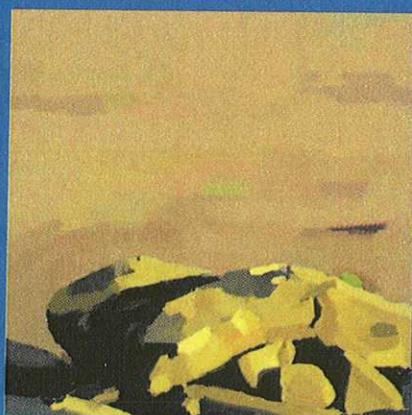


Revista del CSN / Número 16  
III Trimestre 2000

# Seguridad Nuclear



**Intercomparaciones analíticas  
en muestras ambientales**

**AGP, una solución inevitable  
y éticamente correcta**

**Proyecto Tracer: aplicación  
del código Corvel en ríos  
y embalses**

**Mecanismos de formación  
de las alteraciones cromosómicas**

**Uso de espectrometría gamma  
*in situ* en dosimetría externa**

**Seguridad Nuclear**

Revista del CSN  
Año IV / Número 16  
III Trimestre 2000

**Director**

Juan M. Kindelán

**Comité de redacción**

Agustín Alonso  
José A. Azuara  
Aníbal Martín  
Carmen Martínez Ten  
Paloma Sendín  
Luis del Val

**Secretaria de redacción**

Fátima Rojas

**Consejo de**

**Seguridad Nuclear**

Justo Dorado, 11  
28040 Madrid  
Tf. 91 346 02 00  
Fax 91 346 06 66

**Coordinación editorial**

RGB Comunicación  
Princesa 3, dpdo.  
28008 Madrid  
Tf. y Fax 91 542 79 56

**Impresión**

Gráficas Naciones  
Río Sil, 3  
28110 Algete (Madrid)  
Tf. 91 629 21 45  
Fax 91 629 22 79

ISSN: 1136-7806

**D. Legal:** M. 31.281-1996

**Portada:** Marina#5 (José María Cerezo)

Los autores asumen la total responsabilidad de los trabajos que firman. El CSN al publicarlos no pretende expresar su acuerdo con ellos.

1 Editorial

2 Intercomparaciones analíticas en muestras ambientales. Campaña 1999  
● Lucila María Ramos, Lourdes Romero y Rosario Salas

11 Almacenamiento geológico profundo: una solución inevitable y éticamente correcta  
● Maurice Allegre

17 El proyecto Tracer: aplicación del código Corvel en ríos y embalses  
● Fernando Sánchez, Roberto Gil, María del Carmen Palancar y José Manuel Aragón

24 Mecanismos de formación de las alteraciones cromosómicas  
● A. Genescà, L. Tusell, I. Ponsa, L. Latre, M. Martín, R. Miró, J. Egozcue

30 Aplicación de la espectrometría gamma *in situ* a la dosimetría externa  
● José Luis M. Matarranz

37 Noticias

37 Consejo de Seguridad Nuclear / 39 Principales acuerdos del CSN / 42 Información general / 43 Centrales nucleares / 45 Tecnología / 45 Investigación y desarrollo / 45 Protección radiológica / 46 Publicaciones

48 Resúmenes

---

# Editorial

**E**n esta nueva legislatura, el Parlamento ha iniciado sus trabajos modificando los reglamentos del Congreso y del Senado, adaptando las comisiones legislativas a la nueva estructura ministerial. En las dos cámaras desaparece la Comisión de Industria y Energía y se crea la de Ciencia y Tecnología. A partir de ahora, el Consejo dará cuenta de sus actuaciones a la Comisión de Economía y Hacienda del Congreso.

En este sentido, y como es preceptivo por Ley, el CSN envió, el pasado mes de mayo, su informe de 1999 al Congreso y al Senado. Por primera vez, y siguiendo el mandato del propio Parlamento, el CSN ha reestructurado sus informes, anteriormente semestrales, en un único informe anual.

