cemento y hormigón. Se cita en la página web de SKB.

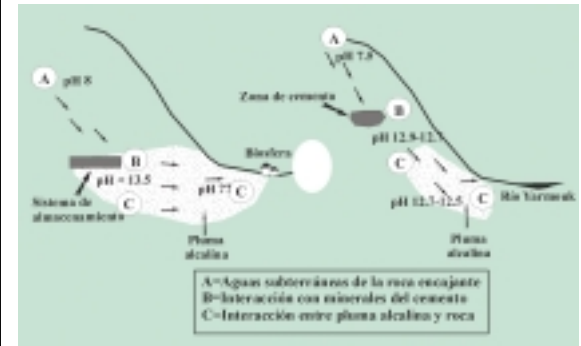


Figura 2. Esquema de las analogías entre comportamiento de la evolución de las aguas hiperalcalinas en Maqarin (derecha) y la esperable en un sistema de almacenamiento con cemento (izquierda). (Modificada de Alexander y Smellie, 1996).

Referencias
 Smellie, J.A.T. (Ed.) (1998). *Maqarin natural analogue study: Phase III*. (Technical Report SKB TR 98-04), SKB, Stockholm, Sweden, 400 pp.

Mineral	Ba	Sr	Cr	Cu	Zn	Mn	Pb	U
Jennita								⊗
Wairakita	⊗	⊗	⊗	⊗		⊗	⊗	⊗
Etringita			⊗		⊗			
Calcita		⊗				⊗		
Aragonito		⊗						
CSH	⊗	⊗			⊗	⊗	⊗	⊗
Brucita							⊗	⊗
Portlandita	⊗	⊗		⊗	⊗	⊗	⊗	⊗

Tabla 1. Minerales de relleno de fracturas que actúan como sumideros de distintos elementos traza. (CSH: Silicato tricálcico hidratado). (Modificada de Linklater, 1998).

2.4. YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS

Los temas de investigación que pueden enriquecerse del estudio de material arqueológico son los siguientes:

- La *corrosión de objetos de cemento o metálicos* (tales como hierro, cobre, bronce) como análogos de los contenedores de residuos o de las propias matrices de los residuos,
- la *degradación de vidrios y cemento o material bituminoso* como análogo del residuo,
- la evolución a largo plazo de las propiedades fisicoquímicas de cementos y otros materiales de construcción análogos a las estructuras del sistema de almacenamiento,
- los *procesos de alteración y la desintegración* de material orgánico y formación de complejos con elementos traza, análogos de los procesos que afectan la degradación del residuo, y
- la *interacción química* de los objetos enterrados con las rocas o suelos encajantes que pueden ser análogos de los procesos del campo próximo.

Debido al hecho de que los materiales arqueológicos y el ambiente en el que aparecen pueden ser bastante distintos a la situación de un sistema de almacenamiento, es muy importante extremar los cuidados cuando se trata de seleccionar un sistema de este tipo para su investigación como análogo. No todos los artefactos antiguos bien preservados pueden proporcionar información para su uso en la evaluación de seguridad.

Para ayudar a la selección de análogos arqueológicos adecuados de los que obtener información cualitativa y cuantitativa, Miller y Chapman (1995) propusieron una lista de parámetros básicos que deberían conocerse acerca del artefacto: (1) la edad que tiene, (2) la composición del material, (3) la historia de su depósito y su preservación, (4) el ambiente fisicoquímico en el que se ha preservado, (5) cualquier evento o cambio ambiental que haya afectado al artefacto cuando ya estaba enterrado y (6) la composición del suelo o el sedimento de alrededor.

Normalmente el problema mayor en el estudio de los yacimientos arqueológicos como análogos es la caracterización del ambiente de enterramiento. La mayoría de los artefactos aparecen en superficie o a muy escasa profundidad, en condiciones normalmente más agresivas químicamente de lo que cabe esperar en un sistema de almacenamiento (en términos de flujos químicos y ambiente redox). La aproximación para el estudio de los materiales arqueológicos es, en general, estimar las velocidades y mecanismos de degradación en función de las características químicas del ambiente de preservación, y extrapolar o interpolar los datos a las condiciones químicas esperables en un sistema de almacenamiento.

Los resultados de los estudios de análogos arqueológicos puede complementarse, en la mayor parte de los casos, con análogos naturales de materiales o procesos similares. Así, entre los análogos seleccionados en este proyecto puede buscarse un cierto grado de complementariedad entre los análogos arqueológicos y naturales siguientes: 1) Clavos de Inchtuthill (Escocia; Fe) y yacimientos de hierro nativo de Bühl (Alemania) y Disko (Groenlandia); 2) Cañón del Kronan (Mar Báltico, Cu) o Santorini (Grecia, Cu) y yacimientos de Cu nativo de Keweenaw (Estados Unidos) e Hyrkkölä (Finlandia); 3) Muralla de Adriano (Reino Unido, cemento), Acquarossa (Italia, hormigón) o Tanque de agua del castillo de Uppsala (Suecia, Cemento) y los ambientes hiperalcalinos de Omán y Maqarin (Jordania); y 4) Tumba de Changsha (Bentonita, China) y los árboles fósiles de Dunarobba (Italia).



CAÑÓN DEL KRONAN (Suecia)

El cañón del Kronan es el análogo arqueológico más importante dentro del programa de investigación sueco, que prevé el uso del cobre (Cu) como material para la fabricación del contenedor donde van a ir alojados los residuos radiactivos.

Descripción del hallazgo

El Kronan fue un buque de guerra sueco, construido en 1668. Durante la batalla de Öland fue alcanzado y hundido por la flota alemano-danesa en el Mar Báltico, a 5 km de la costa de Öland.

Entre 1680 y 1686, alrededor de 60 cañones fueron extraídos del fondo marino. Más recientemente, entre 1980 y 1987, se extrajeron otros 32 cañones.

Información relevante

El objeto del estudio ha sido uno de los cañones de bronce, el cual permaneció en vertical con la boca hacia abajo, enterrado en el fondo marino (figura 1) 1,6 m de su longitud y los 0,2 m restante fuera del lecho en contacto directo con el agua. Tiene un contenido en cobre muy alto (96.5%), un 3.3% de Sn y un 0.5% de Fe.

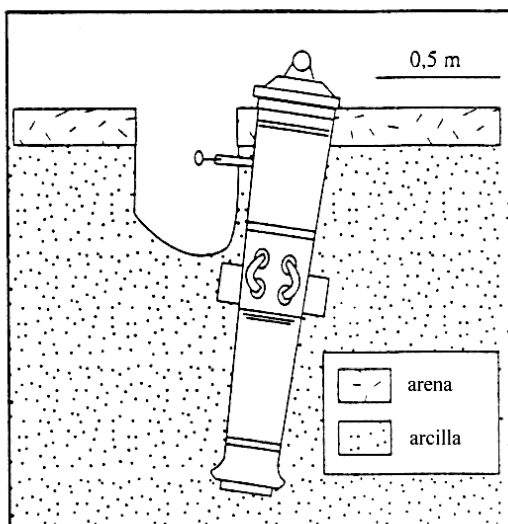


Figura 1. Situación del cañón en el fondo marino (De Putter Th. de, Charlet JM., 1994, modificada por la UCM).

Analogías

Las arcillas marinas se pueden considerar como un análogo de la bentonita. La corrosión del contenedor de cobre podría ser menor en las condiciones reductoras esperables en el repositorio.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad

El cañón del Kronan suministra información acerca del tipo de corrosión sufrida por el cobre dentro de una matriz arcillosa con propiedades oxidantes. Los productos de corrosión identificados incluían Cu_2O y Fe_3O_4 . La velocidad de corrosión media se determinó en $0.15\mu/\text{año}$.



Fotografía 1. Momento de extracción del cañón monitorizado del fondo. Foto cedida por Fred Karlsson (SKB).

En las evaluaciones de la seguridad TVO-92 (Finlandia) y SR 97 (Suecia) se ha utilizado la información proporcionada por este análogo. (Ver tabla 5, capítulo 6).

Aportación a la comunicación

El cañón de Kronan evidencia la resistencia a la corrosión y la longevidad del cobre, pudiendo utilizarse para aumentar la confianza en la conveniencia del cobre como material del contenedor.

Este análogo se cita en el video “Traces of the Future: Lessons from Nature for Waste Disposal” realizado por diferentes agencias de residuos europeas, en la página web de SKB y en la exhibición de SKB a bordo del barco Sygn (Ver tabla 6, capítulo 7).

Referencias

Hallberg, R.O., Östlund, P., Wadsten, T. A 17th century bronze cannon as analogue for radioactive waste disposal in Côme, B., Chapman, N.A (eds). Natural analogues in radioactive waste disposal, CEC Report EUR 11037 EN: 135-139. 1987.
Smellie, J.A.T. Some Swedish analogue studies: a review in Natural Analogue Working Group, 3rd meeting, Snowbird, CEC Report EUR 11725 EN: 96-103. 1988.
Gumtensperger, M.A., Lindquist, J. (1999). “Public Perception and natural analogues”. Report EUR 17543 EN p. 543. Proceedings of the Fourth Conference of the EC on the Management and Disposal of Radioactive Waste, Luxembourg.



Foto 2. Cañón recuperado para su estudio. Foto cedida por Fred Karlsson (SKB).



CLAVOS DE INCHTUTHIL (Reino Unido)

Descripción del hallazgo

La fortaleza legionaria de Inchtuthil, se sitúa en la localidad de Perthshire (Escocia), y fue abandonada en el 87 a.C. En su retirada, los romanos enterraron alrededor de 875000 clavos en un hoyo de 5 metros de profundidad y después lo taparon con 3 metros de tierra compacta.

Estos clavos permanecieron enterrados hasta el año 1950 cuando la fortaleza fue excavada y los clavos desenterrados.

Información relevante

Los clavos presentaban muchas heterogeneidades en su composición, presentando éstos, muchas variaciones en cuanto al contenido en carbono. El grado de corrosión de los clavos dependía, entre otros factores, de su localización en la acumulación.

Los clavos del interior mostraban una mínima corrosión, mientras que en los del exterior, y en particular los que estaban en la parte superior, el grado de corrosión había sido tan intenso, que se había formado una gran capa de óxido de hierro.

En algunos clavos, en áreas muy limitadas, se podía apreciar una corrosión localizada (corrosión por picadura). No hay información sobre la localización en la acumulación de los clavos con este tipo de corrosión, y no ha sido cuantificado el factor de picadura. Pudiera ocurrir que la corrosión por picadura estuviera influenciada por la composición de hierro. Los clavos con un contenido en carbono mayor eran los de mayores dimensiones.

Analogías

En Inchtuthil, la velocidad de corrosión de los clavos exteriores fue mayor, por estar sometidos a condiciones oxidantes. Estos clavos actuaron como una “barrera” a la corrosión de los que estaban en el interior.

Esta situación puede ser considerada en términos generales análoga a la que estará sometido el acero y el hierro de los contenedores en un sistema de AGP.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad y a la comunicación

Cualitativamente se puede concluir para este análogo que, donde hay grandes volúmenes de acero presentes en un repositorio, gran parte de éste puede no verse afectado por la corrosión. En este caso no ha sido posible encontrar más información (por ejemplo Eh, pH y química de las aguas subterráneas) necesaria para poder hacer una valoración cuantitativa de todas las variables implicadas.

Este análogo se ha utilizado para la comunicación al público en el video “Traces of the Future” realizado por diferentes agencias de residuos europeas.

Referencias

Angus NS, Brown GT, and Cleere HF (1962). The iron nails from the Roman legionary fortress at Inchtuthil, Perthshire. *Journal of Iron and Steel Institute*, 200, 956-968.



SARCÓFAGO DE TOURNAI (Bélgica)

Los contenedores de residuos de alta actividad serán construidos con materiales metálicos, cuyo comportamiento a largo plazo es necesario evaluar. Los materiales candidatos para la fabricación del contenedor más ampliamente estudiados son el acero al carbono y el cobre. En el Sarcófago de Tournai, aunque está construido en plomo, se estudian los cambios sufridos por este metal a lo largo de su enterramiento.

Descripción del hallazgo

Se trata de un sarcófago de plomo franco-romano (280-300 d.C.) que se localizó en 1989 en la ciudad belga de Tournai.

Información relevante

El sarcófago estaba formado por dos piezas: la cuba y la tapa (figura 1). La cuba está formada de una lámina de plomo de 6 a 9 mm de espesor, desmenuzada y plegada en forma de arcón. La unión de las paredes está realizada por soldadura mediante plomo-zinc. La tapa se fabricó de la misma manera.

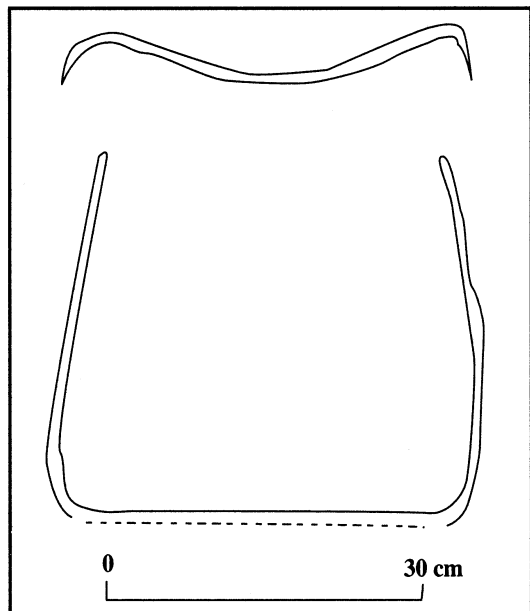


Figura 1: Corte transversal del sarcófago (De Putter Th. de, Charlet JM., 1994).

Enterrado a finales del tercer siglo de nuestra era (280-300 d.C.), el sarcófago de plomo contiene el cuerpo de un hombre, así como un vaso, una taza y unas cincuenta piezas de bronce.

Dentro del ambiente arenoso-arcilloso en el que ha sido encontrado, el sarcófago ha estado sometido a presiones hidrostáticas importantes que han provocado la entrada de sedimentos en el interior de la cuba.

Desde el punto de vista del comportamiento mecánico del contenedor, el relleno rápido del sarcófago le confirió una mayor resistencia frente a la deformación.

Químicamente, el sarcófago está constituido por plomo metálico, protegido por una capa de productos de corrosión: óxidos y carbonatos de plomo (PbO y $PbCO_3$), y fosfatos de plomo.

En resumen, los productos de corrosión forman una coraza de protección bastante homogénea, que preserva al plomo metálico de ataques posteriores.

Analogías

El sarcófago de Tournai, y el estudio llevado a cabo, permiten comprender los procesos de corrosión que afectan a una parte del metal enterrado en un entorno geológico relativamente permeable, microaireado y periódicamente saturado.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad y a la comunicación

Si bien el plomo no se emplea como recubrimiento protector para residuos de alta actividad, este estudio (el sarcófago de Tournai lo atestigua), demuestra que los productos de corrosión de un recipiente metálico pueden contribuir a mantener íntegramente el recipiente durante largos períodos de tiempo.

Referencias

Brulet, R., 1990. "El sarcófago franco-romano de Tournai"; Publications d'Histoire de l'Art et d'Archéologie de l'Université Catholique de Louvain. LXXIX. (Coll. d'archéologie J.



ACQUAROSSA (Italia)

La durabilidad y estado de conservación con el paso del tiempo del hormigón, es estudiada en la conducción etrusca de agua subterránea descubierta en Acquarossa.

Descripción del hallazgo

Se trata de una conducción de agua subterránea etrusca, data-da entre el siglo VII y VI a.C y localizada en Acquarossa, en la región de Viterbe, Italia. Su suelo y paredes estaban recubiertas de un hormigón que estaba en perfecto estado de conservación.

La conducción consistía en un túnel de 80 cm de largo y aproximadamente 1,80 m de alto (figura 1). La base de la canalización tenía un grosor de aproximadamente 15 cm, mientras que en las paredes el espesor medio era de unos 5 cm. La parte superior de la canalización estaba abovedada, con unas dimensiones de la bóveda de 35 cm de altura.

Información relevante

Las losas del suelo, estaban constituidas por ladrillos ligados por un yeso carbonatado (1/1.5 partes en la superficie y 1/4.5

partes en el interior); su superficie era rugosa, mientras que las paredes, constituidas por el mismo tipo de hormigón, pero no tan basto, haciendo que las mismas tuvieran un aspecto más liso. La parte superior de las paredes se encontraba recubierta de una capa de yeso carbonatado de color claro cuya superficie estaba muy pulida.

El yeso no estaba en absoluto alterado de manera significativa con el curso del tiempo: los silicatos de calcio que estaban presentes, provenían probablemente de una reacción entre los carbonatos y la arena o el polvo de ladrillo presente. Finalmente, el depósito presentaba una débil densidad (1.85 g/cm^3), y una baja resistencia a la compresión (9 MPa).

Analogías y aportaciones a la evaluación de la seguridad y a la comunicación

La principal analogía de Acquarossa está en el efecto del buen grado de conservación de un hormigón con carbonatos en el interior de rocas silicatadas.

La analogía con la matriz de hormigón para residuos de media y alta actividad es poco significativa, debido a que la conducción de Acquarossa no contiene cantidades importantes de radionucleidos.

Referencias

- Malinovsky, R., 1979; "Hormigones en acueductos y conducciones antiguas"; *Concr.Intern.*, 1 (1): 66-76.
- Mallinson, L.G., Davies, I.L., 1987; "Un examen histórico del hormigón"; CEC Report EUR10937EN, 309pp.

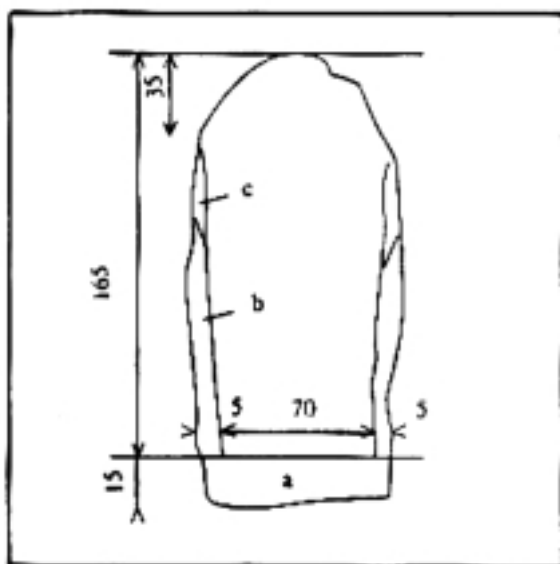


Figura 1: Dibujo esquemático de la conducción, corte transversal (De Putter Th. de, Charlet JM., 1994).



Descripción del hallazgo

En el año 122 d.C. el Emperador Adriano ordenó la construcción de una muralla que cruzara Inglaterra (desde Solway First, Escocia, hasta Wallsend, Inglaterra). Tenía una longitud de 117 km, con una altura media de 5 m.

La Muralla estaba formada por bloques de piedra, unidos por un cemento, que actuaba como ligante. A lo largo del muro se construyeron pequeñas fortificaciones, torres de vigilancia y fortalezas (fotografía 1). Después de 1745, en el levantamiento jacobita, se destruyó parte de la misma y hoy en día, las partes en mejor estado tienen sólo 1 metro de altura.



Fotografía 1. Vista panorámica de la Muralla de Adriano

Información relevante

La Muralla de Adriano contenía cantidades importantes de compuestos CSH (silicatos cálcicos hidratados), base de los actuales cementos Portland. El mortero tenía un aspecto compacto y presentaba baja porosidad. Prácticamente todo el óxido de calcio del mortero estaba sin carbonatar, lo que, junto con la evidencia de reacción en algunos agregados, sugiere la presencia de compuestos CSH.

Se identificaron dos fragmentos de CSH, uno de ellos impregnado completamente en resina. Este material muestra una relación $\text{CaO/SiO}_2 \sim 1$. El segundo fragmento era de composición muy parecida a la del primero. Se identificó

MURALLA DE ADRIANO (Reino Unido)

mediante difracción de rayos X la presencia de wollastonita y tridimita.

Analogías

La Muralla de Adriano es de interés como análogo arqueológico, debido al excelente estado de conservación del cemento utilizado para unir los bloques de piedra.

El ambiente en superficie en el norte de Inglaterra va a ser muy distinto a las condiciones en un sistema de AGP, sin embargo, las similitudes químicas y mineralógicas entre el cemento romano y el cemento Portland moderno permite extraer algunas conclusiones cualitativas sobre su estabilidad y longevidad que pueden extrapolarse a los cementos modernos en un repositorio.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad y a la comunicación

Su principal aportación es ilustrar la durabilidad del cemento que puede emplearse en las barreras de ingeniería del sistema de AGP. Constituye un ejemplo comprensible y fácil de comunicar al público, que se ha utilizado en el video "Traces of the future", realizado por diferentes agencias de residuos europeas.

Referencias

Rayment DL and Pettifer K (1987) Examination of durable mortar from Hadrian's Wall. *Materials Science and Technology* 3, 997-1004.

TUMBA DE CHANGSHA (China)



En este análogo, se ha estudiado la capacidad de sellado de la arcilla, para inhibir el paso de aire y agua.

Descripción del hallazgo

El enterramiento consiste en dos túmulos funerarios, en unos arrozales en Changsha, provincia de Hunan, (China meridional). El cadáver, estaba enterrado en el túmulo que estaba más al Este, a una profundidad de 16 metros. Los enterramientos tan elaborados como el de la tumba de Changsha, no eran comunes en las Dinastías Ch'u y Han, entre los años 770 a.C y 220 d.C.

Información relevante

La tumba tenía 16 m de profundidad, y estaba enterrada en un suelo, cuyas características exactas no aparecen disponibles en la literatura.

Una capa de carbón natural de 30 ó 40 cm. de espesor se ponía en contacto con los sarcófagos, a fin de absorber la humedad del suelo. Alrededor de esta capa de carbón, había otra de caolín, que era la que proporcionaba las características impermeabilizantes al sistema (figura 1).

Los sarcófagos del exterior contenían un gran número de ofrendas funerarias: vestidos de seda, objetos de bambú, instrumentos de música, piezas de bronce, y hasta alimentos. El sarcófago de la zona interior del pozo, contenía el cuerpo, cuidadosamente envuelto en diferentes piezas de tela (seda, lino). El estudio del cadáver, revela un estado de conservación excepcional.

La razón fundamental del estado de conservación del cuerpo y de los materiales hallados en el sarcófago es la capa de cao-

lín, que previene la percolación del agua y del aire, dentro del sarcófago. Existe una relación directa entre el grosor de la capa de caolín, y su efectividad de cara a la conservación.

Analogías

La tumba de Changsha ilustra la capacidad de aislamiento que tiene la arcilla. Este tipo de sepultura constituye una analogía de la barrera arcillosa del sistema de barrera múltiple prevista en la mayoría de los conceptos de almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos.

Las limitaciones de este análogo son: ausencia de radiactividad y del efecto térmico en la capa de arcilla. También cabe añadir, la diferencia de mineralogía entre el tipo de arcilla de la zona de Changsha, con las del tipo bentonita.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad

La principal aportación de este análogo a la evaluación de la seguridad es evidenciar la capacidad de aislamiento y sellado de la capa arcillosa presente en un sistema de almacenamiento de residuos radiactivos.

Aportación a la comunicación

Puede emplearse para contribuir al incremento de la confianza en la seguridad del AGP por parte del público, dado que la escala temporal implicada en este enterramiento, resulta de más fácil comprensión por el mismo.

Referencias

Lee, C.F. (1986). "Un caso histórico sobre la capacidad selladora de la arcilla con el paso del tiempo"; NAWG 2nd Meeting, Interlaken, CEC Report EUR 10671, 173-190.



Figura 1: Corte esquemático transversal del pozo donde se localizaba la tumba. (Lee, C.F, 1986. Modificada por la UCM).



El programa español para el almacenamiento de residuos radiactivos contempla como material a utilizar para la construcción de la cápsula acero al carbono. Desde 1998 el grupo de investigación de Tecnología Mecánica y Arqueometalurgia de la Universidad Complutense de Madrid, trabaja con Enresa en el campo de los análogos arqueológicos. Se presentan aquí cuatro de ellos.

Analogías

En el marco de los análogos españoles se ha estudiado la evolución del acero a lo largo de siglos de enterramiento, con objeto de poder prever el comportamiento a largo plazo de un material puesto en servicio al día de hoy. En el fenómeno de la corrosión de un metal enterrado influye de forma determinante el tipo de acero y el tratamiento al que fue sometido durante su fabricación y posterior conformación mecánica, así como las condiciones de enterramiento.

Aportaciones a la evaluación de la seguridad y a la comunicación al público

El estudio de estos yacimientos ha permitido avanzar en el conocimiento de los procesos de corrosión y realizar estimaciones de la velocidad de estos procesos bajo diferentes condiciones. Los resultados obtenidos permiten relacionar la corrosión del metal y las variables físico-químicas del terreno circundante.

Referencias

Publicación técnica de Enresa 7/2000. "Análogos Arqueológicos e industriales para almacenamientos profundos: Estudio de piezas arqueológicas metálicas."

Criado *et al.* "Análogos arqueológicos de acero para la cápsula de un contenedor de residuos nucleares de alta actividad". V Congreso Nacional de Corrosión y Protección E.T.S.I. Minas. Junio 2000.

(1) BARRA DE TRESPADERNE (BURGOS)

Descripción del hallazgo

La pieza fue localizada en una necrópolis visigoda situada en Trespaderne (Burgos), a una profundidad de 1.75 m, y cuya

YACIMIENTOS ESPAÑOLES EN ESTUDIO

cronología es de aproximadamente finales del siglo IV d.C. Es una barra de acero, con forma prismática (figura 1) y de grandes dimensiones, que presenta un buen estado de conservación, quedando aún gran parte del metal original.



Figura 1. Barra de Trespaderne (Publicación técnica Enresa 7/2000)

Información relevante

La distribución de carbono es bastante heterogénea, oscilando entre un 0,1% y un 0,6% en peso, según la zona. Aparecen impurezas de morfología alargada (silicatos mixtos de calcio, magnesio y manganeso) a consecuencia del proceso de forja en caliente.

La pieza presenta a su vez una delgada capa de óxidos, porosa y con presencia de grietas. Los poros se encuentran rellenos de sustancias de aspecto cristalino, con una composición mayoritaria de óxidos de calcio, provenientes del terreno circundante. La velocidad de corrosión en esta barra se sitúa en torno a 1.1 $\mu\text{m/año}$.

Por efecto del paso del tiempo, se han detectado procesos de envejecimiento estructural y difusión de cationes metálicos. Así mismo, se ha observado la presencia de corrosión bacteriana debida a las características del terreno circundante.

(2) CLAVO DE LAS MATILLAS (MADRID)

Descripción del hallazgo

El clavo objeto de este estudio se descubrió en una excavación de urgencia en el yacimiento de Las Matillas (Necrópolis romana; Siglos II-III d.C, situada en Alcalá de Henares, Madrid), junto a diversas tumbas.

Información relevante

El clavo está bastante mineralizado, con restos de madera adherida al óxido. En la parte externa del corte transversal, se aprecian elementos de diferente morfología. Mediante análi-

sis EDS, se han detectado variaciones en la proporción hierro - oxígeno en los óxidos analizados, lo cual hace suponer una estequiometría distinta para ellos.

Los análisis efectuados indican también la existencia de calcio, lo que parece sugerir que algunos átomos de hierro han sido sustituidos por átomos de calcio en la red cristalográfica.

La gran mineralización sufrida por esta pieza, se podría explicar por la alta concentración de iones cloruro y sulfato presentes en el medio circundante.

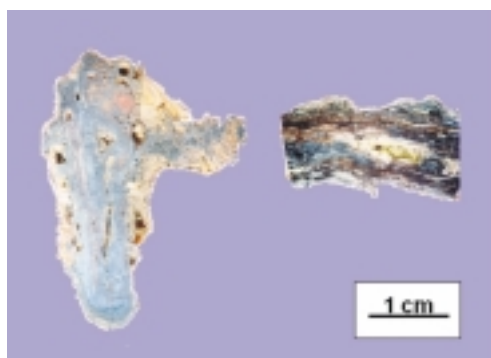


Figura 2. Cortes longitudinal y transversal de la pieza (Publicación técnica Enresa 7/2000).

(3) CLAVO DE MIJANGOS (BURGOS)

Descripción del hallazgo

Esta pieza es un clavo de acero encontrado en una sepultura en la Ermita de Santa María de Mijangos, Burgos (Época visigótica de finales del siglo V d.C). Tiene 7.52 g de peso y mide 4.4 cm de longitud por 1.0 cm de diámetro.

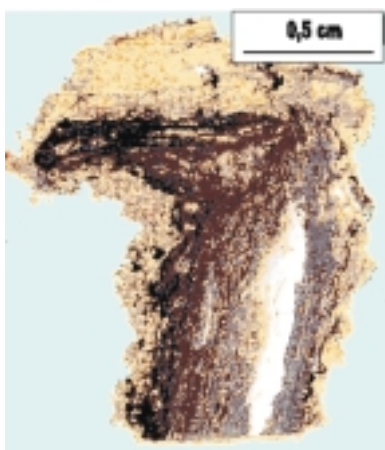


Figura 3: Corte transversal del clavo, mostrando la mineralización del clavo de Mijangos. (Publicación técnica Enresa 7/2000).

Información relevante

El clavo, encontrado en un suelo de tipo arcilloso, a una profundidad entre 2 y 3 m, está bastante mineralizado, conservando dos zonas de metal original, dispuestas a ambos lados del eje central del clavo, siendo la composición y estructura de ambas zonas diferentes.

La zona izquierda presenta una estructura ferrítica, mientras que la zona derecha presenta una estructura perlítica.

La parte externa del clavo aparece totalmente oxidada. El óxido de esta capa, se ha identificado como Fe_3O_4 , mientras que el de la capa más interna es Fe_2O_3 . Se ha encontrado también silicatos, provenientes de la interacción con el terreno. Esta pieza ha sufrido envejecimiento microestructural.

La velocidad de corrosión se estimó en $0.995 \mu\text{m/año}$.

(4) CLAVOS DE CERRO MURIANO (CÓRDOBA)

Descripción del hallazgo

Dentro del Complejo Arqueológico de Cerro Muriano (Córdoba), se han estudiado diversas piezas, eligiendo como más representativos dos clavos, uno localizado en el yacimiento de Las Mochas, y otro en el yacimiento del Cerro de la Coja. El yacimiento de Las Mochas es una necrópolis romana y data del siglo I a.C. El yacimiento del Cerro de la Coja, se cataloga como poblado y data del III milenio a.C.

La pieza localizada en el Cerro de la Coja, presentaba una grieta pasante en su interior, y los óxidos localizados en el interior de la grieta, presentaban una estequiometría totalmente diferente a los examinados en el exterior de la pieza. Los dos clavos presentan estructuras e impurezas típicas de un proceso de conformación mecánica como es la forja.

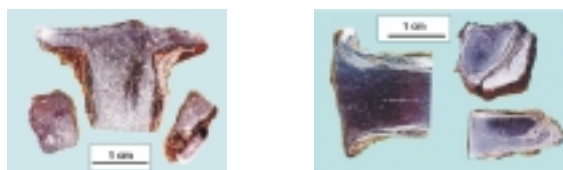


Figura 4. Cortes transversales y longitudinales de las dos piezas. (Publicación técnica Enresa 7/2000)

Conclusiones

A continuación se recogen las principales conclusiones derivadas del estudio realizado en el Proyecto “Análogos Naturales” desarrollado por el CSN agrupadas por su relación con la aportación de los análogos a la evaluación de la seguridad de los sistemas de almacenamiento geológico de residuos de alta actividad y a la comunicación a distintas audiencias del concepto, comportamiento y seguridad del sistema de almacenamiento.

De todos modos, la revisión de las tablas 5 y 6 y de las fichas ilustrativas de los análogos, permite extraer algunas de las principales conclusiones específicas sobre el uso potencial y real de los estudios de análogos en las áreas antes referidas.

Se trata de consideraciones de tipo general, ya que las conclusiones específicas acerca de la contribución de los estudios de análogos naturales y arqueológicos a la comprensión de los procesos particulares que pueden tener lugar en el sistema de AGP y a las áreas de la evaluación de la seguridad susceptibles de recibir apoyo de los mismos, se incluyen en el documento de detalle (en fase de publicación).

1. SOBRE LA APORTACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE ANÁLOGOS A LA EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD DEL AGP

El estudio de análogos constituye, y así está reconocido en el ámbito internacional, una fuente importante de conocimiento para la comprensión y la explicación del comportamiento a largo plazo de los sistemas de AGP. Y además representa un valioso complemento para apoyar y comprender los fundamentos y resultados de la evaluación de la seguridad y, en definitiva, para incrementar la confianza en la capacidad de dichos sistemas para aislar y contener los residuos radiactivos durante el tiempo necesario.

Esta capacidad de los análogos naturales y arqueológicos para contribuir al aumento de la confianza en la seguridad del AGP se basa en el hecho de que son los únicos bancos de prueba existentes para contrastar los procesos a lo largo de periodos de tiempo comparables con la duración esperable del sistema de almacenamiento y en que no han sido ni influenciados ni controlados por el hombre durante ese tiempo.

Hasta la fecha se han producido una serie de aportaciones destacables de los estudios de análogos a la evaluación de la seguridad de los sistemas de AGP. Entre ellas, es indudable que los análogos contribuyen a la identificación y comprensión de los procesos importantes para la seguridad del sistema AGP, proporcionan un campo “neutral” para la comprobación de hipótesis y la valoración de la idoneidad de los modelos y códigos y ayudan a formar expertos en el análisis de aspectos del tipo y grado de complejidad similar al tratado en la evaluación de la seguridad.

En concreto, la información de los análogos ha servido para (a) proporcionar estimaciones semicuantitativas sobre la evolución de determinados procesos (especialmente los de degradación de las barreras de ingeniería), o rangos de valores de determinados parámetros que permiten estimar el conservadurismo de los cálculos, (b) desarrollar modelos conceptuales y escenarios, ayudando a definir y seleccionar los procesos de interés, y/o proporcionar argumentos para la eliminación o incorporación de determinados procesos de los cálculos de evaluación, y (c) proporcionar un elemento para el aumento de la confianza en los códigos de modelización y las bases de datos termodinámicos.

Sin embargo, es difícil detectar el uso real de la información de los estudios de análogos en los informes principales de los ejercicios de evaluación de la seguridad, analizados en este estudio (ver tabla 4). En pocos de estos ejercicios se hace un reconocimiento expreso de la contribución procedente de los estudios de análogos, o proporcionan una discusión detallada de cómo se ha utilizado esta información para fundamentar aspectos específicos de la evaluación.

No obstante, dicha valoración puede matizarse si se incluyen en el análisis los documentos de apoyo de esos ejercicios, en los que la referencia explícita a los estudios de análogos es mucho más frecuente, entre otras cosas debido a que la utilidad de los análogos forma parte sustantiva de las bases científicas y del conocimiento de los equipos de trabajo en cada organización responsable de la gestión de los residuos radiactivos, aunque este hecho no sea reconocido expresamente.

El escaso uso real de la información de los análogos también se debe al hecho de que la mayoría de los programas de almacenamiento geológico se encuentran aún relativamente lejos de afrontar un proceso de licenciamiento. En los programas de AGP más avanzados en los que se dispone de un emplazamiento preseleccionado o candidato, la utilidad que se ha hecho de los análogos es mayor por la posibilidad de elegir los más adecuados teniendo en cuenta la similitud con el sistema de almacenamiento seleccionado y facilitar la transferencia directa de la información de los análogos como argumentos complementarios para la demostración de la seguridad.

De este modo, si bien los análogos permiten enmarcar los procesos o modelos considerados en un AGP dentro de las escalas espacio-temporales de interés en la evaluación de la seguridad, la imposibilidad de delimitar con total precisión las condiciones iniciales y de contorno que han condicionado la evolución del sistema y los problemas asociados a la variabilidad y heterogeneidad intrínseca de los sistemas naturales, implican algunas limitaciones en la aplicación de sus resultados a la evaluación del comportamiento del AGP.

Por ello, hasta ahora, en la mayoría de los casos se ha hecho un uso más cualitativo que cuantitativo de la información obtenida a partir de los estudios de

análogos. Además, se ha puesto de manifiesto que la aplicación de los análogos naturales a la evaluación de la seguridad, requiere una mayor aproximación entre los equipos de trabajo implicados en la evaluación del comportamiento del sistema de almacenamiento geológico y los encargados del estudio de los análogos.

Una línea de trabajo futuro que permanece sin explotar es el uso de los análogos en relación con los escenarios alternativos para la evaluación de la seguridad de los sistemas de AGP, ya que, hasta el momento, el aprovechamiento de la información de los análogos naturales se ha centrado excesivamente sobre los escenarios de evolución normal (de hecho, muchos de los problemas o críticas planteadas al valorar el grado de analogía, tomaban como referencia las condiciones esperables en estos escenarios de referencia o caso base).

Sin embargo, no se puede olvidar que en los ejercicios de evaluación se contemplan una serie de escenarios alternativos (escenarios de glaciación, disruptivos, etc.), en los que las valoraciones sobre su evolución suelen ser más cualitativas que cuantitativas, y en los que resulta previsible que parte de la información obtenida de análogos cuyas condiciones no eran a priori las esperables en un escenario normal, sea perfectamente aprovechable para el apoyo de dichos escenarios (el mismo razonamiento podría aplicarse a la selección y utilización de posibles análogos futuros).

La aplicación de la información de los análogos al conocimiento de los fenómenos de transporte en la biosfera, que no se ha analizado en este proyecto, puede resultar también de interés.

Además, la posibilidad de revisar y reevaluar la información de estudios previos de análogos, a la luz de los resultados de los experimentos realizados en laboratorios subterráneos y utilizando nuevos modelos y herramientas, (como se ha hecho en el caso de Cigar Lake), es una opción que permanece abierta para obtener un mayor beneficio de otros estudios de análogos.

2. SOBRE LA APORTACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE ANÁLOGOS A LA COMUNICACIÓN

Los análogos naturales son uno de los principales argumentos que pueden utilizarse para explicar el comportamiento a largo plazo del sistema de almacenamiento y para comunicar los resultados de la evaluación de la seguridad a audiencias técnicas y no técnicas, usando un lenguaje fácil de entender. En general, existe un amplio consenso sobre el hecho de que muchos grupos no familiarizados con los aspectos conceptuales y técnicos del almacenamiento geológico encontrarán más creíbles aquellas conclusiones de una evaluación del comportamiento que vayan acompañadas de ejemplos naturales paralelos para su comparación y comprensión (Miller *et al.*, 2000).

Sin embargo, pese a dicho reconocimiento del potencial de los análogos naturales y arqueológicos para ilustrar y comunicar aspectos relevantes de los sistemas de almacenamiento de residuos radiactivos y de su seguridad a largo plazo, especialmente a audiencias no técnicas o no familiarizadas con el tema, no existe todavía una utilización generalizada de los análogos por parte de organismos reguladores y agencias de residuos para estos fines.

En casi todos los casos en los que se ha hecho uso de los análogos para la comunicación, la información elaborada estaba orientada hacia la difusión a una amplia audiencia pública de los aspectos más genéricos del AGP.

Los análogos han sido utilizados para transmitir mensajes fácilmente comprensibles sobre: 1) El concepto de AGP y su potencial seguridad; 2) La similitud existente entre los materiales y radionucleidos del sistema de almacenamiento y los existentes en la naturaleza; 3) El hecho de que los procesos y sucesos relevantes que pueden tener lugar en un AGP suceden también en condiciones y sistemas naturales; y 4) Las escalas de tiempo relevantes para la evaluación de la seguridad de un AGP son observables en los análogos naturales. En estos mensajes subyacen otra serie de ideas importantes, no siempre explícitamente transmitidas, como el grado de conocimiento general adquirido sobre los procesos que pueden afectar al almacenamiento (por ejemplo, ninguno de los análogos ha evidenciado la existencia de procesos inesperados de transporte o retardo de radionucleidos).

Por otro lado, la necesidad de simplificar los contenidos divulgados con objeto de facilitar su comprensión a audiencias no técnicas no debería conllevar una sobreestimación de la validez de los análogos ni una subestimación de la audiencia. El aumento de la confianza en la seguridad de un AGP ineludiblemente debe incorporar argumentos que apoyen la percepción de que los componentes del sistema y sus propiedades son estables a largo plazo, y que el concepto de AGP es intrínsecamente seguro (NEA, 2002).

Finalmente, tal como recomienda la NEA (2002) el uso de la información procedente de estudios de análogos naturales y arqueológicos debe constituir una de las múltiples líneas de razonamiento para demostrar la seguridad de un AGP. Como ya se ha dicho, el proceso creativo de toma de decisiones para el desarrollo de los programas de AGP no es una cuestión sólo técnica, sino que también toman parte agentes políticos y sociales. Por ello, el reto de satisfacer los intereses e inquietudes del público en relación con la seguridad del sistema de almacenamiento requerirá el desarrollo de material e información dirigido a muy diversas audiencias, en las que se contemple la utilización de los análogos.

De acuerdo con todo lo indicado anteriormente, la aplicación de los análogos naturales a la evaluación de seguridad de los sistemas de AGP y a la comunicación al público, continua siendo de interés a nivel internacional. Muestra de ello es el

proyecto NANet¹⁸, impulsado por la Comisión Europea para promover el uso de los análogos naturales a los fines anteriormente señalados, y en el que participa el CSN en base a la experiencia adquirida en el desarrollo del Proyecto de Análogos aquí descrito.

Además, cabe destacar la tendencia creciente y expresa entre las agencias de residuos a incluir estudios de análogos en sus evaluaciones de la seguridad y que en algunos países se ha impuesto como un aspecto obligado por el organismo regulador (OIEA, 2002). Finalmente, debería señalarse la consideración de los análogos naturales en los requisitos de seguridad para almacenamiento geológico del OIEA, actualmente en desarrollo, como una de las líneas de razonamiento para aumentar la confianza en la evaluación de seguridad.

18 NANet: "Network to review natural analogue studies and their applications to repository safety assessment and public communication" (Red de revisión de estudios de análogos naturales y de sus aplicaciones a la evaluación de la seguridad de sistemas de almacenamiento y a la comunicación al público)

Referencias

- Angeli, F., Faucon, P., Charpentier, T., Petit, J.C. y Virlet, J. (1998). *Comparative structural study and dissolution of simplified glasses: a radioactive waste glass (R7T7) and a basaltic glass*. In: McKinley, I.G. and McCombie, C. (Eds.) Scientific Basis For Nuclear Waste Management XXI. MRS, Warrendale, PA, EE.UU., pp. 71-78.
- Alexander, W.R. and Smellie, J.A.T. (1996). The Maqarin natural analogue project: an overview. In: von Maravic, H. and Smellie, J.A.T. (Eds.) Proceedings of the Sixth EC Natural Analogue Working Group (NAWG) Meeting. Sante Fe, NM, USA, September 12-16, 1994. EC NST, Luxembourg, Luxembourg, pp. 123-135.
- Bath, A.H., Christofi, N., Neal, C., Philp, J.C., Cave, M.R., McKinley, I.G. and Berner, U. (1987). *Trace element and microbiological studies of alkaline groundwaters in Oman, Arabian Gulf: a natural analogue for cement pore-waters*. (Technical Report NTB 87-16), NAGRA, Wettingen, Switzerland.
- Baudoin, P., Gay, D., Certes, C., Serres, C., Alonso, J., Lührmann, L., Martens, K.H., Dodd, D., Marivoet, J., y Vieno, T. (2000). *Spent fuel disposal Performance Assessment (SPA project)*. Report EUR 19132, 114 p.
- Benvegnù, F., Brondi, A. y Polizzano, C. (1988). *Natural analogues and evidence of long-term isolation capacity of clays occurring in Italy: contribution to the demonstration of geological disposal reliability of long-lived wastes in clays*. Nuclear Science and Technology Report EUR 11896, EC NST, Luxemburgo, 101 p.
- Blomqvist, R. and Ruskeeniemi, T. (1997). *Transport of Radionuclides in a Natural Flow System at Palmottu*. (Progress Report SKB 97-15), SKB, Stockholm, Sweden.
- Blomqvist, R., Ruskeeniemi, T., Kaija, J., Ahonen, L., Paananen, M., Smellie, J., Grundfelt, B., Pedersen, K., Bruno, J., Pérez del Villar, L., Cera, E., Rasilainen, K., Pitkänen, P., Suksi, J., Casanova, J., Read, D., Frape, S. (Ed.) (2000). *The Palmottu natural analogue project. Phase II: transport of radionuclides in a natural flow system at Palmottu*. (Final Report EUR-19611), EC-NST, Luxembourg, Luxembourg, 171 p.
- Brandberg, F., Grundflet, B., Höglund, L.O., Karlsson, F., Skagius, K. y Smellie, J.A.T. (1993). *Studies of natural analogues and geological systems. Their importance to performance assessment*. Technical Report SKB TR 93-05, SKB, Estocolmo, Suecia.
- Côme, B. y Chapman, NA. (1986). *CEC Natural Analogue Working Group. First Meeting*. EUR 10315, Brussels, Belgium, 5-7 Noviembre, 1985.
- Côme, B. y Chapman, NA. (1987a). *Proceedings of the second CEC/NAWG Meeting*. EUR 10671, Interlaken, Suiza, 17-19 Junio, 1986.