El presidente del Consejo, Juan Manuel Kindelán, se ha entrevistado con la presidenta del Congreso y con el presidente de la Comisión de Economía y Hacienda. En estos encuentros, el presidente del CSN expuso las líneas estratégicas de actuación del organismo para dar cumplimiento a las responsabilidades que la ley le atribuye y la vinculación del Consejo con el Parlamento, del que depende y al que rinde cuenta de sus actuaciones.

Las directrices y resoluciones aprobadas por el legislativo sobre los temas en los que es competente el CSN, la seguridad nuclear y la protección radiológica, han sido y son fundamentales para nuestro trabajo. Buena prueba de ello han sido la ampliación de funciones sobre la vigilancia radiológica ambiental a todo el territorio nacional o la actuación en instalaciones no reguladas por la legislación nuclear. También fue el Parlamento el que instó al CSN a modificar su estructura para adaptarla a las nuevas funciones y a una nueva realidad que no es la misma que la que existía hace 20 años, cuando se creó el organismo.

En este número de *Seguridad Nuclear* publicamos precisamente un artículo sobre los resultados de la comparación de los análisis de los laboratorios que realizan muestras ambientales, un ejercicio que el CSN considera esencial para el control de la calidad de la vigilancia del medio ambiente. Por otra parte, se recoge un artículo sobre el almacenamiento geológico profundo de los residuos radiactivos de alta actividad, publicado con motivo de la Conferencia Internacional del OIEA que se celebró el pasado mes de marzo en Córdoba. El contenido se completa con otros artículos sobre el proyecto de investigación Tracer, los mecanismos de formación de alteraciones en los cromosomas y la aplicación de la espectrometría gamma a la dosimetría externa.

Lucila María Ramos, Lourdes Romero y Rosario Salas\*

# Intercomparaciones analíticas en muestras ambientales. Campaña 1999

La vigilancia radiológica del medio ambiente exige un alto grado de sensibilidad en las medidas, ya que se trata de determinar niveles muy bajos de radiactividad. Para garantizar la adecuada fiabilidad de los resultados se

implantan sistemas de calidad y se aplican controles tales como ejercicios de intercomparación. En este artículo se presenta una revisión histórica de las campañas efectuadas y se analiza en detalle la de 1999.

## 1. Introducción

El sistema de vigilancia establecido en España para el control de la radiactividad ambiental está integrado fundamentalmente por dos redes, una implantada por los titulares en el entorno de las instalaciones y otra, de ámbito nacional, desarrollada por el CSN con la colaboración de laboratorios de diversas universidades y del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex). La vigilancia en la zona de influencia de las instalaciones se inició durante su construcción y se ha desarrollado en las diferentes fases de la vida de éstas; la red de vigilancia de ámbito nacional, constituida por esta-

ciones automáticas de vigilancia en continuo y estaciones de muestreo, empezó a gestionarse en 1985 ante el creciente número de instalaciones y la inminente entrada de España en la Unión Europea, y está operativa desde 1992 con la excepción de las aguas continentales, para cuya vigilancia el Cedex desarrolla un programa desde 1978.

La calidad de los resultados obtenidos en los programas de vigilancia ha constituido una preocupación constante para el CSN y los laboratorios. Ya en 1987 el Consejo desarrolló un documento sobre la garantía de calidad en estos programas, que fue analizado y discutido con los laboratorios que realizaban en ese momento medidas de la radiactividad ambiental. Posteriormente, en 1997, el Consejo solicitó a los laboratorios que colaboran en sus programas de vigilancia el desarrollo de manuales de calidad. La aplicación de sistemas de calidad que integren de forma global la estructura de la

organización, las responsabilidades, procedimientos, procesos y recursos necesarios para llevar a cabo una adecuada gestión constituye un medio eficaz para conseguir los objetivos requeridos. Para verificar que los programas de calidad establecidos se aplican adecuadamente, se introducen en los propios laboratorios controles internos y se realizan acciones externas tales como auditorías y estudios comparativos interlaboratorios.

La medida de la radiactividad ambiental presenta una problemática específica derivada de los bajos niveles a determinar; en la mayoría de los casos no es posible realizar medidas directas *in situ* ya que de este modo se obtienen límites inferiores de detección muy elevados. Para conseguir niveles aceptables de detección, es necesario tomar muestras y realizar los análisis en laboratorios de baja actividad. La obtención del resultado final implica un amplio proceso

\* L. M. Ramos es jefe del Área de Protección Radiológica del Público y del Medio Ambiente del CSN y R. Salas es técnico de dicha área. L. Romero es responsable de calidad del Laboratorio de Radiactividad Ambiental del Departamento de Impacto Ambiental de la Energía del Ciemat.