- Côme, B. y Chapman, N.A. (1987b). *Natural Analogues in Radioactive Waste Disposal, Proceedings of a Symposium held in Brussels*. EUR 11037, 28-30 Abril, 1987.
- Côme, B. y Chapman, N.A. (1989). *CEC Natural Analogue Working Group. Third Meeting*. EUR 11725, Snowbird, near Salt Lake City, EE.UU., 15-17 Junio, 1988.
- Côme, B. y Chapman, N.A. (1991). *Proceedings of the Fourth Natural Analogue Working Group Meeting and Poços de Caldas Project Final Workshop*. EUR 13014, Pitlochry, Escocia, 18-22 Junio, 1990.
- Chapman, N.A., McKinley, I.G., Shea, M.E. y Smellie, J.A.T. (1984). *The potential of natural analogues in assessing systems for deep disposal of high-level radioactive waste*. Tech. Rep. KBS 84-16.
- Chapman, N.A., McKinley, I.G., Shea, M.E. and Smellie, J.A.T. (1991). *The Poços de Caldas project. Summary and implications for radioactive waste management*. (Technical Report SKB TR 90-24), SKB, Stockholm, Sweden.
- Cramer, J.J. and Smellie, J.A.T. (Ed.) (1994). *Final Report of the AECL/SKB Cigar Lake Analog Study*. (Tech. Rep SKB TR 94-04), AECL, Pinawa, Manitoba, Canada.
- CSN (2003). Salas, E., Ruiz, M.C. *Estudio comparativo de las evaluaciones de seguridad del almacenamiento profundo de residuos radiactivos de alta actividad en medios cristalinos*. (Informe en prensa).
- Curtis, D.B. y Gancarz, A.J. (1983). *Radiolysis in nature: evidence from the Oklo natural reactors*. KBS Technical Report, TR 83-10.
- De Putter, Th. y Charlet, J.M. (1991). *Analogies Naturelles en Milieu Argileux. Essai de synthèse bibliographique*. ONDRAF, Octubre, 1994.
- Dexter, S.C. (Ed.) (1986). *Biologically induced corrosion. Proceedings of the International Conference on Biologically Induced Corrosion*. Houston, EE.UU.
- Duro, L., Arcos, D., Bruno, J., Jordana, S., Grivé, M., Pon, J., Castelier, E., Beaucaire, C., Fauré, M.H., Peña, J., Gimeno, M.J., Del Nero, M., Ayora, C., Salas, J., Ledoux, E. and Madé, B. (2000). Blind prediction modelling (BPM) exercise in Oklo. In: Louvat, D., Michaud, V. and von Maravic, H. (Eds.) Oklo working group. *Proceedings of the third and final EC-CEA workshop on Oklo-Phase II [CD-ROM]*. Cadarache, France, May 20-21, 1999. EC NST, Luxembourg, Luxembourg, pp. 285-306.
- Enresa (1997). *Evaluación del Comportamiento y de la Seguridad de un Almacenamiento Geológico Profundo en Granito*. Publicación Técnica 06/97, ENRESA, Madrid, España.

- Enresa (1999). *Evaluación del Comportamiento y de la Seguridad de un Almacenamiento Profundo en Arcilla*. Publicación Técnica 03/99, ENRESA, Madrid, España.
- Enresa (2000). *Análogos arqueológicos e industriales para almacenamientos profundos: estudio de piezas arqueológicas metálicas*. Publicación Técnica 00-07, ENRESA, Madrid, España.
- Gauthier-Lafaye, F. (1996). Introduction to the Oklo problematic. In: Blanc, P.L. and von Maravic, H. (Eds.) Oklo Working Group. Proceedings of the fourth joint EC-CEA progress and final meeting. Saclay, France, June 22-23, 1995. EC NST, Luxembourg, Luxembourg, pp. 5-16.
- Gera, F., Hueckel, T. y Peano, A. (1996). *Critical issues in modelling the long-term hydro-thermo-mechanical performance of natural clay barriers*. Eng. Geol., 41, 17-33.
- Goodwin, B.W., Cramer, J.J. and McConnell, D.B. (1989). The Cigar Lake Uranium deposit: an analogue for nuclear fuel waste disposal. In: Côme, B. and Chapman, N.A. (Eds.) CEC Natural Analogue Working Group. Third Meeting. Snowbird, near Salt Lake City, USA, June 15-17, 1988. CEC, Luxembourg, Luxembourg, pp. 181-190.
- Goodwin, B.W., McConnell, D.B., Andres, T.H., Hajas, W.C., LeNeveu, D.M., Melnyk, T.W., Sherman, G.R., Stephens, M.E., Szekely, J.G., Bera, P.C., Cosgrove, C.M., Dougan, K.D., Keeling, S.B., Kitson, C.I., Kummen, B.C., Oliver, S.E., Witzke, K., Wojciechow (1994). *The disposal of Canada's nuclear fuel waste: postclosure assessment of a reference system*. (Technical Report AECL-10717), Pinawa, Manitoba, Canadá, 684 p.
- Gumtensperger, M.A., Lindquist, J. (1999). "Public Perception and natural analogues". Report EUR 17543 EN p. 543. Proceedings of the Fourth Conference of the EC on the Management and Disposal of Radioactive Waste, Luxembourg.
- Hofman, B.A. (1992). *Isolated reduction phenomena in red beds: a result of pore water radiolysis?*. In Kharaka, Y.K. and Maest, J. (Eds.) Proceedings of the 6th International Symposium on Water-Rock Interaction. Balkema, Rotterdam, Holanda.
- ICRP (2000). *Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long Lived Solid Radioactive Waste*. ICRP Publication No. 81, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford and New York (2000).
- JNC (2000). H12: *Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan*. Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan.
- Lagerblad, B. y Trägårdh, J. (1995). *Conceptual model for concrete long time degrada-*

- tion in a deep nuclear waste repository*. SKB TR 95-21, Estocolmo, Suecia.
- Linklater, C. M. (Ed.) (1998). *A natural analogue study of cement-buffered, hyperalkaline groundwaters and their interaction with a repository host rock*. (Science Report S/98/003), NIREX, Harwell, Oxfordshire, UK, 301 p.
- McKinley, I.G. y Alexander, W.R. (1996). *The uses of natural analogue input in repository performance assessment: an overview*. In: von Maravic H and Smellie J (editors) Natural analogue working group, sixth meeting, Santa Fe, Septiembre 1994. CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 16761M 273-2282, CEC, Luxemburgo.
- McKinley, IG (1993). *The role of natural analogue in nuclear waste repository performance assessment with particular emphasis on experience in Switzerland*. Reliability Engineering and System Safety, 42, Nos 2-3, 233-246, Elsevier Science Publ.
- Miller, W., Alexander, R., Chapman, N., McKinley, I. y Smellie, J. (2000). *The geological disposal of radioactive waste and natural analogues. Lessons from Nature and archeology*. Pergamon, Amsterdam, vol. 2, 316 p. Waste Management Series.
- Miller, W.M. y Chapman, N.A. (1995). Postcards from the past: *archaeological and industrial analogues for deep repository materials*. Radwaste Mag., 2, 32-42.
- NAGRA (1994). *Kristallin-I. Safety Assessment Report*. (Technical Report NTB TR 93-22), NAGRA, Wettingen, Suiza, 396 p.
- NEA (1991). *Disposal of Radioactive Waste: Review of Safety Assessment Methods*. París, Francia.
- NEA (1994). ARAP. *The international Alligator rivers analogue project. Background and results*. OECD Nuclear Energy Agency, París, Francia, 77 p.
- NEA (1997a). *Regulating the Long-Term Safety of Radioactive Waste Disposal. Proceedings of an International Workshop*. Córdoba, España 20-23 Enero 1997, OECD Nuclear Energy Agency, 337 p.
- NEA (1997b). *Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies*. OECD Nuclear Energy Agency, París, Francia, 129 p.
- NEA (1999a). *Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories. Its Development and Communication*. OECD Nuclear Energy Agency, París, Francia, 80 p.
- NEA (1999b). *Geological Disposal of Radioactive Waste. Review of Developments in the Last Decade*. OECD Nuclear Energy Agency, París, Francia, 106 p.
- NEA (2000). *Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geological Repositories, Lessons Learnt*. OECD Nuclear Energy Agency, París, Francia, 134 p.
- NEA (2001). *The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal*

- Programmes*. OECD Nuclear Energy Agency, París, Francia, 43 p.
- NEA (2002). *Approaches and arguments to establish and communicate confidence in safety and the overall results of Integrated Performance Assessments*. (Informe en prensa).
- Neall, F.B., Baertschi, P., McKinley, I.G., Smith, P.A., Sumerling, T.J. y Umeki, H. (1994). *Kristallin-I - results in perspective*. (Technical Report NTB 93-23), NAGRA, 120 p.
- OIEA (1989). *Natural analogues in performance assessment for the disposal of radioactive wastes*. IAEA Technical Report, 304, International Atomic Energy Agency, Viena, Austria.
- OIEA (1996). *Issues in radioactive waste disposal. Second report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal*. TECDOC-909, International Atomic Energy Agency, Viena, Austria Octubre 1996.
- OIEA (1997). *Regulatory decision making in the presence of uncertainty in the context of the disposal of long lived radioactive wastes. Third report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal*. TECDOC-975, International Atomic Energy Agency, Viena, Austria Octubre 1997.
- OIEA (1999). *Use of natural analogues to support radionuclide transport models for deep geological repositories for long lived radioactive wastes*. IAEA Technical Report 1109, International Atomic Energy Agency, Viena, Austria.
- OIEA (2002). *Geological Disposal of Radioactive Waste*. IAEA Safety Standard Series-Draft Safety Requirements DS 154, 2002.10-14 (Status: for approval, for submission to the Member States)
- Pellegrini, R., Horseman, S., Kemp, S., Rochelle, C., Boisson, J.-Y., Lombardi, S., Bouchet, A. y Parneix, J.-C. (1999). *Natural analogues of thermo-hydro-chemical and thermo-hydro-mechanical response*. Report EUR 19114, CEC, Luxemburgo.
- Pérez del Villar, L., De la Cruz, B., Pardillo, J., Pelayo, M., Rivas, P. and Astudillo, J. (1993). El sistema granito-mineralización de Uranio de El Berrocal como análogo natural de un almacenamiento de residuos radiactivos. *Estud. Geol.*, 49(3-4), 187-198.
- Pusch, R. and Madsen, F.T. (1995). Aspects on the illitization of the Kinnekulle bentonites. *Clays Clay Miner.*, 43, 261-270.
- Savage, D. (Ed.) (1995). *The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste*. John Wiley & Sons, 437 p.
- SKB (1999a). *Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97. Post-closure safety*. (Technical Report SKB TR 99-06), SKB, Estocolmo, Suecia.

- SKB (1999b). SR 97. *Processes in the repository evolution. Background report to SR 97.* (Technical Report SKB TR 99-07), SKB, Estocolmo, Suecia.
- SKI (1991). *SKI Project-90.* 2 vols. Technical Report SKI TR 91/23, SKI, Estocolmo, Suecia.
- SKI (1996). *SKI SITE-94.* Deep repository performance assessment project. 2 vols. Technical Report SKI R 96/36, SKI, Estocolmo, Suecia, 305-660 p.
- Smellie, J.A.T., Karlsson, K. y Alexander, W.R. (1997). *Natural analogue studies: Present status and performance assessment implications.* J. Contam. Hydrol., Vol. 26.
- Smellie, J.A.T, Grundfelt, B., Carlsson, F (1999). “*Natural Analogue (NA) Approach: Have they provide quantitative data applicable to repository performance assessment (PA) and contribute to a better public perception on radioactive waste disposal?*”, p. 243. EUR 19143. Proceedings of Euradwaste 1999, Luxembourg, November 15-18, 1999.
- Steadman, J.A. (1986). *Archaeological concretes as analogues.* Technical Report EUR 10671, EC-NST, Luxemburgo, 165-171 p.
- Trotignon, L., Michaud, V. and Louvat, D. (2000). *Application of the Oklo Natural Analogue Study to Nuclear Waste Disposal Model, Testing and Development.* In: Louvat, D., Michaud, V. and von Maravic, H. (Eds.) Oklo working group. Proceedings of the third and final EC-CEA workshop on Oklo-Phase II [CD-ROM]. Cadarache, France, May 20-21, 1999. EC NST, Luxembourg, Luxembourg, pp. 401-408.
- USDOE (1996). *Title 40 CFR 191 Compliance Certification Application (CCA) for the Waste Isolation Pilot Plan.*, DOE/CAO-1996-2184, Carlsbad Area Office.
- USDOE (1998). *Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain. Total System Performance Assessment.* Vol. 3. DOE/RW-0508, Office of Civilian Radioactive Waste Msnagement, 523 p.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. 10 CFR Part 63, *Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Proposed Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada.* Proposed rule 10 CFR Part 63.
- Valentini, G., Lombardi, S., Bozzano, F. and Scarascia Mugnozza, G. (Ed.) (1997). *Analysis of the geo-environmental conditions as morphological evolution factors of the sand-clay series of the Tiber valley and Dunarobba forest preservation.* (Report EUR 17479), EC-NST, Luxembourg, Luxembourg.
- Vieno, T. y Nordman, H. (1999). *Safety assessment of spent fuel disposal in Håstholmen.* Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. TILA-99, POSIVA 99/07, Helsinki, Finlandia.

- von Maravic, H. y Smellie, J.A.T. (1994). *Fifth CEC Natural Analogue Working Group meeting and Alligator Rivers Analogue Project (ARAP) final workshop*. Proc. of an international workshop, EUR 15176, Toledo, España, 5-9 Octubre, 1992.
- von Maravic, H. y Smellie, J.A.T. (1996). *Proceedings of the Sixth EC Natural Analogue Working Group (NAWG) Meeting*. EUR 16761, Sante Fe, NM, EE.UU., 12-16 Septiembre, 1994.
- von Maravic, H. y Smellie, J.A.T. (1997). *Seventh EC Natural Analogue Working Group Meeting. Proceedings of an international workshop*. EUR 17851, Stein am Rhein, Suiza, 28-30 October, 1996.
- Winberg, A. and Stevenson, D. (1994). Hydrogeological modelling. In: Cramer, J.J. and Smellie, J.A.T. (Eds.) *Final Report of the AECL/SKB Cigar Lake Analog Study*. (Tech. Rep SKB TR 94-04), AECL, Pinawa, Manitoba, Canada, pp. 104-142.

Anexo A. Ejercicios de evaluación de comportamiento y/o seguridad de sistemas de AGP más significativos

Tabla de los estudios de evaluación integrada del comportamiento y/o seguridad del AGP más representativos, realizados en las últimas décadas, indicando la organización que realizó el estudio y el objetivo del estudio

Organización	Referencias principales y otros documentos relevantes	Objetivos de la evaluación
AECL Canadá	AECL (Atomic Energy of Canada Limited) 1994. Environmental Impact Statement (EIS) on the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste. AECL Repror. AECL-10711, CCG-93-1. Varios subdocumentos con disponibilidad pública. The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Postclosure assessment of a reference system (Goodwin et al., 1994). The disposal of Canada's Nuclear fuel waste: A study of the postclosure assessment of used CANDU fuel in cooper containers in permeable plutonic rocks (Goodwin et al., 1996). AECB (Atomic Energy Control Board) 1995. AECB staff response to the environmental impact statement on the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste. INFO-0585-1. Público.	Servir de base a las decisiones a tomar para el futuro desarrollo del programa de residuos radiactivos canadiense. Evaluación/ análisis determinista y probabilista del concepto de referencia. Demostración de la idoneidad del concepto. Evaluación de conceptos alternativos: contenedor de cobre en galerías horizontales. Evaluación reguladora del EIS.
EC Comisión Europea	PAGIS (Performance Assessment of Geological Isolation System for Radioactive Waste) (Cadelli N. et al., 1988) –5 volúmenes. PACOMA - Performance assessment of the geological disposal of medium level and alpha waste in a clay formation in Belgium. (Marivoet and Zeevaert, 1990). First Performance Assessment of the Disposal of Spent Fuel in a Clay Layer (Marivoet et al., 1996). Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: EVEREST project (Cadelli, N. et al., 1996, Marivoet, J. et al., 1997). SPA (Spent Fuel Assessment project) (EC, 1998).	Desarrollo de la metodología de evaluación de la seguridad a largo plazo del AGP y aplicación a varios tipos de residuos, diseños conceptuales y emplazamientos.
ECN, RIVM, RGD Holanda	PROSA Prijj et al., 1993	Estudiar la opción del almacenamiento de residuos radiactivos en formaciones salinas
ENRESA España	ENRESA-97 -- Performance assessment of a spent fuel repository in granite (ENRESA, 1997) ENRESA-98 -- Performance assessment of a spent fuel repository in clay (ENRESA,1998)	Desarrollar una metodología de evaluación del comportamiento de un sistema de AGP en roca granítica y arcillosa, respectivamente
GRS Alemania	GSF-91: "Analysis of the long-term safety of disposal concepts with heat producing radioactive wastes" (Buhmann et al. 1991) (in German)	Estudiar y comparar diferentes conceptos de AGP
HMIP Reino Unido	Dry Run 3: Trial assessment of underground disposal based on probabilistic risk analysis (Sumerling ed., 1992)	Probar las capacidades de los códigos de simulación ambiental aplicados al análisis de un repositorio hipotético de residuos de media y baja actividad en el emplazamiento de Hanwell

Organización	Referencias principales y otros documentos relevantes	Objetivos de la evaluación
JNC Japón	H3: "Research and development on geological disposal of high-level radioactive waste. First Progress report" (PNC, 1993) The second progress report: H12 Project for assessment of feasibility of HLW disposal in Japan (JNC, 1999)	Sintetizar el estado del programa de I+D y orientar y servir de base para la continuación de dicho programa. Demostrar la viabilidad técnica y seguridad del concepto de AGP, y apoyar la selección de emplazamientos y el desarrollo del marco regulador.
NAGRA Suiza	NAGRA 1985 Proyecto Gewähr. Kristallin-1 Safety Assessment Report (Nagra 1994).	Demostrar la viabilidad y seguridad del AGP a requerimiento del Gobierno suizo. Probar y desarrollar la metodología de evaluación y guiar el proceso de selección de emplazamientos.
NIREX Reino Unido	Nirex 95: A preliminary analysis of the Groundwater Pathway for a Deep Repository at Sellafield (Nirex, 1995a). Nirex 97: An assessment of the post-closure performance of a Deep Waste repository at Sellafield (Nirex, 1997).	Desarrollo iterativo del concepto de almacenamiento Demostración de la capacidad desarrollada para evaluar el comportamiento de los emplazamientos candidatos, integrando la información de emplazamientos y del programa de I+D.
NRI, RAWRA, República Checa	BAZ 97-02, The role of reference system in deep geological repository development (Koropaskova et al., 1997)	Evaluar el papel de las barreras en el sistema de almacenamiento de referencia.
ONDRAF/NIRAS Bélgica	SAFIR (Niras/ONDRAF 1989). SAFIR 2 (Safety Assessment and Flexibility Interim Report (December 2001)	Estudiar el impacto radiológico del almacenamiento de residuos en las Arcillas de Boom. Demostrar la viabilidad de la opción del AGP en Bélgica. Recopilar los resultados de 10 años de I+D.
POSIVA Finlandia	TVO-92 safety analysis of spent fuel disposal. Helsinki, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies. Report YJT-92-33E. (Vieno, T., Hautajärvi, A., Koskinen, L. & Nordman, H. 1992). TILA-96. Interim report on safety assessment of spent fuel disposal TILA-96. Helsinki, POSIVA-96-17. (Vieno, T. and Norman, H. 1996). TILA-99. Safety assessment of spent fuel disposal in Håstholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. TILA-99. Helsinki Posiva, POSIVA-99-07. (Vieno, T. and Norman, H. 1999).	Servir de base a las decisiones sobre el futuro desarrollo del programa de gestión de residuos radiactivos y al proceso de selección de emplazamientos. Estudios preliminares de emplazamientos en 5 áreas de estudio. Dar respuesta al requerimiento del organismo regulador de remisión de informes periódicos de evaluación de la seguridad en los que se incorporen los datos de emplazamientos y del programa de I+D Servir de base a la "Decisión en Principio" del Gobierno finlandés sobre el AGP de combustible irradiado y a la Evaluación de Impacto Ambiental y el proceso de selección de emplazamiento asociados.

Tabla de los estudios de evaluación integrada del comportamiento y/o seguridad del AGP más representativos (continuación), realizados en las últimas décadas, indicando la organización que realizó el estudio y el objetivo del estudio

Tabla de los estudios de evaluación integrada del comportamiento y/o seguridad del AGP más representativos (continuación), realizados en las últimas décadas, indicando la organización que realizó el estudio y el objetivo del estudio

Organización	Referencias principales y otros documentos relevantes	Objetivos de la evaluación
SKB Suecia	KBS-1, KBS-2, KBS-3 (SKB 1977,1978,1983). SKB-91, Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety (SKB, 1992). SR-97, Post-closure safety – Main report, Volumes 1 and 2 (SKB, 1999).	Ilustración de las opciones posibles para la gestión de residuos y primer concepto de evaluación preliminar. Desarrollar la metodología de evaluación de la seguridad. Demostrar la viabilidad del concepto KBS-3, probar la capacidad de evaluación y servir de base al proceso de selección de emplazamientos.
SKI Suecia	SKI Project-90 (SKI, 1991). SKI SITE 94 Deep Repository Performance Assessment Project (SKI, 1996).	Desarrollo de capacidad de evaluación reguladora, demostración de la metodología de evaluación. Desarrollo de capacidad de evaluación reguladora y demostración de la incorporación de datos de caracterización del emplazamientos y de I+D en la evaluación.
US DOE/WIPP Estados Unidos	Draft 40 CFR 191 Compliance Certification Application (DCCA) for the Waste Isolation Plant (SNL, 1995).	Permitir discusiones técnicas con el organismo regulador previas a la presentación de la licencia definitiva y servir de base a la selección de emplazamientos o medios geológicos.
US DOE/ YMP Estados Unidos	Total-System Performance Assessment - 1993: An Evaluation of the Potential Yucca Mountain Repository, R.W.Andrews, T.F. Dael and J.A. McNeish, Las Vegas, Nevada, IN'YERA. Iric. March 1994. Prepared for the U.S. Department of Energy/Yucca Mountain Site Characterization Project. Total System Performance Assessment 1995: TSPA-95. TRW Environmental Safety System Inc. "Total System Performance Assessment - 1995: An Evaluation of the potential Yucca Mountain repository," Las Vegas, Nevada, Document nº B00000000-01717-2200-00136 (Rev. 01, Nov-1995). Total System Performance Assessment 1995: An Evaluation of the Potencial Yucca Mountain Repository (CRWMS M&O, 1995) Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain, Total System Performance Assessment (U.S. Department of Energy, 1998).	Desarrollar la metodología de evaluación de la seguridad: tratamiento de la información del diseño del sistema y de emplazamientos y desarrollo de modelos. Desarrollar la metodología de evaluación. Demostrar la capacidad de evaluación del comportamiento y servir de base a la toma de decisiones. Demostrar la estrategia de evaluación de la seguridad y la viabilidad del proyecto para cumplir los requisitos reguladores.
US NRC, Estados Unidos	Initial demonstration of the NRC's capability to conduct a performance assessment for a high-level waste repository (Codell et al., 1992) NRC Iterative Performance Assessment Phase 2: Development of capabilities for review of a performance assessment for a high-level waste repository (Wescott et al. Eds., 1995) Iterative Performance Assessment Phase 3: status of activities (Manteufel & Baca, 1995)	Desarrollar y demostrar la metodología de evaluación del comportamiento. Desarrollar capacidad de evaluación reguladora. Desarrollar capacidad de evaluación reguladora y desarrollar una regulación aplicable a Yucca Mountain.