► **Tabla 1. Campañas de intercomparación.**

Campaña	Organizador	Participantes	Muestra	Análisis
1985-86	Ciemat	9	Solución acuosa sintética	$\alpha$ -T, $\beta$ -T, Co-60, Cs-137, H-3, Sr-89, Sr-90, Ra-226
1988	Ciemat	9	Sedimentos	$\alpha$ -T, $\beta$ -T, Sr-90, K-40, Co-57, Cs-137, Tl-208, Pb-212, Pb-214, Bi-214, Ac-228
			Leche en polvo	$\alpha$ -T, $\beta$ -T, Sr-90, K-40, Cs-134, Cs-137
1990	Ciemat	11	Filtros	$\alpha$ -T, $\beta$ -T, Sr-90, Co-60, Ba-133, Cs-137
		10	Sedimentos	$\alpha$ -T, $\beta$ -T, Sr-90, K-40, Cs-137, Tl-208, Pb-212, Pb-214, Bi-214, Ac-228
1991	Ciemat-CSN	13	Sedimento	$\alpha$ -T, $\beta$ -T, Sr-90, Ra-226, Cs-137, K-40, Pb-212, Pb-214, Bi-214, Ac-228
1992-1993	Ciemat-CSN	17	Solución acuosa sintética	$\alpha$ -T, $\beta$ -T, Th-234, Ra-226, U-235, Pa-234M, K-40
1994	CSN*	29	Solución acuosa sintética	$\alpha$ -T, $\beta$ -T, Sr-90, Am-241, Cd-109, Cs-137, Co-60
1995	CSN*	29	Solución acuosa sintética	$\alpha$ -T, $\beta$ -T, K-40, Ra-226, Th-230, Pb-210, U-T, U-238, U-235, U-234
		8	DTL	H* (10)
1996 (1996-1997)	CSN*	26	Sedimento	K-40, Ra-226, Ac-228, Cs-137, Sr-90, Pu-(239+240)
1998	CSN*	31	Suelo	K-40, Ra-226, Cs-137, Sr-90, Pu-(239+240)
1999	CSN*	31	Solución acuosa sintética	H-3, Sr-90, Th-230, Am-241, Cs-137, Co-60

\* Contando con el apoyo técnico del Ciemat.

que incluye la recogida y preparación de muestras representativas, análisis químico por diferentes técnicas, calibración de los equipos de medida y preparación final de la geometría adecuada para la medida según el tipo de radiación. Por tanto, la fiabilidad del resultado final no puede ser evaluada de forma simple, siendo necesario considerar las distintas etapas.

El nivel de confianza de los resultados obtenidos es función de su precisión y exactitud, y cada laboratorio debe acreditar una estimación de su magnitud en la ejecución rutinaria de los análisis. Mientras que la precisión de un resultado puede ser determinada mediante un control interno en el mismo laboratorio utilizando patrones certificados, la determinación de la exactitud requiere tareas muy específicas que pueden desarrollarse por distintos procedimientos tales como la participación en ejercicios de intercomparación.

En este contexto, el CSN viene realizando desde 1992 campañas anuales de intercomparación analítica, utilizando muestras análogas a las que se analizan en los programas de vigilancia radiológica ambiental, con la colaboración del Ciemat, que ya había llevado a cabo de modo independiente estos ejercicios desde 1985. En la mayoría de las campañas iniciales, las muestras utilizadas eran preparadas en el propio Ciemat y a partir de 1996 se han utilizado materiales de referencia.

En el presente artículo se realiza una breve exposición de los ejercicios de intercomparación llevados a cabo desde 1985 y se presenta en detalle la campaña realizada en 1999, analizándose sus resultados.