Anexo B. Analogías de los procesos que pueden tener lugar en un sistema de AGP

1. DISOLUCIÓN DE LA MATRIZ DE RESIDUO (COMBUSTIBLE GASTADO O VIDRIO DE REPROCESO)

Los procesos de alteración y disolución del residuo, sea combustible gastado o vidrios de reproceso, dan lugar a la liberación de los radionucleidos presentes en los mismos y, por tanto, tienen un papel básico en la evaluación de la seguridad del sistema de AGP. Estos procesos se encuentran en estrecha relación con algunos de los procesos que tienen lugar en el campo próximo, afectando al propio residuo y a la retención de los radionucleidos lixiviados (procesos de precipitación de fases secundarias, de sorción, etc.), y su tratamiento se suele integrar en los modelos denominados de liberación de radionucleidos.

En el caso del *combustible gastado*, de todas las diferentes fuentes desde las que pueden liberarse los radionucleidos (varillas de Zircaloy, huelgo entre las varillas y las pastillas de UO_2 , matriz de UO_2 y límites de grano), la más importante es la matriz de UO_2 , ya que tiene asociada la mayor parte de la actividad presente en el combustible gastado. La alteración química de la matriz de UO_2 puede producirse por disolución simple o por procesos de transformación (oxidación) del UO_2 en óxidos con estequiometrías distintas. Ambos procesos se encuentran estrechamente relacionados y su actuación acoplada dependerá, fundamentalmente, del estado redox del sistema, con una velocidad de disolución del UO_2 mayor a medida que las condiciones se hacen más oxidantes. Además, asociado al proceso de alteración del UO_2 se da la aparición de fases secundarias, que pueden afectar a la pasivación de los procesos de disolución y a la retención de los radionucleidos liberados.

El análisis de los procesos de alteración de las uraninitas y la formación de fases secundarias, dada su lenta cinética de formación, constituye un aspecto destacado en los estudios de análogos naturales, que proporciona información sobre la evolución del combustible gastado en distintas condiciones, y sus efectos sobre la migración y retención de los radionucleidos presentes en la matriz de UO_2 a las escalas de tiempo adecuadas para la evaluación de la seguridad.

En los estudios realizados en yacimientos de uranio, la secuencia de alteración de la uraninita ha sido analizada tanto en condiciones reductoras (análogos de *Oklo* en Gabón, *Cigar Lake* en Canadá y *Palmottu* en Finlandia), como en condiciones oxidantes (análogos de Shinkolobwe en Congo, *Koongarra* en Australia y Krunkelbach en Alemania). Las observaciones cualitativas apoyan la estabilidad a largo plazo del combustible gastado mientras se mantengan unas condiciones reductoras, ya que la velocidad de disolución de la uraninita en estas condiciones es extremadamente lenta.

Además, en los análogos naturales estudiados se ha identificado como proceso de alteración de la uraninita en condiciones anóxicas, el proceso de cofini-

tización (transformación del dióxido de U(IV) en un silicato de U(IV) como resultado de la adición de sílice a la uraninita). En los modelos normalmente utilizados en las evaluaciones de seguridad se asume la hipótesis de que la matriz de UO_2 es estable en condiciones reductoras, mientras que se ha evidenciado que la cofinita formada a expensas de la uraninita, aunque es capaz de retener muchos radionucleidos liberados por esta última, se altera rápidamente si cambian las características químicas de la solución a partir de la que se formó (Trotignon *et al.*, 2000). Esto refuerza el interés de su estudio en el ámbito de la evaluación de la seguridad.

En el caso de las *matrices borosilicatadas*, la liberación de radionucleidos se produce exclusivamente a partir de los procesos de alteración que afectan al vidrio. El vidrio es una fase metaestable que, con el tiempo, puede sufrir procesos de desvitrificación (cristalización en estado sólido) para formar fases termodinámicamente más estables, y se pueden producir fases más sensibles a la disolución que el vidrio original. Además, la matriz vítrea, al entrar en contacto con el agua subterránea tras el fallo del contenedor, puede disolverse y reaccionar para generar distintas fases secundarias de alteración con importantes capacidades de retención de los radionucleidos liberados previamente.

Los estudios de análogos naturales y arqueológicos relacionados con las matrices de vidrio borosilicatado han proporcionado información relativamente abundante sobre los procesos de desvitrificación, disolución y formación de fases secundarias de alteración (Miller *et al.*, 2000), que atestiguan la estabilidad a largo plazo de estos materiales en un amplio rango de condiciones. Sin embargo, los datos disponibles sobre la retención de radionucleidos en esas fases secundarias o sobre los efectos inducidos por la radiación son muy escasos o inexistentes.

Además, los análogos naturales han contribuido al desarrollo de modelos conceptuales y a la verificación de modelos y códigos de liberación de radionucleidos manejados en la evaluación de la seguridad de los sistemas de AGP y proporcionan datos cuantitativos sobre las velocidades de disolución a largo plazo de la uraninita y de los vidrios naturales, que pueden ser útiles, al menos como rangos para su comparación.

2. CRITICIDAD

En un sistema de AGP, debido a las cantidades considerables de actínidos existentes en el residuo, se puede producir, después de un cierto periodo de tiempo, una acumulación de isótopos fisionables como ^{235}U y ^{239}Pu , que, en presencia de neutrones y de un moderador apropiado que disminuya la velocidad de estos neutrones (como es el agua subterránea que pueda acceder a las inmediaciones del

contenedor), podría provocar una reacción de fisión nuclear en cadena automantenida. Las implicaciones negativas que esto podría tener para la seguridad del AGP son la generación de productos de fisión, que a su vez se desintegran en un número elevado de radionucleidos, la generación de calor y, en el caso más extremo (cuando el factor de multiplicación neutrónico es superior a la unidad), la puesta en marcha de una reacción de fisión divergente e incontrolada que podría provocar daños irreparables en el sistema de almacenamiento. En el escenario base o de evolución normal del sistema de AGP no se tiene en cuenta la criticidad, pero puede contemplarse en otros escenarios de evolución alterada, con fallo del contenedor y la consiguiente entrada de agua.

Oklo es el único análogo natural en el que se alcanzaron condiciones de criticidad y se produjeron reacciones de fisión nuclear en cadena, por lo que proporciona una oportunidad única de estudiar ciertos procesos que no pueden ser observados en otros yacimientos de uranio, como son el transporte de radionucleidos transuránidos y la estabilidad de minerales de uranio una vez que se han alcanzado condiciones de criticidad. No obstante la analogía entre la criticidad alcanzada en Oklo y la que puede sufrir el combustible gastado utilizado en los reactores nucleares tiene ciertos puntos débiles como son que la temperatura de quemado en Oklo, entre 400-600 °C, es menor que la que se produce en un reactor nuclear y que el tiempo que duró la criticidad en Oklo fue mucho más largo que el periodo durante el cual el combustible nuclear está dentro del reactor.

La información del análogo de Oklo se ha utilizado en algunos ejercicios de evaluación de la seguridad (SR 97, USDOE-VA) para analizar la posibilidad de criticidad en un sistema de AGP de RAA, concluyéndose que es altamente improbable el alcanzar criticidad dentro y fuera del contenedor de residuos.

3. RADIÓLISIS

La radiólisis es el proceso de descomposición química de la materia por la incidencia de radiaciones ionizantes de alto poder energético. En el campo próximo de un sistema de almacenamiento geológico profundo (AGP) se puede producir la radiólisis del agua subterránea, la materia orgánica y la bentonita, inducida por la radiación emitida en la desintegración radiactiva de los residuos de alta actividad. Entre todas ellas, la radiólisis del agua subterránea es la más importante.

Los dos procesos principales de la radiólisis del agua, son la ionización, en la que se genera el radical catión acuoso y un electrón, y la excitación electrónica, en la que se produce una molécula de agua excitada. Estas tres especies, a través de diferentes reacciones químicas, producen el radical hidróxilo, el electrón sol-

vatado y el radical hidrógeno, que, a su vez, pueden recombinarse entre sí para generar hidrógeno gas, peróxido de hidrógeno y agua.

Los modelos teóricos asumen que el reductor más importante, el H_2 , es inerte químicamente y migra fuera del sistema (por su elevada difusividad), mientras que los oxidantes son más reactivos y con menor difusividad, por lo que se genera un frente redox oxidante que se mueve lentamente desde el residuo hacia las barreras. La extensión de la migración de este frente está controlada por el equilibrio entre la producción de oxidantes y su consumo por los materiales ricos en hierro de las barreras de ingeniería y las rocas del campo próximo.

El efecto principal que produce la radiólisis en un sistema de AGP es la alteración de las condiciones geoquímicas en el medio próximo al contenedor, como consecuencia de la producción de agentes reductores y oxidantes. Estos agentes oxidantes pueden afectar a la corrosión del contenedor, la disolución del UO_2 , y la solubilidad y especiación de radionucleidos, facilitando su migración en su camino hacia la biosfera.

La radiólisis del agua se ha identificado en yacimientos de uranio con elevados campos de radiación como *Oklo* o *Cigar Lake* o en otros yacimientos como *Cluff Lake* y *Rabit Lake* (Canadá) *Shinkolobwe* y *Menzenschwand* (Alemania), que representan diferentes ambientes geológicos y condiciones químicas, lo que sugiere que es un proceso común en la naturaleza. Su estudio en estos sistemas contribuye a entender mejor el proceso, al permitir conocer el comportamiento de los productos de la radiólisis una vez generados, determinar si dichos productos inducen la oxidación y degradación de la uraninita, establecer qué fracción de la radiación total impacta sobre el agua circundante, (aun sabiendo que los campos de radiación en estos sistemas naturales siempre serán muy inferiores a los que existirán en un sistema de AGP), y desarrollar y mejorar los modelos de simulación del proceso.

4. CORROSIÓN

La corrosión se define como la destrucción o deterioro de un metal, fruto de la reacción con el medio que le rodea. En un sistema de AGP, la corrosión es la principal causa de fallo de los contenedores bajo las condiciones previsibles en el almacenamiento y como consecuencia de la misma se pueden producir además productos de alteración secundarios y generarse gas. El fallo por corrosión se deberá a fenómenos de corrosión localizada y/o generalizada, los cuales dependen en gran medida de tipo de medio geológico, del emplazamiento, del concepto, de las características del agua subterránea y, evidentemente, del propio material con que este hecho el contenedor (así como los métodos de soldadura, etc.).

La corrosión generalizada ocurre de forma uniforme sobre toda la superficie expuesta de la pieza o gran parte de ella, y es la más común. La corrosión localizada tiene lugar en una zona determinada de la pieza, y se inicia generalmente en lugares donde existen inclusiones o variaciones en la composición o en la estructura cristalina. Los principales tipos de corrosión localizada posibles en las condiciones del almacenamiento son: corrosión por picadura, bajo tensión, por solapamiento y por acople galvánico. En algunos metales, a medida que la corrosión avanza se puede formar una capa de productos de corrosión en la superficie del metal, a lo que se denomina pasivado, que puede limitar el flujo de iones metálicos a la solución y disminuir la velocidad de la corrosión. En este caso puede tener lugar corrosión localizada resultante de la destrucción de la capa pasiva.

Además, también es posible la corrosión del metal asociada a la acción de organismos vivos, a la que se denomina corrosión bacteriana. Los factores que determinan la presencia de estos organismos vivos, y su estudio en análogos naturales se describen en el apartado 16 de este anexo.

Aunque se ha obtenido abundante información sobre velocidades de corrosión a partir de experimentos de laboratorio, sus resultados son difícilmente extrapolables a periodos de tiempo tan largos como los que es necesario considerar en un sistema de AGP. En estos experimentos se supone una dependencia más o menos lineal de la velocidad de corrosión respecto del tiempo, dependencia que deja de ser lineal cuando se produce una capa pasiva sobre la superficie del metal.

El estudio del proceso de corrosión en análogos arqueológicos metálicos (*Cañón de Kronan, Sarcófago de Tournai, análogos arqueológicos españoles, etc.*) proporciona una forma de cuantificar, en la medida de lo posible, el comportamiento de un material frente a la corrosión en la escala de los cientos a los miles de años. Estimando la velocidad de corrosión del material que constituye el artefacto arqueológico, puede obtenerse un valor aproximado de la vida útil de un contenedor de material similar. Las observaciones en los análogos arqueológicos evidencian también la capacidad de algunos de los productos de corrosión del contenedor para retardar la migración de radionucleidos en el campo próximo, lo que resulta de gran relevancia para el análisis de la seguridad de los sistemas de AGP.

5. DISOLUCIÓN - PRECIPITACIÓN DE IMPUREZAS EN LA BENTONITA

Los procesos de disolución-precipitación de los componentes accesorios presentes en la bentonita, junto con los procesos de intercambio catiónico que se producen durante la interacción agua subterránea-bentonita, son de especial relevancia en el análisis de seguridad de los sistemas de AGP, ya que se consideran los principales controladores de la evolución geoquímica de las aguas en la barre-

ra bentonítica y, por ende, de los límites de solubilidad de los radionucleidos. Además, los procesos de disolución-precipitación de ciertos componentes accesorios de la bentonita, como sulfuros y carbonatos ferrosos, tienen un papel importante en su comportamiento como barrera. Por ejemplo, la presencia de ciertas proporciones de pirita o siderita en las bentonitas favorecen el mantenimiento de un ambiente reductor en esta barrera.

La incidencia de los procesos de disolución de la pirita en el mantenimiento de unas condiciones reductoras en la bentonita ha sido repetidamente contrastada, tanto en laboratorio como en simulaciones teóricas de los procesos de interacción agua-bentonita. Estos procesos han sido considerados implícitamente en muchos ejercicios de evaluación de la seguridad, aunque su importancia haya sido menos referenciada de forma explícita, quizás porque en los cálculos de las condiciones geoquímicas del campo próximo se integran, además, los efectos de corrosión anóxica de los contenedores, mucho más efectivos como tamponadores de las condiciones redox.

En este sentido, el efecto de los sulfuros y carbonatos ferrosos dispersos en el halo arcilloso de *Cigar Lake*, manteniendo un ambiente reductor y estabilizador del depósito de uranio, constituye una clara analogía del proceso y una verificación cualitativa de las extrapolaciones realizadas, mediante simulaciones matemáticas, sobre sus efectos a largo plazo para el escenario normal o de referencia.

Los procesos de disolución-precipitación inducidos por un gradiente térmico serán comentados en el apartado siguiente en relación con los procesos de cementación.

6. PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE LA BENTONITA: CEMENTACIÓN, ILLITIZACIÓN

La bentonita empleada como material de relleno y sellado de un sistema de AGP sufrirá procesos químicos que pueden causar cambios en la capacidad del material para cumplir sus funciones como barrera, especialmente durante el pulso térmico. Así, el gradiente térmico inducido en la barrera bentonítica por los contenedores provoca variaciones en la solubilidad de las fases minerales y en las velocidades de reacción, favoreciendo los procesos disolución, alteración o transformación de determinados constituyentes de la bentonita en unos puntos y los de precipitación en otros. En función de la intensidad de este tipo de procesos, las propiedades reológicas de la bentonita pueden verse afectadas negativamente (aumentando su fragilidad, reduciendo su capacidad de hinchamiento, etc.) y disminuyendo, por tanto, sus propiedades como barrera.

Los principales procesos de importancia a largo plazo para la degradación de la bentonita son los procesos de disolución-precipitación (cementación) produci-

dos como consecuencia de la interacción agua-bentonita y la transformación de esmectita a illita (illitización).

Los procesos de *cementación*, los definimos como los procesos de precipitación química de fases minerales que se producen a partir de las aguas intersticiales de la bentonita en los poros o huecos de este material, son el resultado de la actuación acoplada de procesos termohidroquímicos. Estos procesos y sus efectos en las propiedades mecánicas de la bentonita han sido estudiados mediante experimentos de laboratorio, cuyos resultados indican que serían de escasa entidad y que se encontrarían fundamentalmente controlados por los procesos que afectan a la mineralogía accesoria presente la bentonita. No obstante, estos resultados presentan las limitaciones propias de la escala de trabajo de los experimentos de laboratorio y las dificultades de la extrapolación a escalas temporales mucho mayores.

Esta circunstancia podría ser solventada a partir de los estudios relacionados con procesos de cementación silícea realizados en análogos naturales de naturaleza bentonítica, como *Busachi* (Cerdeña) y *Kinneulle* (Suecia). Las observaciones en estos análogos, al margen de imprecisiones conceptuales o interpretaciones alternativas sobre los mecanismos involucrados, indican que, la intensidad de los procesos de cementación silícea no parece ser lo suficientemente importante como para constituir un problema relevante para la integridad de la barrera, confirmando, de este modo, los resultados de las experiencias de laboratorio y ampliándolos a las escalas de tiempo relevantes en la evaluación de la seguridad. Sin embargo, el número de análogos en los que se ha estudiado el proceso es muy reducido y, en algunos de ellos, las condiciones en las que se ha desarrollado el proceso de cementación silícea pueden no ser adecuadas para su extrapolación a las esperables en un almacenamiento de residuos radiactivos, lo que evidencia la necesidad de analizar el proceso en otros estudios.

La transformación de esmectita a illita o *illitización* constituye un proceso de reemplazamiento mineral (en el que se produce un intercambio de los cationes de cambio de la esmectita por el ion potasio procedente de las soluciones intersticiales) que sucede de forma natural en sistemas geológicos sometidos a temperaturas relativamente elevadas y durante lapsos de tiempo bastante distintos, en procesos como diagénesis por enterramiento, metamorfismo de contacto (intrusiones ígneas) o alteración hidrotermal.

En un sistema de AGP, el proceso de illitización asociada a la etapa de impacto térmico, constituye uno de los principales procesos de degradación de la barrera bentonítica, y es el más probable a elevada temperatura. Este proceso supone una degradación de la capacidad de hinchamiento, permeabilidad y propiedades de intercambio catiónico de la bentonita (ya que estas propiedades son menos favorables para la illita que para la esmectita), y por tanto, puede afectar a los procesos de difusión, sorción y retardo de radionucleidos en el campo próximo.

Entre los procesos geológicos antes mencionados, los diagenéticos y los asociados a intrusiones son los que se han considerado análogos del proceso de illitización en un almacenamiento de residuos. Los ambientes de metamorfismo regional no son adecuados para su utilización como análogos ya que las temperaturas y la duración del periodo de calentamiento de los materiales son mucho más extremos que los esperables en un almacenamiento de residuos. Tampoco son muy adecuados como análogos los sistemas hidrotermales en los que el proceso de illitización se produce bajo condiciones de contorno (temperatura, relación agua-roca, etc.) muy variables y no fácilmente determinables (*Miller et al., 2000*).

El número de análogos naturales estudiados que pueden suministrar información sobre este proceso es considerable: *Kinneulle, Hamra, Busachi, Burgsvik, Forsmark, Ignaberga, Murakami, Orciático, Skie Isle y Col de Perthus*. Además, en Cigar Lake, el hecho de que el halo arcilloso que rodea al yacimiento de uranio esté constituido fundamentalmente por illita (formada coetaneamente al yacimiento) equivaldría a considerar una situación en la que la barrera bentonítica hubiera sufrido un proceso de degradación casi total, por lo que supone una oportunidad única de delimitar el comportamiento de un material illítico como barrera. Los resultados obtenidos de los estudios de análogos junto con los de experimentos de laboratorio sobre distintos tipos de bentonitas, sugieren que el proceso de illitización de la barrera bentonítica requeriría escalas de tiempo superiores a las consideradas en el ámbito de la evaluación de la seguridad.

El estudio del proceso de illitización en análogos y sistemas naturales ha proporcionado datos cuantitativos sobre la intensidad o los rangos de tiempo necesarios para que se produzca el proceso en muy diversas condiciones y ha permitido verificar los modelos cinéticos simples planteados para su descripción, que han sido calibrados utilizando datos de sistemas naturales (*Hamra, Kinneulle, Burgsvik*). A la vez, ha evidenciado las incertidumbres existentes en su modelización mediante herramientas más sofisticadas como los códigos de transporte reactivo y también el potencial uso de los análogos para la verificación de este tipo de herramientas.

7. ESPECIACIÓN-SOLUBILIDAD: CÁLCULO DE LOS LÍMITES DE SOLUBILIDAD

Las propiedades de especiación-solubilidad de los radionucleidos son propias de cada elemento y dependen, además, de las características químicas que adquiere el agua subterránea presente en la geosfera tras su interacción con las distintas barreras del campo próximo. Estas características son función, por tanto, del comportamiento geoquímico del campo próximo (bentonita, contenedor y residuo) bajo distintas condiciones (temperatura, pH, etc.) en función de la propia evolución del sistema o del escenario considerado.

El cálculo de los límites de solubilidad de los radionucleidos consiste en determinar las fases sólidas controladoras de la concentración de dichos elementos en una fase fluida de características definidas. Para ello es preciso definir las características de la solución considerada, calcular el esquema de especiación correspondiente a cada elemento en esa solución, obtener la fase sólida limitante que más probablemente controle la concentración de cada elemento en la solución, y calcular la concentración del elemento en equilibrio con dicha fase, que será su límite de solubilidad. Estos cálculos implican el uso de modelos geoquímicos y bases de datos termodinámicas asociadas. La especiación, por su parte, además de tener una importancia fundamental en la solubilidad, condiciona las propiedades de transporte de los radionucleidos en la bentonita y la roca encajante.

El cálculo de los límites de solubilidad es uno de los puntos clave en los ejercicios de evaluación de la seguridad de los sistemas de AGP, ya que determina la concentración específica que cada radionucleido presentará en su transporte desde el residuo hasta la biosfera. En la mayoría de los ejercicios de evaluación, estos cálculos se encuentra asociado al campo próximo, como fuente de radionucleidos hacia la geosfera. La estimación de límites de solubilidad adicionales para la evolución del transporte de estos radionucleidos en la geosfera suele obviarse de forma conservadora, aunque en algunos ejercicios también se definen límites para esta parte del sistema de almacenamiento.

La comprobación y aumento de la confianza en los modelos geoquímicos conceptuales, las bases de datos termodinámicas asociadas y los códigos numéricos necesarios para describir la migración de radionucleidos en las condiciones de un repositorio, son los aspectos que se abordan desde los análogos para servir de apoyo a la evaluación de la seguridad.

Se han realizado ejercicios de “predicción ciega”(BPM)¹⁹ en numerosos análogos naturales (Oman, Poços de Caldas, Cigar Lake, Maqarin, El Berrocal, Oklo y Palmottu), diseñados para comparar los resultados obtenidos con diferentes códigos geoquímicos, bases de datos termodinámicas y aproximaciones de modelización, por diferentes grupos de trabajo, en la predicción del comportamiento esperable de elementos traza en ambientes naturales. Las principales aportaciones de estos ejercicios de BPM en los análogos son las siguientes: (a) la identificación de los sólidos y/o procesos que controlan su solubilidad; (b) la cuantificación de las concentraciones acuosas de los radionucleidos bajo las diferentes condiciones geoquímicas que pueden tener lugar en los ambientes de campo próximo y lejano; y (c) el tratamiento adecuado para su modelización, donde la información derivada de los ejercicios de BPM es extremadamente relevante.

¹⁹ BPM: Blind Predictive Modelling exercises

8. DEGRADACIÓN DEL CEMENTO: GENERACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA PLUMA HIPERALCALINA

El cemento y hormigón empleados como barrera en los sistemas de almacenamiento de residuos radiactivos se irán degradando a lo largo del tiempo en un proceso que tendrá lugar en diferentes etapas (Lagerblad y Trägårdh, 1995) en función de las características del medio, fundamentalmente de la composición del agua subterránea y del material encajante. Esta sucesivas etapas, irán condicionando el desarrollo y evolución de la pluma hiperalcalina y su efecto sobre el campo próximo. Cualquier variación local del pH debida a la degradación del cemento tendrá implicaciones en la solubilidad de los radionucleidos, en la velocidad de corrosión del metal, en la degradación de la bentonita y en la alteración de la roca encajante en último término.

El planteamiento conceptual de la degradación del cemento comprende un primer periodo, durante el cual el hormigón se alterará como resultado del contacto con los gases atmosféricos, especialmente el dióxido de carbono. Posteriormente, la degradación estará gobernada, fundamentalmente, por el proceso de interacción entre el hormigón y el agua subterránea, que modificará la composición de ambos componentes. Se creará una aureola de fluidos con un pH elevado (entre 10 y 13) alrededor del hormigón que interaccionarán con los materiales en contacto, afectando fundamentalmente a la bentonita y también a la roca encajante. Además el desarrollo de la pluma hiperalcalina está directamente relacionado con otros procesos como son la retención de radionucleidos en las fases secundarias, bien por mecanismos de sorción o bien por coprecipitación (ver apartado 14), y la generación de coloides de sílice en los frentes de avance de la pluma (ver apartado 16).

El estudio de cementos de edificios arqueológicos como la *conducción de Acquarosa* (Italia) y la *muralla de Adriano* (Inglaterra), de construcciones industriales antiguas, o de sistemas naturales como *Oman* y *Maqarin* (Jordania), análogos de los ambientes hiperalcalinos que se pueden generar en el campo próximo de un repositorio con importantes cantidades de cemento, teniendo en cuenta sus limitaciones, pueden proporcionar una información valiosa sobre el proceso de degradación de esta barrera a lo largo del tiempo y permitir considerar la influencia del proceso de generación y evolución de la pluma hiperalcalina en el comportamiento final del repositorio.

En los sistemas naturales análogos antes citados se han estudiado las aguas hiperalcalinas y su efecto sobre los procesos de transporte de radionucleidos, realizándose ejercicios de “predicción ciega” (BMP) para la comprobación de los códigos y metodologías de modelización de las condiciones de equilibrio en un sistema de interacción agua subterránea-roca hiperalcalina. Maqarin es el análogo más adecuado para el estudio de la evolución de la pluma hiperalcalina y de

su interacción con el material encajante, puesto que la alcalinidad de sus aguas es el producto del lixiviado de minerales de cemento naturales, y ha ayudado en la modelización conceptual del desarrollo de la pluma hiperalcalina.

9. FLUJO DE FLUIDOS

El flujo de aguas subterráneas en la formación geológica que alberga un sistema de almacenamiento de residuos radiactivos es un proceso muy importante en el caso de medios fracturados como el granito. En estas formaciones, las fracturas, inmersas en una matriz de muy baja permeabilidad, pueden actuar como vías preferentes en las que se concentra el flujo del agua subterránea. Las características de este flujo dependen principalmente de la geometría y disposición del sistema de fracturas.

En un sistema de AGP el flujo de agua afecta al transporte y dispersión de los radionucleidos, al retardo de los mismos, ya que determina la cantidad de superficie disponible para difusión en la matriz y para sorción, así como a las tensiones litológicas, a la temperatura y al flujo y transporte de gas en la roca.

El flujo puede ser alterado localmente y/o globalmente por cambios en las barreras de ingeniería o en la roca, variaciones en la recarga/descarga (clima, topografía, cambios del nivel del mar), generación y flujo de gas, gradientes de salinidad, variaciones en la temperatura que afectan a la densidad y viscosidad del agua, etc. (SITE-94).

Existe un elevado grado de conocimiento sobre el flujo de fluidos a través de formaciones geológicas, fruto del considerable desarrollo de la hidrogeología alcanzado en las últimas décadas. La información más relevante sobre los procesos de flujo en la geosfera se obtienen fundamentalmente a partir de estudios en emplazamientos y en laboratorios subterráneos. Sin embargo, el estudio de la hidrogeología en formaciones geológicas similares a las propuestas para un AGP (análogos), a pesar de las incertidumbres existentes en las condiciones de contorno hidrológicas, también puede aportar información y ayudar a corroborar las predicciones sobre aspectos importantes del flujo de aguas subterráneas, como por ejemplo los tiempos de tránsito del agua desde el almacenamiento hasta la biosfera.

Los estudios hidrogeológicos en análogos naturales (*Oklo*, *Cigar Lake*, *Palmottu*, *El Berrocal*, *Poços de Caldas*) han contribuido al desarrollo y comprobación de modelos conceptuales y códigos numéricos de flujo de aguas subterráneas, así como al desarrollo y prueba de técnicas novedosas de campo para la caracterización hidrogeológica. Además, muchos de los estudios hidrogeológicos realizados en otros ámbitos fuera del puramente nuclear son también válidos como análo-

gos. En este sentido cabe destacar las aportaciones realizadas por el campo de la paleohidrogeología.

10. ADVECCIÓN Y DISPERSIÓN

El proceso de transporte por advección hace referencia a que cualquier sustancia disuelta en un fluido sufrirá un transporte debido al movimiento de dicho fluido. La dispersión hidrodinámica consiste en el transporte de masa existente, de forma natural, desde las zonas de mayor concentración a las de menor concentración de soluto como resultado tanto de la difusión molecular como de la dispersión mecánica.

En la barrera geológica (campo lejano) de un sistema de almacenamiento de residuos radiactivos, en el caso de formaciones fracturadas, el flujo de agua circula preferentemente por las fracturas y el transporte en la geosfera de los radionucleidos disueltos en las aguas subterráneas está controlado fundamentalmente por los fenómenos de advección y dispersión.

Los procesos de transporte por advección y dispersión son procesos clásicos muy estudiados en hidrogeología, que también pueden investigarse en sistemas naturales, dada la analogía con los procesos que cabe esperar en un sistema de AGP. El estudio de estos procesos en análogos naturales, entre los que cabe destacar *Oklo* (Gabón), *Palmottu* (Finlandia), *el Berrocal* (España) y *Maqarin* (Jordania), han proporcionado abundante información sobre los parámetros involucrados en el transporte advectivo-dispersivo de solutos y han permitido el desarrollo de modelos conceptuales de dicho transporte.

11. DIFUSIÓN MOLECULAR

La difusión en agua se define como el proceso por el cual la materia es transportada de unas regiones del sistema a otras como resultado de la agitación molecular. El flujo difusivo (cantidad de masa que se difunde a través de una superficie unitaria por unidad de tiempo) es proporcional al gradiente de su concentración.

La difusión molecular de especies químicas a través de las aguas intersticiales que rellenan el espacio poroso de un medio geológico se encuentra limitada por la presencia de las fases sólidas y por las trayectorias irregulares de los poros. Por ello, la difusión en medios porosos es menor que en agua pura. La magnitud de la difusión molecular en un medio geológico depende de: la porosidad, la distribución del tamaño de los poros y la tortuosidad de las vías. La importancia de dicho proceso se cuantifica mediante el parámetro denomi-

nado coeficiente de difusión efectivo, que es una propiedad de la totalidad del sistema: el medio poroso, el agua de los poros y la especie que se difunde.

En un sistema de almacenamiento de residuos radiactivos, la difusión molecular constituye el principal mecanismo de transporte en la barrera bentonítica, y en el caso de formaciones arcillosas, también en la geosfera. En el caso de medios fracturados, la difusión molecular en la barrera geológica es importante, fundamentalmente, en la matriz rocosa (zona de roca débilmente o muy poco fracturada) y se conoce como difusión en la matriz.

11.1 Difusión en medios arcillosos: bentonita y geosfera arcillosa

Como ya se ha indicado, en medios de muy baja permeabilidad (como suelen ser los arcillosos), la difusión molecular se convierte en el principal mecanismo de migración de las especies químicas disueltas. Esto es aplicable a los materiales de sellado (bentonita) y a la roca hospedante del AGP, en caso de formaciones arcillosas.

El proceso de difusión molecular a través de la barrera bentonítica se ha estudiado fundamentalmente mediante experimentos de laboratorio e in situ, ya que el control de las condiciones de contorno y la geometría en estos experimentos es mucho mayor que en los análogos naturales y, al margen de la duración temporal del proceso, la escala espacial de la barrera de ingeniería sí se puede ensayar en laboratorio. Por ello, la aportación de los análogos en cuanto al proceso de difusión en la bentonita es más limitada, aunque se ha estudiado con cierto detalle en el análogo de Cigar Lake.

La difusión molecular en *formaciones arcillosas* se ha estudiado básicamente en condiciones de laboratorio, aunque se ha analizado también en varios análogos entre los que cabe destacar *Koongarra* (Australia), *Dunarobba* (Italia) y *Loch Lomond* (Reino Unido). Este último ha aportado datos cuantitativos para la difusión de algunas especies de interés, evidenciándose que los coeficientes de difusión obtenidos en ensayos de laboratorio son siempre mayores que los de análogos naturales, y por tanto, conservadores desde el punto de vista de la evaluación de la seguridad.

11.2 Difusión en la matriz rocosa

En las formaciones geológicas fracturadas y de baja permeabilidad, la permeabilidad de las fracturas es órdenes de magnitud mayor que la de la matriz rocosa, dando lugar a lo que se conoce como sistemas de doble porosidad. La difusión de solutos en la matriz rocosa que bordea a las fracturas ocurre principalmente en un sistema de poros y microfracturas conectados y puede ser significativa, justificando la necesidad de considerar modelos de doble porosidad para simular el transporte en estos medios.

En un sistema de almacenamiento de residuos radiactivos en una formación fracturada, como el granito, el principal efecto de la difusión en la matriz consiste en que actúa como un sumidero de radionucleidos, provocando tanto una disminución en las actividades máximas como un retardo en el avance de los radionucleidos hacia la biosfera.

Existen muchos sistemas naturales en los que se puede estudiar el proceso de difusión en la matriz: 1) sistemas con removilización (transporte) de uranio natural desde el agua intersticial de la matriz rocosa hacia las fracturas transmisivas cercanas; 2) rocas lindantes con fracturas en las que el agua subterránea cambia de fuerza iónica; y 3) sistemas con frentes redox que se difunden desde las fracturas hacia el interior de la matriz rocosa, como resultado de las interacciones entre el oxígeno disuelto y las superficies de las fracturas por donde circula agua oxidante poco mineralizada. En estos sistemas se puede estudiar la redistribución de los elementos naturales de interés en la roca adyacente a fracturas conductivas, o la difusión de radionucleidos en rocas no fracturadas alrededor de yacimientos de uranio, producidos a escalas de tiempo comparables a las relevantes en la evolución de un sistema de almacenamiento.

La difusión en la matriz es uno de los procesos tratados más extensamente en los estudios de análogos naturales (Palmottu, Poços de Caldas, El Berrocal, East Bull Lake -Canadá-) y por tanto uno de los procesos que más se ha contrastado a partir de los mismos. Sin embargo, se trata de un proceso difícil de medir y de cuantificar. El estudio de este tipo de análogos permite avanzar en el conocimiento de los factores que regulan este proceso, como son el volumen de la porosidad interconectada, la importancia de los límites de grano, las microfracturas y la mineralogía de la matriz; obtener rangos de valores de difusividad aparente (que incorporan los efectos de varios procesos: difusión, sorción-desorción y retroceso alfa) y sus incertidumbres; conocer la importancia relativa de la difusión en la matriz frente a otros mecanismos de retardo; y comprobar modelos del proceso.

En cuanto a los datos cuantitativos sobre la difusión en la matriz obtenidos a partir de análogos naturales, en estos sistemas, de manera generalizada, se habla de la profundidad de penetración, haciendo referencia al espesor de roca adyacente afectada por dicho proceso. Sin embargo, este concepto no es un parámetro de ningún proceso, sino el resultado de la difusión en la matriz y la sorción en un determinado sistema, que depende de una serie de factores: el tiempo, las propiedades físico-químicas de la especie química o radionucleido que se difunde, las características químicas del agua intersticial y la temperatura. Por ello, *Miller et al. (1994)* sugieren que los valores que se proponen en cuanto a la profundidad de penetración deben ser tomados con precaución.

12. PROCESOS DE INTERACCIÓN AGUA-ROCA

Por procesos de interacción agua-roca en la geosfera de un emplazamiento de residuos radiactivos, nos referiremos al conjunto de procesos que condicionan, por un lado, las características y evolución de las aguas que van a entrar en contacto con las distintas barreras del sistema y, por otro, la evolución de ciertas características mineralógicas del medio sólido debida a la interacción con las aguas subterráneas y de interés en la retención de radionucleidos.

Aunque dentro de los dos procesos genéricos anteriores se pueden incluir, en realidad, muchos de los otros procesos de interacción agua-sólido tratados individualmente (especiación-solubilidad, precipitación-coprecipitación-disolución, intercambio iónico, sorción, difusión en la matriz, coloides, etc.), su tratamiento conjunto responde a que son los formalmente considerados en los ejercicios de evaluación de la seguridad al referirse a procesos geoquímicos en la geosfera. Estos procesos van a delimitar tanto el comportamiento de los materiales de las barreras de ingeniería como el transporte de radionucleidos a través de la geosfera.

Las observaciones de los procesos de interacción agua-roca en el sistema hidrogeoquímico de los análogos naturales, al ser equivalentes a los estudios necesarios para la caracterización geoquímica del emplazamiento del un almacenamiento de residuos pueden incorporarse a los mismos y completarlos. Ello exige, evidentemente, que, en la fase del programa para el desarrollo del AGP, se cuente con emplazamientos candidatos para albergar el almacenamiento y que exista una importante similitud de caracteres entre el análogo y la geosfera elegida.

Los estudios en análogos naturales han contribuido al desarrollo y comprobación de modelos conceptuales para los procesos de disolución-precipitación de fases minerales secundarias, evidenciado la importancia de estos procesos en el mantenimiento de la estabilidad hidrogeoquímica en medios fracturados (*Cigar Lake*, *Poços de Caldas*) y su trascendencia en la retención de los radionucleidos transportados por el agua (*Palmottu*, *El Berrocal*). Además, la aplicación en los análogos de metodologías de modelización geoquímica, con el uso de un amplio número de códigos, y la realización de ejercicios de “predicción ciega”, permiten comprobar la aplicabilidad de códigos geoquímicos o de flujo y transporte reactivo y de bases de datos termodinámicas, contribuyendo a aumentar la confianza en los mismos.

13. PROCESOS DE RETARDO: SORCIÓN Y PRECIPITACIÓN/ COPRECIPITACIÓN

El retardo es una medida de la retención que sufre una especie química reactiva en disolución en un sistema dinámico debido a su interacción con la fase sólido-

da (por ejemplo por sorción o precipitación). Se puede expresar mediante el coeficiente de distribución, K_d , que relaciona la concentración del radionucleido en la fase sólida, C_s , y en la fase líquida, C_l .

En un sistema de almacenamiento de residuos, la mayoría de los radionucleidos liberados desde el residuo²⁰ en solución en las aguas subterráneas interactuarán con los materiales del sistema de almacenamiento y con las superficies de la roca por las que pasa el agua, o estarán sujetos a cambios en el comportamiento de la solución, debidos a las modificaciones provocadas por la interacción agua-roca a lo largo de la vía de flujo. Estos procesos pueden retardar su movimiento en relación con el del agua, no sólo ralentizando el progreso a través del sistema, sino también reduciendo su concentración en solución llegando a situaciones de equilibrio o incluso propiciando su eliminación de la solución por incorporación en fases sólidas. Estos procesos de retardo son, por tanto, favorables para la seguridad del sistema de almacenamiento.

Algunos de los mecanismos de retardo identificados en los sistemas naturales:

- mecanismos de retardo químico: sorción (adsorción e intercambio iónico), precipitación y coprecipitación
- mecanismos de retardo fisicoquímicos: difusión en la porosidad secundaria de la matriz rocosa, filtración molecular y exclusión iónica.

La *sorción* es un proceso de fijación de especies químicas disueltas a las superficies cargadas eléctricamente de los minerales, que engloba de forma genérica a la adsorción y al intercambio iónico, y que tienen lugar para contrarrestar defectos de carga que se producen en los sólidos.

La *precipitación* y *coprecipitación* son procesos de fijación o inmovilización estructural de solutos en un mineral nuevo, que suelen considerarse como procesos irreversibles. La precipitación consiste en la colocación de un elemento en una posición regular de los iones de ese elemento en una fase sólida simple. En el caso de la coprecipitación el nuevo mineral es una fase sólida mixta, en el que el elemento traza se sitúa en una posición atómica que normalmente estaría ocupada por un ion de un elemento diferente.

El mecanismo considerado dominante en el retardo y retención de solutos ha sido el de sorción. Sin embargo, es muy complicado distinguir entre los diferentes procesos que provocan el retardo de los radionucleidos: sorción, precipitación-coprecipitación, difusión en la matriz. Esto conlleva que en ocasiones no se pueda asignar con certeza un determinado efecto a un único proceso.

El estudio del entorno de yacimientos de uranio, ayuda a conocer los factores que influyen sobre estos procesos de retardo de los radionucleidos movilizados (o de, por ejemplo, REE, análogos químicos de algunos actíni-

²⁰ Exceptuando elementos como el tritio, ^{37}Cl y ^{129}I , que no son retenidos por ningún proceso en su migración hacia la biosfera.

dos) en los distintos tipos de sustratos minerales presentes en cualquier geosfera, arcillosa o granítica, y para un amplio rango de las condiciones de la solución (pH, fuerza iónica, concentración de carbonato...), así como a derivar modelos predictivos que describan adecuadamente el retardo de tales radionucleidos en dichas condiciones. En algunos casos incluso se han podido determinar valores de coeficientes de distribución in situ, y aunque estos resultados dependen totalmente del sitio analizado, pueden dar idea de los rangos paramétricos y de los órdenes de magnitud, con sus incertidumbres asociadas.

El proceso de *sorción en la bentonita* no se ha considerado con profundidad en los análogos naturales, aunque si se ha estudiado la *sorción en formaciones arcillosas (Loch Lomond)* y la *sorción en los materiales de relleno de fracturas graníticas (Palmottu, El Berrocal)*, que son los responsables de los procesos de retardo y sorción en medios fracturados.

La ausencia de datos fiables sobre los procesos de inmovilización de soluto por *precipitación-coprecipitación* no ha permitido su uso en los cálculos de evaluación de la seguridad. Los estudios de análogos (*Oklo, El Berrocal, Palmottu, Koongarra, Poços de Caldas, Tono Mine, Needle's Eye, Broubster y Maqarin*) han aportado evidencias que apoyan el modelo conceptual del proceso en los tres subsistemas para los que se plantea su potencialidad dentro de la evolución esperable de un AGP (los productos de corrosión del contenedor, los productos de degradación del cemento y los minerales de relleno de fracturas en la geosfera). Además el estudio de análogos ha proporcionado información válida acerca de las fases más factibles de ejercer un control fundamental sobre el comportamiento en solución de los radionucleidos y ha permitido probar diferentes modelos y códigos de cálculo para el tratamiento y la modelización cuantitativa de este proceso.

14. ESTADO REDOX Y FRENTES REDOX

El *estado redox* de un sistema acuoso se encuentra definido por las concentraciones de todas las especies oxidadas y reducidas presentes. La caracterización del estado redox de un sistema hidrogeoquímico natural constituye una tarea metodológica y paramétrica intensiva debido a los múltiples procesos que lo condicionan y a los particulares problemas que presenta la determinación de algunos datos fundamentales como el Eh.

Los *frentes redox* se crean en el límite entre dos sistemas que interactúan con diferentes ambientes de oxidación. Existe una estrecha relación entre el estado redox de un sistema y la propagación de frentes redox en el mismo.

En un sistema de AGP, pueden producirse frentes redox en el campo próximo y en la geosfera por diferentes causas y en diferentes momentos de su evolución. Las principales causas del desarrollo de estos frentes redox son: 1) la radiólisis del agua subterránea en las inmediaciones del contenedor, que provoca la aparición de condiciones oxidantes cerca del contenedor y el cambio a condiciones reductoras al alejarse de este; 2) la introducción de aire y de aguas oxidantes durante la excavación, construcción y antes de la clausura del almacenamiento, que provocará la oxidación de las superficies rocosas expuestas; 3) la llegada de aguas de recarga oxidantes, que al infiltrarse dan lugar a una modificación drástica del ambiente reductor del almacenamiento y crean un frente en la interfase con las aguas profundas y reductoras. Entre estas causas, la más significativa es la radiólisis del agua subterránea.