## 2. Evolución histórica de las campañas

En 1985, el Instituto de Protección Radiológica y Medio Ambiente

(Pryma) del Ciemat organizó la primera intercomparación de métodos de medida de la radiactividad, como una primera aproximación para conocer el estado del arte en los laboratorios de medida de la radiactividad en muestras ambientales y como ensayo de sus capacidades para proyectos más ambiciosos de este tipo de ejercicios [1]. Posteriormente, el Ciemat organizó dos nuevas campañas siguiendo la misma sistemática, una en 1988 [2] y otra en 1990 [3], en concordancia con la política del Consejo de Seguridad Nuclear de conocer la capacidad global de respuesta de los laboratorios españoles de medida de la radiactividad en muestras ambientales. Los ejercicios desarrollados en 1991 [4] y 1992-93 [5] contaron ya con el apoyo del Consejo, que financió este último. Desde 1994, el CSN establece y financia un programa periódico de campañas de intercomparación, encargándose de la organización administrativa de las

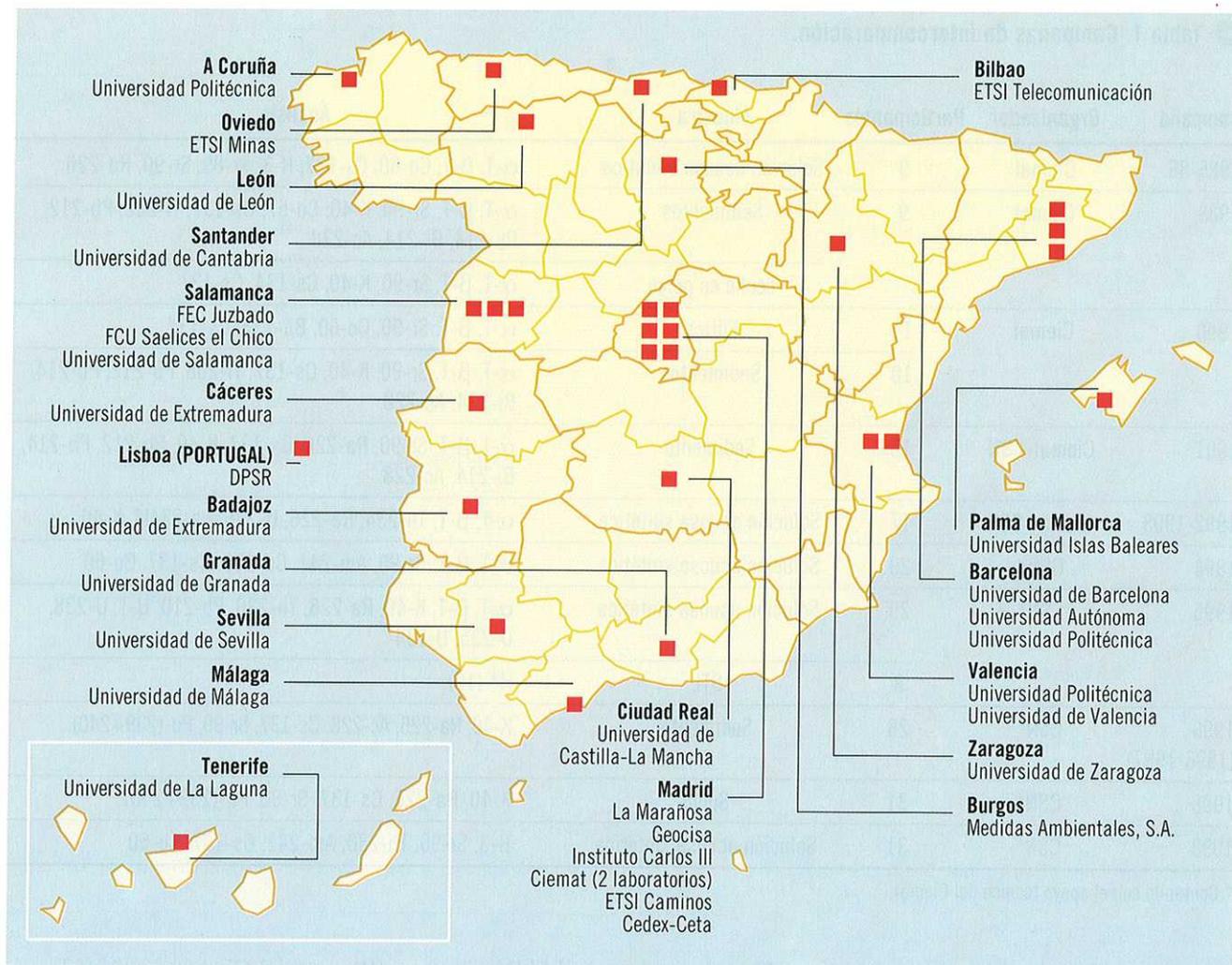


Figura 1. Laboratorios participantes en la campaña de intercomparación de 1999.

mismas y contando siempre con el apoyo técnico del Ciemat. Dentro de este nuevo periodo se han realizado ejercicios en 1994, 1995, 1996-1997, 1998 y 1999 [6, 7, 8, 9 y 10]. Además, en 1995 se llevó a cabo una campaña de intercomparación de medidas de niveles de radiación ambiental con dosímetros de termoluminiscencia [11, 12]. La participación en estas campañas ha ido aumentando a través de los años, desde los nueve laboratorios que intervinieron en las primeras hasta los 31 de las dos últimas. En la tabla 1 de la página anterior se resume para cada campaña el tipo de muestra utilizada, los análisis realizados y el número de laboratorios participantes.