El alcance del movimiento del frente redox está controlado por el balance entre la producción de agentes oxidantes por cualquiera de los procesos anteriores y su consumo por los materiales ricos en hierro de las barreras de ingeniería (contenedor de acero, material de relleno como bentonita) y de la barrera geológica. El interés en el conocimiento del desarrollo y propagación de los frentes redox radica en que la solubilidad y especiación de muchos radionucleidos (U, Np, Pu, Tc, etc.) está fuertemente influenciada por el estado redox del sistema. Por tanto, su potencial migración o retardo cambia radicalmente al atravesar un frente redox.

Los trabajos realizados en análogos naturales (*Palmottu, Oklo*) para la caracterización de los procesos redox, que se ha abordado como parte integrante del estudio de los procesos de interacción agua-roca, han contribuido al refinamiento y mejora de las metodologías disponibles para la determinación in situ del potencial redox en aguas subterráneas y han aportado información sobre distintos modelos conceptuales relacionados con la caracterización y evolución del estado redox en sistemas naturales.

El estudio de los frentes redox en sistemas naturales como los yacimientos de uranio (*Poços de Caldas, Oklo, Cigar Lake*) puede ayudar a entender su dinámica bajo distintos escenarios. Los análogos pueden aportar información sobre aspectos como la descripción del conjunto de procesos asociados al desarrollo de frentes redox (cambios mineralógicos y texturales), la identificación de los parámetros que influyen en la evolución y migración de los mismos, los valores de velocidades de propagación de este tipo de frentes, el desarrollo y mejora de modelos conceptuales de evolución de frentes redox tanto en sistemas controlados por advección como por difusión (arcillas), la identificación de las limitaciones o carencias de estos modelos (consideración de la presencia de materia orgánica, etc), la redistribución o migración de elementos de interés en el almacenamiento en un frente redox y las fases que controlan su disolución, etc.

15. GENERACIÓN Y TRANSPORTE DE COLOIDES

Los coloides son partículas sólidas dispersas en las aguas con tamaños comprendidos entre 1 micra y 1 nm. Debido a su pequeño tamaño, estas partículas presentan una superficie específica muy elevada ($10^3 \text{ m}^2/\text{g}$), lo que hace que su comportamiento fisicoquímico esté controlado por reacciones de superficie y posean una elevada capacidad de adsorción de elementos disueltos.

El interés del proceso de generación y transporte de coloides en un sistema de almacenamiento de residuos radiactivos responde a que estas partículas pueden adsorber radionucleidos y constituir un mecanismo adicional de transporte, que, en determinadas condiciones, puede ser más eficiente (rápido) que el de los solutos. Además, los radionucleidos sorbidos a la fase coloidal pueden quedar excluidos de posibles efectos de retardo o de retención. Por otro lado, la sorción de radionucleidos en coloides dentro del campo próximo puede originar gradientes de concentración que promuevan la lixiviación de radionucleidos desde el residuo.

Los procesos de generación coloidal en un sistema de AGP, no son sólo los que ocurren en el medio geológico natural del almacenamiento y dan lugar a los coloides inicialmente presentes en las aguas subterráneas, sino que también existen fuentes adicionales de coloides asociadas a la degradación de las distintas barreras de ingeniería (residuo, contenedor, barrera bentonítica y cemento o materiales de relleno). El transporte coloidal de radionucleidos es un fenómeno complejo, cuyos efectos netos (la proporción de radionucleidos transportados a través de la geosfera que alcanza la biosfera) dependen de un amplio conjunto de procesos físicos y químicos de actuación acoplada, para los que, en muchas ocasiones, todavía existen notables carencias en su conocimiento.

El estudio de coloides se ha abordado en numerosos análogos naturales del tipo yacimientos de uranio (*Oklo*, *Cigar Lake*, *Palmottu*, *Poços de Caldas*, *Koongarra*, *El Berrocal*) y medios hiperalcalinos (*Maqarin*), así como en análogos antropogénicos (zona de pruebas nucleares subterráneas de Nevada). Las principales contribuciones de los análogos naturales a la valoración de la importancia de las poblaciones coloidales en la migración de radionucleidos se centran en la verificación de modelos conceptuales sobre la generación de coloides en las barreras de ingeniería, sobre los tipos, concentraciones y estabilidad de los coloides en la geosfera, sobre sus reacciones con los radionucleidos y el grado de reversibilidad de estas reacciones y sobre la movilidad y transporte de fases coloidales. Además, también han aportado datos cuantitativos sobre algunos de los procesos involucrados en el transporte coloidal de radionucleidos como, por ejemplo, el caso de las correlaciones establecidas entre concentraciones de coloides y distintos factores determinantes de su estabilidad.

Aunque las observaciones realizadas en análogos naturales no están exentas de importantes incertidumbres, dada la complejidad del transporte coloidal, han contribuido a un incremento del grado de conocimiento sobre un buen número de los procesos involucrados, y a la definición de directrices fundamentales de investigación, así como a la verificación y aumento de la confianza de códigos.

16. PROCESOS MICROBIOLÓGICOS

Existen evidencias de la existencia de microorganismos en los sistemas profundos de interacción roca/agua subterránea y, aunque las poblaciones no son tan grandes como las presentes en sistemas próximos a la superficie, sus efectos sobre la química del agua subterránea pueden ser significativos.

En el ambiente de un sistema de AGP, además de los microorganismos que pueden existir en condiciones naturales, otros pueden ser introducidos durante la fase de construcción de la instalación. La viabilidad y posibilidad de subsistencia de estos microorganismos, que pueden actuar como catalizadores de las reacciones redox y la formación de minerales secundarios, dependerá de los campos de radiación que se creen, de la competencia por el agua con la bentonita, y de la disponibilidad de fuentes de energía y nutrientes. En formaciones cristalinas la existencia de estos organismos a grandes profundidades es posible gracias al aporte de hidrógeno como principal fuente de energía y de CO_2 como principal nutriente.

Un gran número de bacterias consumen oxígeno durante el proceso de oxidación de la materia orgánica, por lo que pueden tener un efecto beneficioso durante las fases iniciales del almacenamiento al contribuir a establecer condiciones reductoras en las barreras de ingeniería. Sin embargo, la actividad microbiana, con la producción asociada de complejantes orgánicos, puede incrementar la solubilidad de los radionucleidos en el campo próximo y disminuir su capacidad de sorción, y puede dar lugar a la formación de gases y sulfuros en las barreras de ingeniería, reduciendo de este modo la efectividad de dichas barreras. Además, los microorganismos constituyen partículas móviles que pueden tener una alta capacidad de sorción de radionucleidos de forma posiblemente selectiva e irreversible, favoreciendo el transporte de los radionucleidos hasta la biosfera.

El estudio de las poblaciones microbianas y la importancia de los procesos microbiológicos presentes en distintos tipos de ambientes geológicos, se ha abordado en la mayoría de los análogos naturales más relevantes, principalmente en yacimientos de uranio (*Palmottu*, *Poços de Caldas*, *El Berrocal*) y en medios hiperalcalinos (*Oman*, *Maqarin*). Los estudios se han enfocado hacia tres aspectos fundamentales: 1) los tipos de microorganismos y sus efectos sobre las condiciones

hidrogeoquímicas y de migración de radionucleidos; 2) la tolerancia de los microorganismos a las condiciones extremas de radiación, temperatura y alcalinidad que prevalecerán en el campo próximo del sistema de almacenamiento; y 3) la disponibilidad de nutrientes y fuentes de energía para los microorganismos.

17. PROCESOS ACOPLADOS

En la cuantificación de la liberación de radionucleidos a la biosfera procedentes de un AGP intervienen:

1. Procesos de naturaleza térmica (T) asociados a las variaciones de temperatura. Estas variaciones de temperatura pueden ser de origen natural (gradiente geotérmico) o bien inducidas por el calor generado por los residuos en las fases iniciales del almacenamiento.
2. Procesos de naturaleza mecánica (M) relacionados con las propiedades y comportamiento mecánico de las barreras de ingeniería y la barrera geológica.
3. Procesos hidrodinámicos (H) asociados al flujo de fluidos (gases y agua).
4. Procesos de transporte de masa (Tr) o de transferencia de solutos y radionucleidos a través de las fases fluidas.
5. Procesos geoquímicos (G) que determinan la evolución geoquímica de las aguas intersticiales de la barrera de ingeniería y la barrera geológica, las cuales en definitiva condicionan la movilidad o la retención de los radionucleidos.
6. Procesos radiológicos (R) asociados a la radiación emitida por los radionucleidos que pueden afectar a las propiedades del fluido (radiólisis) y a la generación de calor.

Del análisis de la evolución de un AGP se deduce que los procesos térmicos (T), mecánicos (M), hidrodinámicos (H), de transporte de solutos (Tr), geoquímicos (G) y radiológicos (R) están ligados entre sí y por ello deben analizarse de forma acoplada. Originalmente, en termodinámica se acuñó el término “procesos acoplados” para hacer referencia al acoplamiento existente entre procesos de diferente naturaleza.

El estudio de los procesos acoplados y de transporte reactivo ha experimentado un considerable desarrollo en los últimos años, en parte como consecuencia de trabajos de I+D realizados dentro de proyectos de análogos naturales y, fundamentalmente, dentro de las actividades de I+D asociadas al desarrollo de un AGP.

El campo en el que se ha alcanzado un mayor grado de desarrollo en procesos acoplados es el relativo al acoplamiento de los procesos hidrodinámicos (flujo de agua), los de transporte de solutos y los geoquímicos, en lo que se conoce tam-

bién con el nombre de modelos de transporte reactivo. Uno de los ejemplos más ilustrativos de la naturaleza acoplada de los procesos hidrodinámicos y geoquímicos es el de la migración de frente redox. Por otro lado, los procesos de interacción entre las aguas subterráneas y el cemento provoca plumas hiperalcalinas (con valores muy elevados de pH) cuyo análisis requiere considerar modelos acoplados de transporte reactivo. En algunos estudios de análogos como *Oklo*, *Maqarin* y *Poços de Caldas* se han realizado modelos de transporte reactivo que han permitido : 1) desarrollar y verificar nuevos códigos de transporte reactivo; 2) estudiar la génesis y comportamiento de frentes redox y 3) contrastar diferentes modelos conceptuales de flujo y geoquímicos.

Anexo C: Glosario de Términos

Absorción	Proceso de sorción en la interfase sólido-líquido que tiene lugar dentro de los poros del sólido. La capacidad de absorción del sólido es proporcional a su volumen. (Ver sorción).
Acondicionamiento e inmovilización	Tratamiento especial para preparar un residuo radiactivo, introducirlo en contenedores y estabilizarlo para su almacenamiento
Activación	Mecanismo por el cual un átomo que no es radiactivo se convierte en otro que lo es al someterse a un proceso de irradiación con neutrones o partículas cargadas. Los rayos gamma sólo producen activación cuando son de alta energía, por lo que, habitualmente, las sustancias que se someten a la radiación gamma no se vuelven radiactivas.
Actínidos	Grupo de elementos químicos de la serie de catorce, de número atómico comprendido entre el 90 (Torio) y el 103 (Laurencio): Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr. Constituyen una serie de transición interna, similar a la de los lantánidos, en los que se ocupan con catorce electrones los siete orbitales 5f.
Actividad	Cantidad de un nucleido radiactivo en un particular estado energético en un momento dado, que se puede expresar por el cociente dN/dt . Es por tanto una magnitud física que mide el número de transformaciones espontáneas ' dN ' (ver radiactividad) ocurridas en una sustancia por unidad de tiempo ' dt '. La unidad es el Becquerel (Bq). En la práctica se usa el Curio (Ci) $1\text{Ci}=3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$. Suele hablarse de residuos de baja, media o alta actividad de forma abreviada cuando se hace referencia a la actividad específica de dichos residuos. En el contexto de una solución acuosa, la actividad de una especie disuelta corresponde a una concentración efectiva expresada como el producto de su concentración por el coeficiente de actividad.
Actividad Específica	Actividad específica de un material radiactivo es el número de desintegraciones nucleares por unidad de tiempo y por unidad de masa de dicho material. Se expresa en Ci/g o Bq/g. En una cantidad determinada de residuo radiactivo, habrá una actividad específica determinada para cada uno de los elementos radiactivos que contenga
Acuífero	Formación geológica saturada, fisurada o porosa, capaz de almacenar y transmitir cantidades aprovechables de agua ²¹
Adsorción	Proceso de sorción en la interfase sólido-líquido que tiene lugar en la superficie del sólido. La capacidad de adsorción del sólido es proporcional a su superficie específica efectiva. (Ver sorción).
Advección	Movimiento de una sustancia o transferencia de calor por el movimiento del aire o el agua en la cual dicha sustancia esté presente debido a la existencia de un gradiente hidráulico o de temperatura. En los análisis de seguridad de los AGP de residuos

²¹ Glosario Internacional de Hidrología. UNESCO, 1992

	radiactivos se suele utilizar para describir el movimiento de radionucleidos debido al movimiento del agua en el cual se hallan disueltos o suspendidos
Almacenamiento	Última fase de la gestión consistente, en general, en la colocación de los residuos radiactivos en una instalación que proporciona adecuada protección ambiental, térmica, química y física, con inclusión de disposiciones para la vigilancia. En función del período puede ser a corto o a largo plazo y temporal o definitivo. Se habla de almacenamiento definitivo (<i>disposal</i>), cuando no se tiene intención alguna de recuperar los residuos, lo cual no implica que no sea posible. Se habla de almacenamiento temporal (<i>storage</i>) cuando se contempla la posibilidad de su recuperación.
Almacenamiento Geológico	Almacenamiento de combustible gastado y otros residuos radiactivos en una formación geológica que se considera posee la estabilidad y las propiedades requeridas para satisfacer los criterios de seguridad y protección radiológica. Aislamiento de los residuos, mediante un sistema combinado de barreras de ingeniería y naturales, en un medio geológico estable a varios cientos de profundidad. Frecuentemente es la solución seguida para los residuos de larga vida y alta actividad.
Almacenamiento intermedio o temporal del combustible gastado	Almacenamiento en el que se establece el aislamiento, la vigilancia radiológica, la protección ambiental y el control humano, previéndose medidas ulteriores de tratamiento, transporte y evacuación (o en su caso reproceso). Puede ser en seco (contenedores, nichos, bóvedas, etc.) o en húmedo (bajo agua en piscinas), dentro del perímetro del emplazamiento de una central nuclear o fuera del mismo.
Análisis del Comportamiento ("Performance Assessmet")	Análisis cuantitativo de un conjunto de procesos importantes para el comportamiento de una o varias partes o subsistemas del sistema de almacenamiento y cálculo de los parámetros de interés indicadores del comportamiento de dichos sistemas o subsistemas del almacenamiento.
Análisis de Consecuencias	Análisis de seguridad que evalúa las dosis de radiación colectivas o individuales al hombre a partir de las descargas y el transporte de los radionucleidos desde la instalación nuclear al entorno humano mediante una serie de supuestos escenarios de liberación y transporte.
Análisis de Escenarios	Proceso de identificación, selección y combinación de un conjunto de «Features, Events and Processes» (Características, Sucesos y Procesos) para ser ensamblados de forma que representen las posibles situaciones futuras a las que se verá sometido un sistema de AGP en la evaluación del comportamiento o de la seguridad (ver Escenarios).
Análisis de Incertidumbre	Análisis para calcular las incertidumbres y los intervalos de error de las cantidades implicadas y en los resultados a partir de la solución de un problema. Requiere el uso de técnicas estadísticas y la definición de la información de entrada de forma probabilista
Análisis de Riesgos	Análisis del riesgo asociado a una tecnología o sistema donde los posibles sucesos y sus probabilidades de ocurrencia son conside-

	radas junto a sus potenciales consecuencias, la distribución de estas consecuencias dentro de la población(es) afectada(s), el factor tiempo y las incertidumbres de las estimaciones
Análisis de Seguridad	Análisis cuantitativo del conjunto de procesos identificados como más importantes para el comportamiento global del sistema de almacenamiento y cálculo de los indicadores del comportamiento global del sistema considerados en la normativa y criterios reguladores aplicables (ej. Dosis a miembros del grupo crítico, riesgo radiológico).
Análisis de Sensibilidad	Examen cuantitativo (semicuantitativo) de cómo el comportamiento de un sistema varía con los cambios, normalmente en los valores de los parámetros que lo gobiernan. Las dos aproximaciones comunes son: a) la <i>variación de los parámetros</i>, en las cuales se investiga la variación de los resultados como consecuencia de la variación de uno o más de los parámetros de entrada dentro de un rango razonable alrededor de un valor de referencia o la media, y b) <i>análisis de una perturbación</i>, en los cuales la variación de los resultados respecto a cambios en todos los valores de los parámetros de entrada se obtienen mediante técnicas diferenciales o de integración
Análogo Antropogénico, Arqueológico y Natural	Ver el capítulo 4 para una definición de estos tres tipos de análogos.
Backfill (Material de sellado)	Material utilizado para rellenar las partes excavadas del repositorio (pozos, galerías, etc.) una vez los residuos han sido depositados en él.
Barrera	Característica natural o artificial que se interpone entre los residuos y el hombre para impedir o retardar la llegada de los radionucleidos al medio ambiente, hasta que su actividad haya caído hasta niveles aceptables. Comúnmente se habla de barrera química-física (inmovilizado del residuo y confinamiento en contenedores), barrera de ingeniería (instalación donde se colocan los residuos) y barrera geológica (el medio de la corteza terrestre en el que se sitúan los residuos). El concepto de un AGP se basa en el concepto de un sistema multibarrera o de barreras múltiples.
Bentonita	Arcilla formada a partir de la alteración de cenizas volcánicas, compuesta principalmente por montmorillonita y otros minerales de grupo de la esmectita. Normalmente utilizada como material de sellado, por su baja permeabilidad, alta capacidad de sorción y alta capacidad de hinchamiento.
Bitumen	Referido a un amplio rango de hidrocarburos de alto peso molecular y normalmente resultado como subproducto del refinado del petróleo. El bitumen se ha utilizado como matriz para la inmovilización de residuos de baja y media actividad
Biosfera	Parte del medioambiente normalmente habitada por organismos vivos. Aunque en la práctica no se define con gran precisión, se considera que incluye la atmósfera, la hidrosfera (mares, océanos, lagos y aguas superficiales) y la parte más superficial de la litos-

	fera normalmente asociada con la actividad humana (el suelo, los sedimentos y el subsuelo afectado por las labores humanas, en particular las agrícolas
Buffer (Material de sellado)	Material colocado alrededor del contenedor de residuos en un repositorio, como barrera adicional para estabilizar en ambiente circundante, restringir el acceso del agua subterránea y reducir por sorción la tasa de escapes eventuales de radionucleidos desde los residuos.
Cálculo o Análisis Determinista	Método de estudio del comportamiento de un sistema definido mediante parámetros, características y sucesos cuyos valores se definen por un valor único
Cálculo o Análisis Probabilista	Método estadístico de estudio del comportamiento de un sistema definido mediante parámetros, características y sucesos cuyos valores vienen representados mediante distribuciones estadísticas
Calibración	Proceso de ajuste de un modelo en el que se busca que los resultados del modelo reproduzcan lo más fielmente posible la información disponible sobre el sistema real. La calibración de un modelo es tanto más necesaria cuanto mayor es la incertidumbre existente en los parámetros o más simplistas son las hipótesis conceptuales realizadas. El proceso puede ser realizado manualmente, por tanteos sucesivos, o automáticamente, mediante algoritmos que minimicen las diferencias entre los resultados del modelo y los datos disponibles.
Calor radiogénico	Calor asociado a la radiactividad del combustible nuclear. Se habla de calor residual después que el reactor haya sido apagado o de que el elemento combustible haya sido extraído del núcleo del reactor.
Campo lejano (geosfera)	La zona de la geosfera excluido el repositorio, e incluyendo los estratos circundantes a una distancia desde el repositorio tal que, con fines de su modelización, el repositorio puede considerarse como una entidad independiente, no diferenciándose el efecto de los contenedores de residuos individuales..
Campo próximo	El área excavada de un repositorio próxima o en contacto con los residuos, incluyendo los materiales de relleno y sellado y la zona de la roca almacén cuyas características se hayan visto alteradas por la construcción del repositorio y su contenido
Central nuclear	Instalación industrial que transforma la energía liberada por un combustible nuclear (normalmente óxido de uranio enriquecido en el isótopo 235) en forma de calor, primero en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. El calor producido permite evaporar el agua que acciona una turbina que lleva acoplado un alternador. Este tipo de instalación utiliza tecnología muy compleja debido a los procesos que se producen, las potencias alcanzadas, los requisitos técnicos y las precauciones necesarias para asegurar la seguridad de los trabajadores y de la población, así como la protección del medio ambiente.

Ciclo (del combustible nuclear)	Todas las operaciones asociadas con la producción de energía nuclear, incluyendo: la minería y los residuos generados por esta, el procesado y enriquecimiento de U o Th, la fabricación del combustible nuclear, la operación de los reactores nucleares (incluidos los de I+D), el reprocesado o no del combustible gastado, el desmantelamiento de instalaciones, y cualquier actividad de I+D relacionada y actividades asociadas a la gestión de los residuos radiactivos. Ver capítulo 1, donde se definen los tres tipos de ciclo.
Clausura	Operación consistente en la finalización de todas las operaciones de ingeniería (u otras) realizadas tras el emplazamiento de los residuos, el relleno y sellado de la instalación de almacenamiento, con el fin de dejar dicha instalación en condiciones seguras a largo plazo.
Coeficiente de Distribución (K_d)	Relación entre la cantidad de sustancia sorbida por unidad de masa de sólido seco y la concentración de sustancia en una solución en contacto con el sólido. En el SI se expresa en m^3/kg . Supone condiciones de equilibrio.
Código	Programa informático utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones de un modelo. Generalmente, el código consiste en los algoritmos numéricos necesarios para la resolución de los sistemas de ecuaciones resultantes del modelo matemático.
Coloide	Estado de subdivisión de la materia en la cuál el tamaño de la partícula puede variar desde comportarse como una solución 'molecular' verdadera hasta una suspensión. El tamaño de las partículas varía entre 1-1000 nm y las partículas se encuentran dispersas en la fase líquida sin formar parte del sedimento. Los transuránidos tienen cierta tendencia a coagular y formar macromoléculas por polimerización bajo ciertas condiciones naturales.
Combustible	Sustancia capaz de producir energía a partir de procesos de fisión y fusión
Comportamiento	En la gestión de los residuos radiactivo, es una medida de la efectividad de un sistema de AARR para aislar tales sustancias, así como para retardar y dispersar posibles descargas de radionucleidos de acuerdo con los requisitos y las especificaciones del diseño. El comportamiento puede también ceñirse a partes concretas del sistema. Así, por ejemplo, el comportamiento del contenedor podría entenderse como la medida de como el contenedor permanece intacto y evita las liberaciones de radionucleidos durante un periodo de tiempo
Conductividad Hidráulica	Capacidad de un medio poroso para permitir el flujo de agua a su través. Coeficiente de proporcionalidad entre el caudal unitario (velocidad de Darcy) y el gradiente hidráulico en un medio poroso y en condiciones de flujo en régimen laminar. Su valor depende del medio poroso y de las propiedades del agua.

Contenedor	Recipiente diseñado para contener combustible gastado o material radiactivo con el fin de facilitar su transporte o almacenamiento.
Coprecipitación	Precipitación simultánea de un componente soluble con otro macrocomponente de la misma solución acuosa, formando cristales mixtos por adsorción, oclusión o atrapamiento mecánico (IUPAC, 1997).
Corrosión	Ataque químico o electroquímico en la superficie de un material, que destruye dicha superficie. Cabe diferenciar entre la corrosión general o uniforme en toda la superficie del material y la corrosión local que supone una aceleración de la misma en áreas susceptibles concretas de dicha superficie. ‘Crevice’ corrosión, que consiste en una degradación química localizada en poros, junta, pernos o cualquier otra discontinuidad física. Corrosión por picadura (‘Pitting’) que consiste en una corrosión selectiva localizada alrededor de cavidades en la superficie del metal.
Criticidad	En un sistema de almacenamiento debido a las cantidades considerables de actínidos, se puede producir, después de un cierto tiempo, una acumulación de ^{239}Pu y/o ^{235}U , que en presencia de neutrones y de un moderador apropiado que disminuya la velocidad de estos neutrones (como es el agua subterránea que pueda acceder a las inmediaciones del contenedor de residuos), provoque una reacción de fisión autosostenida. Al conjunto de condiciones necesarias para que se produzca esta reacción de fisión se le denomina criticidad. La criticidad es uno de los factores en el análisis de la seguridad de un AGP de RAA, dadas las implicaciones negativas para la seguridad del almacenamiento que podría tener una reacción de fisión.
Desintegración Radiactiva	Fenómeno nuclear en el que un átomo radiactivo disminuye su masa y/o su nivel de energía de forma espontánea, lo que se manifiesta en la emisión de radiaciones ionizantes. Los tipos de desintegración radiactiva son limitados, siendo las desintegraciones alfa, beta (captura electrónica), gamma y la fisión espontánea los más importantes
Desorción	Proceso inverso a la sorción por el cual átomos, moléculas o partículas que se encuentran retenidas en la fase sólida pasan a la disolución o suspensión en la fase líquida.
Difusión	Movimiento de átomos o moléculas en un gas, líquido o sólido desde una zona con concentraciones altas hacia regiones con concentraciones menores (gradiente de concentración) debido al movimiento Browniano de las partículas. El proceso de la difusión molecular obedece a la Ley de Fick, que establece que el flujo másico difusivo es directamente proporcional al gradiente de concentración cambiado de signo. La constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de difusión.

Dispersión	La diseminación de los radionucleidos en el aire (dispersión aerodinámica) o el agua (dispersión hidrodinámica) resultante de los procesos físicos que afectan a la velocidad de cada una de las moléculas en el medio. La dispersión en un medio poroso es el resultado de la observación macroscópica de procesos microscópicos. Cada una de las partículas disueltas migra por vías de flujo de longitud diferente. Además, cada una de las vías de flujo presenta áreas transversales diferentes y, por lo tanto, distintas velocidades del agua.
Disolución	Mezcla homogénea a nivel molecular de dos o más sustancias. Una disolución está formada por solutos y disolvente. Se denomina soluto a cada uno de los componentes minoritarios de una disolución respecto al disolvente (componente mayoritario). Paso de los componentes de un sólido a la fase líquida por actuación de un solvente
Dosis	El término dosis es sinónimo de dosis efectiva (antes dosis equivalente efectiva). De forma poco correcta, en medicina nuclear, y por analogía con la terminología de uso corriente, se utiliza el término dosis para expresar: (1) La cantidad de sustancia emisora (expresada en peso o en actividad) si se trata de una fuente no encapsulada administrada a un paciente (en forma comparable a la de dosis de un fármaco). (2) La energía radiada por un fuente o transportada por un haz; si se trata de la energía individual de los fotones o partículas se expresa en MeV.
Dosis absorbida	Energía depositada por la radiación ionizante en la unidad de masa del medio atravesado (órganos y tejidos biológicos). Su unidad es el Gray (Gy).
Dosis efectiva (dosis equivalente efectiva)	Es la dosis equivalente ponderada (corregida proporcionalmente a) por la diferente sensibilidad al daño de los distintos órganos y tejidos del cuerpo humano. Los factores de corrección se llaman “factores de ponderación de los tejidos”. La unidad de medida es el sievert (Sv): $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$. Cuando se habla de protección radiológica es más frecuente utilizar la milésima parte de esta unidad (mSv) o, incluso, la millonésima parte (μSv). La unidad antigua era el rem: $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$. Hasta hace poco tiempo este término se denominaba «dosis equivalente efectiva», pero las últimas recomendaciones de la ICRP han simplificado la denominación. El término dosis efectiva es sinónimo de dosis.
Dosis equivalente	Es la dosis absorbida en un tejido u órgano ponderada en función del tipo y la calidad de la radiación. Los factores de corrección se denominan «factores de ponderación de la radiación» (antes factores de calidad de la radiación). La unidad de medida es el sievert (Sv): $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/Kg}$. La unidad antigua era el rem: $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.
Eh	Medida del potencial de óxido-reducción de un agua o de un par redox referido al electrodo estándar de hidrógeno. Expresión de

	las condiciones oxidantes/reductoras existentes en un sistema hídrico.
Elemento combustible	Conjunto formado por diversas barras (varillas) de combustible situadas en una armadura con bastidores y preparado para ser introducido directamente en el núcleo de un reactor nuclear
Enriquecimiento	Proceso por el cual se incrementa la abundancia isotópica de un nucleido en una sustancia. En los materiales nucleares el enriquecimiento se refiere a los nucleidos fisionables (U235).
Escenario	Conjunto de características, sucesos y procesos o supuestos frecuentemente utilizados en los análisis o evaluaciones para representar posibles condiciones futuras y/o sucesos a modelar tales como posibles accidentes en una instalación nuclear o la posible evolución de un repositorio y su entorno. Un escenario puede representar las condiciones en un punto discreto del tiempo o un único suceso, o una historia de condiciones y/o sucesos. 'Worst Case Scenario': Escenario de liberación y transporte de radionucleidos desde una instalación nuclear a la biosfera que representa el accidente más severo de todos los concebibles, establecido a partir de los supuestos mas pesimistas a la vez que posibles. Un solo escenario de este tipo es difícil de definir por lo que normalmente se define un conjunto de escenarios «conservative, but realistic» posteriormente analizados mediante técnicas de análisis de sensibilidad e incertidumbre para cubrir otros escenarios de consecuencias menores.
Especiación	Término referido a la forma(s) química(s), valencia y propiedades de cada elemento químico presente en el agua bajo un conjunto de condiciones (pH, Eh, ligandos, fuerza iónica, potencial redox etc.). Término que se refiere a las distintas especies en las que aparecen distribuidos los elementos disueltos. Esta distribución es función de la temperatura, pH, composición, potencial redox, etc. de la solución
Estudio de Seguridad ("Safety Case")	Compilación del conjunto de argumentos que sirve de base a la evaluación de la seguridad a largo plazo del almacenamiento, en una etapa dada del desarrollo de dicho almacenamiento. Comprende, además de la evaluación de la seguridad, una declaración de la confianza en los resultados de dicha evaluación. En éste, se deberían identificar aquellas cuestiones sin resolver y establecer un plan de trabajo para que sean abordadas en las etapas sucesivas del proceso de desarrollo del AGP
Evaluación de...	<i>Evaluación de consecuencias:</i> Evaluación de las consecuencias radiológicas (dosis, concentración, etc.). <i>Evaluación del comportamiento ("Performance Assessment"):</i> Comprende además del análisis del comportamiento, la comparación de los parámetros calculados con los criterios de diseño o criterios reguladores aplicables (Ej.: máximas temperaturas permitidas, mínimo tiempo de viajes de las aguas subterráneas, liberación de contaminantes desde un subsistema). Un análisis del comportamiento pasa

	a ser un análisis de seguridad cuando el sistema en consideración es la totalidad del sistema de almacenamiento y la medida de comportamiento es el impacto radiológico u otra medida global del impacto en términos de seguridad. <i>Evaluación del riesgo:</i> Evaluación del riesgo radiológico. Lleva implícito la evaluación de consecuencias y de las probabilidades de éstas. <i>Evaluación de seguridad (Safety Assessment):</i> Comprende además del análisis de seguridad, la demostración de que se ha analizado un conjunto suficientemente completo de procesos y de que se han empleado datos y modelos adecuados, así como la comparación de los indicadores del comportamiento global del sistema calculados con los criterios o límites reguladores aplicables.
Evaluación de Impacto Ambiental	Conjunto de documentos que recogen los resultados de una evaluación incluyendo los efectos físicos, ecológicos, culturales y socioeconómicos de una instalación potencial (p.e. un repositorio) o una nueva tecnología.
Evento	Desde el punto de vista de la seguridad a largo plazo y el análisis de sucesos, representa un suceso no deseado, incluyendo fallos de construcción, intrusión humana, sismos, etc.
Exclusión iónica	Fenómeno que causa un déficit de iones en las proximidades de las superficies minerales cargadas. En el caso de materiales arcillosos, el exceso de carga negativa presente en las superficies minerales provoca un déficit de aniones en las proximidades de dichas superficies, debido a repulsiones electrostáticas. En este caso se habla de exclusión aniónica. Técnica de separación empleada en cromatografía y basada en la diferente afinidad de especies cargadas eléctricamente.
Exposición	1. Magnitud física que caracteriza la ionización que produce en el aire una radiación. Su unidad es el Roentgen(R): $1\text{ R} = 2,58\text{ E-4 culombios/kilogramo}$. 2. Efecto de someter o someterse a las radiaciones ionizantes
FEP	Acrónimo de «Features, Events and Processes» (Características, Sucesos y Procesos) surgido para el análisis de escenarios de un almacenamiento de residuos radiactivos
Fisión nuclear	Reacción nuclear en la que tiene lugar la ruptura de un núcleo pesado, generalmente en dos fragmentos cuyo tamaño es del mismo orden de magnitud, y en la cual se emiten neutrones y se libera gran cantidad de energía. Normalmente se liberan también uno o varios neutrones que bajo las adecuadas condiciones pueden ser capaces de producir nuevas reacciones de fisión, dando lugar a la reacción en cadena.
Frente redox	Frente que separa dos zonas con marcadas diferencias en el estado redox de las soluciones y/o de las fases sólidas.
Fuerza Iónica	En una solución con partículas cargadas (iones) la fuerza iónica se expresa matemáticamente como la mitad de la suma de las concentraciones molales de cada ión por el cuadrado de sus car-

	gas. Es un modo de expresar la concentraciones eficaces de los constituyentes en el agua subterránea. Es una propiedad que afecta, por ejemplo, al cálculo de los coeficientes de actividad, a la estabilidad coloidal, a la capacidad para lixiviar los residuos desde los contenedores y al transporte de radionucleidos
Geosfera	Formación(es) geológica(s) circundantes al repositorio a una distancia tal del mismo que con fines de modelización del sistema pueden considerarse como una única entidad, en la cual los efectos de los contenedores individuales no se diferencian
Gestión de Residuos Radiactivos	Conjunto de actividades técnicas y administrativas necesarias para la manipulación, tratamiento, acondicionamiento, transporte, almacenamiento y evacuación de residuos radiactivos, cuyo objetivo final es proteger a las personas y al medio ambiente de las radiaciones que emiten los radionucleidos contenidos en los residuos, minimizando las cargas de esa protección a las generaciones futuras.
Glaciación	Cada una de las grandes invasiones de hielo que en épocas remotas acontecieron en zonas muy extensas de distintos continentes ²² .
Grado de quemado	Cantidad de energía extraída de la unidad de masa de un combustible nuclear desde que se introduce en el reactor. Suele expresarse en megavatios hora (o día) por tonelada de combustible (MWd/tU), o de metal pesado (MWd/tMP). En un combustible nuclear y para un nucleido fisionable dado, relación entre el número de átomos fisionados y los inicialmente presentes. Suele expresarse en tanto por ciento.
Gradiente hidráulico	Variación del nivel piezométrico por unidad de longitud en la dirección del flujo ²³ .
Grupo crítico o de referencia	Grupos formados por personas cuya exposición es razonablemente homogénea y representativa de la de los individuos más expuestos de la población debido a una determinada práctica.
Hijo	Nucleido que se genera en una desintegración radiactiva.(Véase «Padre»).
Huelgo	Espacio entre la vaina del combustible (zircaloy) y el combustible (pastillas de UO ₂)
Illita	Cada uno de los componentes de un grupo de minerales de la arcilla semejantes a las micas. Constituidos por silicatos de potasio y aluminio hidratados, cristalizan en el sistema monoclinico y su composición y estructura son intermedias entre las de la montmorillonita y la moscovita ²⁴ . Mineral arcilloso más abundante en los sedimentos marinos recientes. Predomina en las arcillas pizarrosas y está formada en su mayoría por SiO ₂ ≈50%, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , MgO, K ₂ O, etc.
ICRP	International Commission on Radiological Protection. Grupo internacional de expertos independientes, creado en 1928, que

²² Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia.

²³ Glosario Internacional de Hidrología. UNESCO, 1992.

²⁴ Diccionario de Términos Científicos y Técnicos de la Real Academia

	elabora guías de principios y criterios en el campo de la protección radiológica. Aunque no siendo de cumplimiento obligado, las recomendaciones de la ICRP son seguidas por la mayoría de los países para la definición de la normativa de cada uno de ellos.
Intercambio Iónico	Intercambio de los iones del mismo signo entre un sólido y un líquido. Intercambio, normalmente reversible, de un ión por otro en una superficie sólida o dentro de una red.
Isótopo	Átomos del mismo elemento químico que tienen el mismo número de protones pero distinto número de neutrones, es decir, igual número atómico (Z) pero diferente número másico (A). Se representan como A_ZX, siendo X el elemento químico. Los isótopos de un mismo elemento son iguales desde un punto de vista químico pero diferentes desde el punto de vista físico.
Lantánidos	Cada uno de los elementos químicos de la serie de catorce, de número atómico comprendido entre el 57 (Lantano) y el 71 (Lutecio), Constituyen una serie de transición interna, similar a la de los actínidos, en los que se ocupan con catorce electrones los siete orbitales 4f¹. Sinónimo de lantánidos es tierras raras.
Migración	Usado como sinónimo de transporte de solutos. Término que engloba a todos los posibles mecanismos de transferencia de masa. Los principales mecanismos de migración en un medio poroso son: advección, difusión y dispersión.
Moderador	Sustancia que frena los neutrones rápidos de fisión sin que se produzca una captura apreciable de los mismos
Modelo	En matemáticas aplicadas, una representación analítica o cuantificación de un sistema real y los modos en los que los fenómenos tienen lugar dentro del sistema. El modelo normalmente se escribe como un algoritmo de cálculo Representación idealizada y, por lo tanto, simplificada de un sistema real.
Modelo conceptual	Conjunto de supuestos cualitativos empleados para describir un sistema o subsistema con un propósito determinado. Este conjunto de supuestos, incluyen como mínimo la geometría y dimensiones del sistema, las condiciones iniciales y de contorno, la dependencia temporal, y la naturaleza de los procesos físicos y químicos mas importantes, así como los valores de los parámetros involucrados en dichos procesos. Los supuestos deberían ser consistentes entre sí y con la información existente en el contexto del objetivo perseguido
Modelo matemático	Conjunto de ecuaciones que describen los procesos físicos y/o químicos considerados en el modelo conceptual. En el caso de modelos sencillos, puede ser posible resolver el modelo matemático usando soluciones analíticas (exactas). En este caso se habla de un modelo analítico.
Modelo numérico	En modelos complejos las ecuaciones del modelo matemático no se pueden resolver analíticamente. Por ello se recurre a soluciones numéricas del modelo matemático. El modelo numérico

	contiene un conjunto de ecuaciones que se resuelven mediante ordenadores utilizando códigos de cálculo.
Padre	En una desintegración, nucleido que se desintegra. En una cadena de desintegración primer nucleido de la cadena. (Véase «Hijo»).
Pastilla de combustible	Porción de combustible nuclear cerámico, de forma cilíndrica y pequeñas dimensiones. Su altura suele ser del orden de un centímetro. Se obtiene prensando y tratando a altas temperaturas polvo de óxido del material fisionable.
Pechblenda	Mineral de Uranio de composición variable. Está contenida en los filones hidrotermales de sulfuros y arseniuros. En su contenido también es puede hallar Pu ²³⁹ .
pH	Medida cuantitativa que se emplea para caracterizar el grado de acidez de una disolución. Se define como el logaritmo decimal del inverso de la concentración (o actividad) del ión hidrógeno de un agua expresada en la escala p ($\text{pH} = -\log a\text{H}^+$)
Potencial redox	Es una medida del estado de oxidación del sistema. Voltaje asociado a una reacción redox. Corresponde al Eh si se expresa respecto al electrodo estándar de hidrógeno. Medida de la capacidad de una especie para ganar o perder electrones, es decir, la capacidad para reducirse u oxidarse. Se mide en voltios y en relación con un potencial de referencia de valor cero, que corresponde al electrodo normal de hidrógeno $\text{H}_2/\text{H}_3\text{O}^+$.
Precipitación	Formación de una fase sólida en el seno de una disolución. En el caso de un electrolito el precipitado se forma cuando el producto de las concentraciones de sus iones sobrepasa el valor del producto de solubilidad.
Periodo de semidesintegración	Tiempo requerido para que el número de átomos radiactivos existentes inicialmente en una sustancia radiactiva, se reduce a la mitad. Se representa por la letra T, y es igual a: $T = (0.693/\lambda)$, siendo λ la constante de desintegración radiactiva. No se debe de confundir este término con la vida media ($1/\lambda$).
Porosidad	Relación entre el volumen de huecos y el volumen total del medio poroso considerado
Pos-clausura	Periodo siguiente al sellado del repositorio y al desmantelamiento de las instalaciones de superficie. Durante este periodo es posible un periodo de vigilancia institucional, particularmente para los almacenamientos próximos a la superficie
Producto de Activación	Nucleido, comúnmente radiactivo, generado a partir de un material, cuyos átomos se encontraban inicialmente en estado estable, como consecuencia de la absorción o captura de partículas, generalmente neutrones.
Producto de fisión	Nucleido, estable o inestable, que es miembro de una cadena de fisión. Puede ser un fragmento de fisión o uno de sus descendientes.
Quemado	Proceso en el que a partir de la introducción en un reactor nuclear

(combustible nuclear)	de materiales de control y venenos u otras sustancias, se transforman los átomos del combustible como consecuencia de las reacciones nucleares que se experimentan, aprovechándose la energía generada.
Radiación	Forma de propagarse, a través del espacio, de la energía o las partículas. Existen varias clases de radiaciones, pero las más conocidas son las electromagnéticas y las que están formadas por partículas.
Radiaciones ionizantes	Nombre genérico empleado para designar las radiaciones de naturaleza corpuscular o electromagnética que en su interacción con la materia producen iones, ya sea de forma directa o indirectamente.
Radiactividad	Propiedad de algunos elementos químicos de emitir partículas u ondas electromagnéticas. Esta propiedad se debe a la existencia de una descompensación entre el número de neutrones y de protones del núcleo del átomo, que provoca una inestabilidad y una liberación de la energía acumulada en forma de partículas u ondas. La radiactividad natural se debe a elementos que emiten radiaciones espontáneamente, como es el caso del uranio, el torio, el radón, etc
Radiólisis	Proceso de descomposición química de la materia (fundamentalmente en el agua subterránea pero también en la materia orgánica, etc) provocado por la incidencia de radiaciones ionizantes de alto poder energético. Los dos procesos principales de la radiólisis del agua son la ionización y la excitación electrónica, que se producen en un tiempo inferior a 10^{-16} segundos. La radiólisis del agua es un factor importante que puede modificar considerablemente las condiciones redox en el campo próximo de un sistema de almacenamiento de residuos radiactivos puesto que genera especies oxidantes (O_2 y H_2O_2) y reductoras (H_2). Esto crearía condiciones oxidantes en campo próximo porque el hidrógeno es menos reactivo que el oxígeno a las temperaturas que existirán en el sistema de almacenamiento y además, al difundir más rápidamente que el oxígeno, escaparía preferentemente. Según los modelos usados para describir la disolución del combustible en los diferentes análisis de seguridad, las especies oxidantes producidas en la radiólisis provocarían la oxidación del UO_2 a $U(VI)$, que es más fácilmente soluble en las aguas subterráneas. El uranio oxidado y las especies oxidantes formadas por la radiólisis se transportarían lejos del combustible gastado oxidando el contenido de $Fe(II)$ presente en la roca encajante. Esto crearía un frente moviéndose hacia el exterior entre una zona con ambiente oxidante, alrededor del combustible gastado, y la roca encajante que contiene $Fe(II)$ inalterado y, por tanto, con ambiente reductor
Radionucleido	Núcleo atómico, caracterizado por su número de neutrones y número de protones, que tiene la propiedad de transformarse en

	otro, emitiendo diversos tipos de radiaciones para así alcanzar la estabilidad de su núcleo
Radiotoxicidad	Toxicidad debida a las radiaciones ionizantes emitidas por un radionucleido incorporado al organismo y por sus productos resultantes. La radiotoxicidad no sólo depende de las características radiactivas del radionucleido, sino también de su estado físico y químico así como del metabolismo de ese elemento en el organismo.
Reacción nuclear	Reacción entre partículas en la que las fuerzas que intervienen son de origen nuclear.
Reacción nuclear en cadena	Serie de reacciones nucleares semejantes que se llevan a cabo porque uno de los agentes que provocan la reacción (generalmente un neutrón) es producto de otra de estas reacciones.
Repositorio	Traducción del término inglés “repository”. Instalación nuclear en la que se colocan los residuos con el fin de ser almacenados de manera definitiva en ella. No se considera una posible recuperación futura de tales residuos.
Repositorio geológico	Instalación nuclear para el almacenamiento de residuos emplazada a cierta profundidad (normalmente varios cientos de metros) en una formación geológica estable con el fin de procurar el aislamiento a largo plazo de los radionucleidos de la biosfera. Normalmente se emplea para el almacenamiento de residuos de larga vida y/o alta actividad
Reproceso/reprocesado	Recuperación del material fisionable presente en el combustible nuclear irradiado con el fin de ser reutilizados en la fabricación de nuevo combustible. Llevado a cabo mediante una separación química del Uranio y Plutonio de otros productos de fisión y transuránidos. Determinados productos de fisión pueden ser también recuperados. Este proceso genera residuos líquidos de alta actividad que son, generalmente, vitrificados.
Residuo radiactivo	Cualquier materia (sólida, líquida o gaseosa) que contiene o está contaminada con radionucleidos en concentraciones superiores a las establecidas por las autoridades competentes, para el cual no está previsto ningún uso. Se generan en la producción de energía eléctrica de origen nuclear y en la utilización de radioisótopos en múltiples actividades (industria, medicina, agricultura, investigación, etc.).
Residuos de alta actividad (“High Level Waste” HLW)	Tienen una elevada actividad específica en emisores de vida corta, contienen radionucleidos emisores alfa de vida larga en concentraciones apreciables y pueden ser grandes productores de calor: 1. Los líquidos altamente radiactivos, conteniendo la mayor parte de los productos de fisión y algunos actínidos, que se separan en el primer ciclo de extracción con disolventes durante el reproceso del combustible irradiado, así como los efluentes relacionados con dicho proceso; 2. El combustible nuclear irradiado, si ha sido declarado residuo, y