Las matrices seleccionadas para este tipo de ejercicios de intercomparación son las habituales en los programas de vigilancia radiológica ambiental, bien por constituir

los medios primarios de recepción y transporte de los radionucleidos, como el aire y el agua, bien por pertenecer a la cadena alimentaria de las personas, como la leche, o por ser un medio integrador, como los suelos o sedimentos [3].

Los radionucleidos estudiados, tanto de origen natural como artificial, son también los medidos en los diferentes programas de vigilancia. En ocasiones, algunos isótopos son analizados por una minoría de los laboratorios participantes; no obstante, éstos se incluyen en los ejercicios por pertenecer a programas específicos de vigilancia. Esto ocurre, por ejemplo, con los radioisótopos del uranio, que se miden en determinados programas de vigilancia radiológica ambiental de las instalaciones del ciclo del combustible nuclear. Las concentraciones de actividad son generalmente similares a

las que se encuentran en las muestras ambientales, pero con valores tales que su determinación se pueda realizar de forma cuantitativa sin riesgo de obtener resultados inferiores a los límites de detección, que no serían de utilidad para las evaluaciones estadísticas que se realizan en estos estudios [5].

En la organización de estos ejercicios se pueden utilizar, según la guía ISO-43 [13], diferentes metodologías que tienen en común la comparación de los resultados de análisis obtenidos por un laboratorio de ensayo con los de otro u otros laboratorios. En la más utilizada se distribuyen simultáneamente a los laboratorios muestras subdivididas con un grado apropiado de homogeneidad. La concentración de actividad de los radionucleidos en las matrices utilizadas se determina por el valor más proba-