	3. Cualquier otro residuo de actividad comparable a uno de los dos anteriores. En general los HLW se consideran residuos de vida larga. Es también característico de ellos su elevada potencia térmica.
Residuos radiactivos de baja y media actividad (Low and Intermediate Level Waste LILW)	Residuos con una actividad específica baja, radionucleidos emisores beta-gamma con periodos de semidesintegración menores de 30 años y contenido limitado en emisores alfa de vida larga (periodos de semidesintegración de varios miles de años). - Residuos radiactivos de media actividad: Son los de menor nivel de actividad y de generación de calor que los de alta actividad pero que todavía requieren blindaje durante su transporte y manipulación. El término se usa, en forma general, para referirse a todos los residuos no definidos como de alto o de bajo nivel. - Residuos radiactivos de baja actividad: Son aquéllos que, por su bajo contenido radiactivo, no requieren blindaje durante su manipulación y transporte.
Residuos de vida larga	Residuos radiactivos con un contenido importante en nucleidos de vida larga con radiotoxicidad suficiente, en cantidades y o concentraciones, que requieren el que sean aislados durante un largo plazo de la biosfera. Se refiere a vidas medias superiores a los 30 años
Retardo (factor)	Retraso que experimentan las especies químicas en solución en su migración por el medio subterráneo, resultado de un conjunto de procesos que tiene lugar entre las especies en solución y el medio a través del cual se desplazan Coeficiente de Retardo (R_d): Medida de la capacidad de un medio poroso para retrasar el movimiento de un radionucleido transportado en el medio fluido que circula a su través. Viene expresado mediante: $1 + (\rho_b/n) K_d$. Donde el ρ_b es la densidad aparente del medio, n la porosidad y K_d el coeficiente de distribución
Retroceso alfa	El proceso de retroceso alfa es el resultado del repentino movimiento de un radionucleido hijo cuando se emite una partícula alfa de varios MeV de energía en una desintegración radiactiva. Si un átomo de ^{238}U cercano a la superficie de un grano de mineral se desintegra emitiendo una partícula alfa, su radionucleido hijo ^{234}Th puede ser movilizado hacia el agua subterránea que lo rodea. El ^{234}Th se adsorberá rápidamente en la superficie del mineral donde todavía será accesible para la fase acuosa o permanecerá en disolución el tiempo de su corta vida media (24 días). En cualquiera de estos dos casos, su desintegración radiactiva en ^{234}U producirá un exceso de ^{234}U en fase acuosa en relación con el ^{238}U (Payne <i>et al.</i>, 1992).
Riesgo	Existen varias definiciones relevantes para el campo de los residuos radiactivos: - En general riesgo es la probabilidad o posibilidad de que determinado suceso ocurra dentro de un especificado periodo o en unas condiciones determinadas

	- En las evaluaciones de seguridad de repositorios, el riesgo puede usarse como una medida de la seguridad. En este contexto se define como el producto de la probabilidad de que un individuo se vea expuesto a una dosis de radiación determinada y la probabilidad de que esta última conduzca un efecto adverso sobre la salud
Separación	Proceso diseñado para aislar la corriente de uno o más elementos de una mezcla o compuesto. Normalmente se aplica al proceso por el que se separan aquellos nucleidos radiactivos de vida larga presentes en los líquidos de alta actividad resultantes del tratamiento o reproceso del combustible irradiado.
Serie radiactiva	Cadena de radionucleidos en las que cada miembro se transforma en el siguiente mediante desintegración radiactiva, hasta llegar finalmente a un nucleido estable.
Sievert (Sv)	Unidad de la dosis equivalente y de la dosis efectiva en el Sistema Internacional de Unidades: 1 Sv = 1 J/kg. La unidad antigua es el REM. 1Sv = 100 REM.
Solubilidad	En química es la cantidad de una sustancia que puede ser disuelta en una cantidad dada de otra sustancia. La solubilidad del residuo o de los radionucleidos es un factor importante en los estudios de liberación y migración
Sorción	Interacción que tiene lugar en la interfase sólido-líquido entre átomos, moléculas o partículas en disolución o suspensión y la superficie sólida que da lugar a la retención de las moléculas o partículas en la fase sólida. El término en general, incluye la <i>absorción</i> (las interacciones tienen lugar dentro de los poros del sólido, siendo la capacidad de absorción del sólido proporcional a su volumen) y <i>adsorción</i> (las interacciones tienen lugar en la superficie del sólido, siendo la capacidad de adsorción del sustrato proporcional a la superficie específica efectiva). Además se diferencia entre 'sorción química' (chemisorption) y 'sorción física' (physisorption), asociadas con atracciones de tipo químico y físico respectivamente. En la práctica, la sorción frecuentemente resulta difícil de diferenciar de otros procesos que intervienen en la migración, tales como la filtración o la dispersión.
Superficie freática	Lugar geométrico de los puntos del espacio que separa la zona no saturada de la saturada en agua en el medio geológico. Superficie en la zona de saturación de un acuífero libre sometido a la presión atmosférica ²⁵ .
Tasa (de exposición, de dosis, etc.)	Para cada magnitud, relación entre el incremento que ésta experimenta y el intervalo de tiempo en que se ha producido dicho incremento. La tasa de desintegración se mide en desintegraciones por segundo (dps); la de exposición en roentgen por hora (R/h); la de dosis absorbida en gray por hora; la de dosis

²⁵ Glosario Internacional de Hidrología, UNESCO, 1992.

	equivalente y dosis efectiva en Sievert por hora (Sv/h) o Sievert por año (Sv/a); etc
Tiempo de Tránsito tiempo de viaje	En los modelos de transporte de radionucleidos para un AARR es el tiempo que tarda el radionucleido en recorrer cierta distancia, superar cierta barrera, etc.
Transmisividad hidráulica	Caudal que circula a través de una sección de acuífero de anchura unidad bajo un gradiente hidráulico unitario. Se expresa como el producto de la conductividad hidráulica por la potencia saturada del acuífero
Transporte de radionucleidos	Acción de un vector particular que resulta en el movimiento (migración) de los radionucleidos en la geosfera, p.e. transporte de radionucleidos por el agua subterránea.
Transuránico o Transuránico	Elemento químico cuyo número atómico es superior a 92 (Neptunio, Plutonio, Americio, Curio, Berquelio, Californio, etc.)
Uraninita	Mineral del grupo de los óxidos de composición variable. Puede contener el 75-90% de UO_2 y UO_3 . Cristaliza en el sistema cúbico, por lo general en agregados granulares o masivos, raras veces en cristales aislados. Es muy pesado, de dureza entre 5 y 6, frágil y fuertemente radiactivo. Se encuentra en pegmatitas y filones hidrotermales de temperatura media y alta; también en yacimientos sedimentarios de acumulación. Es la principal mena del uranio.
Uranio	Elemento químico de número atómico 92 y símbolo U. La formación isotópica del uranio que se encuentra en la naturaleza es la siguiente: U-235 en un 0,71%; U-238 con un 99,28 %, y el resto es U-234. Por tener una presencia de isótopos fértiles y fisibles, se puede emplear en cualquier tipo de reactor. Suele utilizarse en forma de óxido de uranio UO_2 , ya que como uranio metálico presente múltiples limitaciones, como ocurre con las aleaciones de uranio.
Vaina	En un elemento combustible, cubierta que contiene herméticamente el combustible nuclear impidiendo la salida de los productos de fisión y garantizando la resistencia mecánica para asegurar la integridad del combustible
Validación	Validación de un modelo: científicamente hablando es imposible demostrar un modelo, al igual que sucede con muchos otros tipos de hipótesis científicas. Este es el motivo por el que se utiliza el término validación en lugar de demostración cuando se hace referencia a un modelo. El termino validación no tiene un significado aceptado en la comunidad científica. Una de las definiciones propuestas es: “la confirmación de que un modelo es una buena representación de los procesos que suceden en el sistema real ²⁶ ”. En los últimos años parece que se está imponiendo el término “aumento de confianza en la capacidad predictiva de modelos” en lugar de “validación de modelos”.

²⁶ Agencia Internacional de la Energía Nuclear.

Verificación	Proceso cuyo objetivo es demostrar que un código resuelve correctamente las ecuaciones que se supone debe resolver. Por lo tanto, verificación es un concepto relacionado con un código y no con un modelo.
Varilla combustible	Combustible nuclear dispuesto en forma de barra, formado por pastillas de combustible contenidas en una vaina tubular metálica.
Vida Media	Forma de expresar la medida de la inestabilidad de los radionucleidos que se define como la inversa de la constante de desintegración ($1/\lambda$). Media aritmética de las vidas individuales de los átomos de un cuerpo radiactivo. Equivale a 1/0,693 el periodo de semidesintegración de una sustancia.
Vida Corta	Aquellos residuos radiactivos cuya actividad cae hasta niveles no significativos durante el período de tiempo en el que se puede garantizar el mantenimiento de un control institucional (200-300 años máximo). Sus principales componentes radiactivos tienen períodos máximos de semidesintegración de menos de 30 años.
Vida Larga	Aquellos residuos radiactivos cuya desintegración requiere períodos largos de tiempo que no permiten garantizar el mantenimiento del control institucional. Contienen cantidades significativas de isótopos con períodos de semidesintegración superiores a 30 años
Vitrificación	Proceso de incorporación de los materiales a un vidrio o en la forma de un vidrio. Normalmente se refiere a la solidificación de los residuos líquidos de alta actividad generados en el reproceso del combustible gastado.

Anexo D: Índice de Acrónimos

<i>Abreviatura</i>	<i>Nombre completo</i>
a	Años
AEA-Harwell	Atomic Energy Authority
AECL	Atomic Energy of Canada Limited
AGP	Almacenamiento Geológico Profundo
ANDRA	Agence National pour la Gestion de Déchets Radioactifs
ANSTO	Australian Nuclear Science and Technology Organization
ARAP	Alligator Rivers Analogue Project
BGS	British Geological Survey
BPM	Blind Predictive Modelling (modelización predictiva ciega)
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CE	Comisión Europea
CEA/IPSN	Commissariat à l'Energie Atomique, Institute de Protection et de la Sûreté Nucléaire
CEC	Commission of the European Community
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas
CLMC	Cigar Lake Mining Corporation
CNWRA	Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses
COGEMA	Compagnie Générale des Matières Nucléaires
CRWM	Civilian Radioactive Waste Management
CSH	(Calcium Silicate Hidrates), silicatos hidratados de calcio. Siguiendo el estándar de la industria del cemento C=CaO; A=Al ₂ O ₃ ; S=SiO ₂ ; H=H ₂ O.
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
EA	Environmental Agency
EC-NST	European Commission Nuclear Science and Technology
EEUU	Estados Unidos de América
EMP	École de Mines de París
EPA	Environmental Protection Agency
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos S.A.
ETSECCPB-UPC	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales Puertos de Barcelona – Universidad Politécnica de Cataluña
Ga	Miles de millones de años
GSF-NWDR	Geological Survey of Finland- Nuclear Waste Disposal Research
GTK-YST	Geologian Tutkimuskeskus - Ydinjätteiden Sijoitustutkimukset
HMIP	Her Majesty's Inspectorate of Pollution
HREE	Heavy Rare Earth Elements; Lantánidos pesados
I+D	Investigación y Desarrollo
IAEA	International Atomic Energy Agency
IREE	Intermediate Rare Earth Elements; Lantánidos intermedios
IS	Índice de saturación
ITGE	Instituto Tecnológico Geominero de España
JAERI	Japan Atomic Energy Research Institute
JNC	Japan Nuclear Cycle Development Institute
JRCCEC	Joint Research Center of the Commission of the European Communities
Ka	Miles de años
LANL	Los Alamos National Laboratory
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
LREE	Light Rare Earth Elements; Lantánidos ligeros
Ma	Millones de años
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle (National Cooperative for the Disposal of Radiactive Waste)
NAWG	Natural Analogue Working Group
NEA OECD	Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and development
NIREX	United Kingdom Nirex Limited
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NUREG	U.S. Nuclear Regulatory Commission
OECD/NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency
OH	Ontario Hydro
ONWI	Office of Nuclear Waste Isolation
PCS	Photon Correlation Spectroscopy

<i>Abreviatura</i>	<i>Nombre completo</i>
PGRR	Planes Generales de Residuos Radiactivos
PNC	Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Japón
PSI	Paul Schrreder Institute
REE	Rare Earth Elements; Lantánidos
RAA	Residuos de Alta Actividad
SCK/CEN	Studiecentrum voor Kemenergie/Centre d'Etude de L'Energie Nucleaire
SEM	Scanning Electron Microscopy
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co)
SKI	Statens Kärnkraftinspektion (Swedish Nuclear Power Inspectorate)
SNL	Sandia National Laboratory
STUK	Center for Radiation and Nuclear Safety
SYNROC	Synthetic Rock
TEM	Transmission Electron Microscopy
TVO	Teollisuuden Voima Oy
UCM	Universidad Complutense de Madrid
UDC	Universidad de La Coruña
UKAEA	Environmental Agency of England and Wales
UKDoE	U.K. Department of Environment
UPC-CSIC	Universidad Politécnica de Cataluña-CSIC
US EPA	United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
US-DOE	United States Department of Energy
USGS	United States Geological Survey
USNRC	United States Nuclear Regulatory Commission
UZ	Universidad de Zaragoza
VTT	Technical Research Center of Finland
XRD	X-Ray Diffraction. Difracción de Rayos X
YJT	Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant

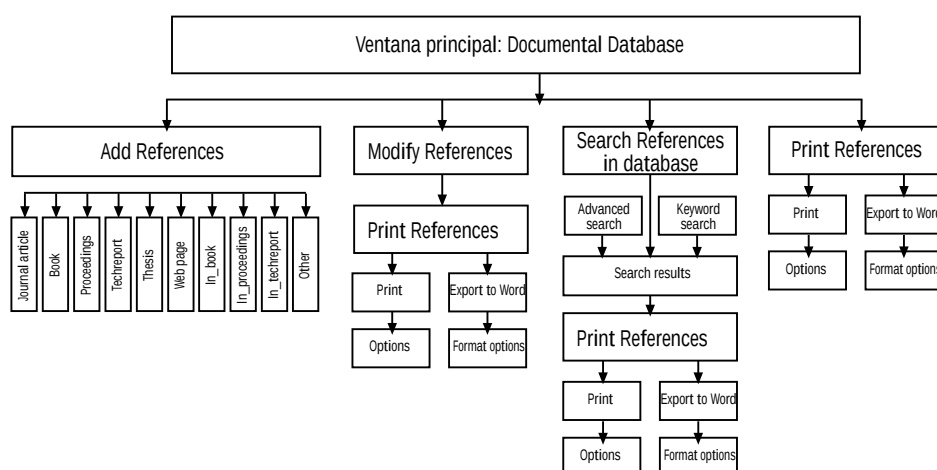
Anexo E

Base de datos documental

La base de datos de documentos que se adjunta en el CDROM se ha desarrollado específicamente para este proyecto con el objetivo de recopilar todas las referencias bibliográficas consultadas o citadas durante el transcurso del proyecto, parte de las cuales aparecen en la bibliografía de este documento. En la actualidad la base de datos cuenta con unas 2000 entradas.

Como las necesidades de organización, búsqueda e introducción de datos que el proyecto requería no se correspondían con ningún programa comercial, se ha diseñado una base de datos Access” específicamente pensada para almacenar la información recopilada durante el proyecto. La documentación técnica de cómo está organizada internamente la base de datos está recogida en un Manual del Usuario, incluido en el CDROM. La figura BD-1 resume la jerarquía de ventanas de BDD y la figura BD-2 muestra la ventana principal.

Figura BD-1.
Organización de
la Base de Datos
de Documentos
desarrollada para
el proyecto.



La principal función de la base de datos de documentos (a partir de ahora BDD) es la de almacenar de forma sistemática y homogénea toda la documentación bibliográfica relacionada con el estudio de los análogos naturales y los ejercicios de evaluación de la seguridad consultados. Para que la utilidad de la información almacenada sea mayor, además de incluir los datos bibliográficos necesarios para citar correctamente todas las referencias bibliográficas que aparecen en los documentos asociados al proyecto, la BDD incorpora una serie de campos adicionales que describen con detalle el tipo de información que contiene cada referencia.

Para cumplir con los requisitos necesarios de homogeneización a la hora de introducir las referencias en la base de datos por parte de varios grupos de trabajo independientes, se han definido 10 tipos distintos de referencias bibliográficas, que son:



Figura BD-2.
Ventana principal
de BDD.

- Artículo: trabajo publicado en una revista.
- Libro: libro de texto, monografía, series de volúmenes o volumen íntegro de un boletín.
- Libro de actas: el libro de actas de una conferencia, congreso, reunión, workshop, etc.
- Informe técnico: un trabajo publicado a través de una universidad, organismo de investigación o regulador, empresa, etc.
- Tesis: tesis doctoral, de licenciatura, de master, etc.
- Documento electrónico: este tipo de referencia sirve para todo tipo de documentos electrónicos que pueden consultarse en línea, tanto a través de Internet como documentos HTML, como a través de telnet, ftp o gopher. No se incluyen aquí las publicaciones en CDROM, a no ser que la única forma de consultarlas sea en línea.
- En libro: un capítulo o sección, con autores propios, dentro de una referencia de tipo libro.
- En libro de actas: un artículo (o resumen) en las actas de una conferencia, congreso, workshop, etc. (referencia tipo libro de actas)
- En Informe técnico: un artículo, capítulo o sección, con autores propios, dentro de un informe técnico (referencia tipo informe técnico).
- Otra: una referencia que no se ha podido asignar a ninguna de las categorías anteriores.

Cada tipo de referencia bibliográfica tiene sus propias necesidades de información, necesidades que vienen recogidas en los campos que aparecen en las ventanas

correspondientes a cada tipo de referencia. En dichas ventanas los campos de obligada cumplimentación aparecen con fondo blanco y los de llenado opcional, con fondo gris. De esta manera se asegura que todas las referencias tienen un *mínimo* de información común, independientemente del grupo de trabajo que haya incluido la referencia en la base de datos. La figura BD-3 muestra, a modo de ejemplo, la ventana correspondiente al tipo de referencia “Informe Técnico”. La BDD está diseñada en inglés y por esa razón toda la información que aparece en las figuras que se muestran aquí, extraídas directamente de la aplicación, están en dicha lengua.

Figura BD-3. Ventana para la introducción de información en una referencia de tipo “Informe Técnico” (Techreport en la figura). Los campos estrictamente bibliográficos son los que están dentro del recuadro verde, mientras que los que aparecen dentro de recuadros naranjas sirven para incluir información adicional. En todos los casos un campo con fondo blanco significa que es de obligada cumplimentación y un campo con fondo gris que es opcional.

En total hay 41 campos en la BDD, agrupados en tres categorías: (1) campos de control, usados sobre todo para la organización interna de la base de datos; (2) campos bibliográficos, que incluyen la información necesaria para citar correctamente cada referencia; y (3) campos de información, que como su nombre indica recogen información sobre el contenido de cada documento. En la Figura BD-3 los campos de control están incluidos en recuadros grises (parte superior izquierda), los campos bibliográficos en un recuadro verde y los campos de información en recuadros naranjas. El nombre y la definición de cada uno de los 41 campos se puede encontrar en el Manual del Usuario.

Además de introducir referencias bibliográficas en la base de datos, la BDD permite:

- Modificar referencias. Esta opción permite editar y modificar una referencia previamente introducida.
- Buscar referencias. Esta opción permite hacer búsquedas sobre cualquier campo de la base de datos.

- Imprimir referencias. Esta opción permite imprimir (1) toda la base de datos, (2) las referencias seleccionadas mediante un proceso automático de búsqueda, (3) las referencias seleccionadas manualmente, (4) la referencia mostrada en pantalla.

BDD cuenta con una potente herramienta de búsqueda de referencias, que está organizada en tres niveles:

- Búsqueda simple: el usuario introduce una palabra o frase literal y la base de datos se encarga del resto.
- Búsqueda avanzada: el usuario introduce una o varias palabras o frases literales unidad por operadores lógicos y la búsqueda se realiza en campos específicos seleccionados por el usuario.
- Búsqueda por palabras clave. BDD cuenta con un conjunto “cerrado” de palabras clave organizadas en siete grupos (subsistemas, materiales, parámetros/datos, procesos, modelización, evaluación de la seguridad y caracteres geológicos). Estas palabras clave se añaden a cada referencia en el momento de su incorporación a la base de datos. El trabajar con un conjunto limitado de palabras clave permite recuperar con facilidad las referencias, durante las búsquedas, que comparten una o varias palabras clave.

Como última característica a resaltar, la BDD permite imprimir en diferentes formatos las referencias contenidas en las base de datos. Esta impresión se puede hacer desde la propia base de datos, utilizando una serie de impresos diseñados ex profeso, o desde Word, exportando las referencias seleccionadas a un documento de este tratamiento de textos. La ventaja de esta opción es que las referencias pueden imprimirse directamente con el formato definitivo con el que aparecen en la bibliografía de cada uno de los documentos del proyecto.

Aplicación de los análogos a la evaluación de seguridad y comunicación del almacenamiento geológico. Síntesis ilustrativa

**Colección Documentos I+D
10.2004**