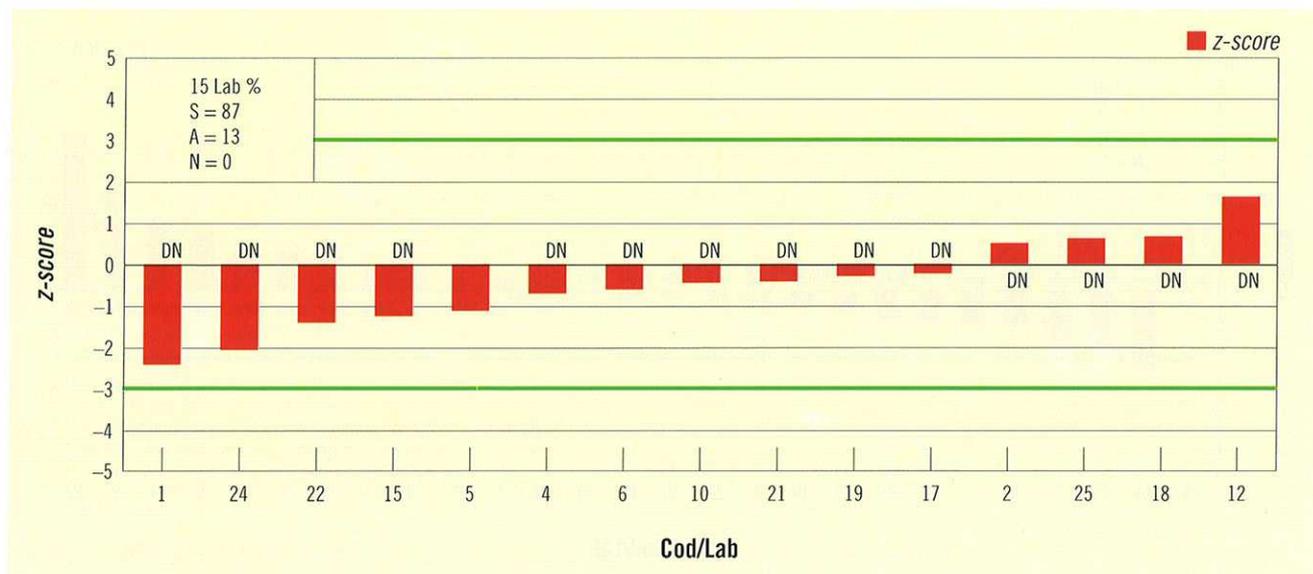


Figura 2. Valores de z obtenidos por los laboratorios participantes para H-3 en líquido.

ble a partir de los datos obtenidos por los laboratorios participantes, estudiándose las desviaciones obtenidas por los mismos. No obstante, para que este tipo de evaluación proporcione unos resultados estadísticamente fiables, es necesario disponer de un número elevado de participantes, y aún en ese caso, podrían existir desviaciones sistemáticas en los laboratorios que no se pusieran de manifiesto.

En 1993 se publicó el protocolo ISO/IUPAC/AOAC [14], basado en la guía ISO-43, donde se establece una metodología universalmente aceptada para la organización de ejercicios interlaboratorio y un procedimiento transparente de evaluación que utiliza la estadística clásica, pero sin incluir parámetros arbitrarios en la evaluación de los datos. Este protocolo recomienda la utilización de un material de referencia como muestra común y el tratamiento estadístico *z-score* (clasificación *z*) para evaluación de los resultados. La utilización de materiales de referencia permite no sólo realizar la evaluación del funcionamiento de cada laboratorio, sino también obtener una estimación de la exactitud de sus resultados, con la ventaja adicional de que el resultado de la evaluación no depende del número de participantes.

En consecuencia, la evolución en el desarrollo de las campañas ha tendido hacia el uso de materiales de referencia. En las primeras campañas las muestras de estudio se preparaban en el Ciemat, utilizándose soluciones acuosas sintéticas o matrices naturales (sedimentos) que se homogeneizaban en el laboratorio de radiactividad ambiental, aunque en algunos casos se utilizaron muestras del OIEA (filtros y leche) o muestras preparadas en el propio Ciemat a partir de patrones (agua). Tras la publicación del protocolo ISO/IUPAC/AOAC se implantó la metodología recomendada en el mismo, y en las tres últimas campañas se han utilizado materiales de referencia y se ha aplicado el método de evaluación *z-score*. En la campaña 1996-1997 la muestra de estudio fue un sedimento, material de referencia suministrado por el OIEA; la evaluación del ejercicio mostró la dificultad que presenta el análisis de este tipo de muestras, por lo que en la campaña siguiente se empleó una matriz semejante a la anterior, un suelo suministrado también por el OIEA, a fin de verificar que se habían solucionado los problemas detectados y realizar un seguimiento de las mejoras conseguidas por los laboratorios. La evaluación del ejercicio mostró una clara mejora

en la ejecución de los laboratorios, indicando que se habían identificado y resuelto muchos de los fallos anteriores; por esta razón en la siguiente campaña se cambió a una matriz líquida, dada la importancia de este medio en la transferencia de radionucleidos en el medio ambiente. La organización y evaluación de esta campaña se describe en detalle a continuación.

### 3. Campaña 1999

#### 3.1. Desarrollo de la campaña

La muestra de estudio para la campaña ha sido una matriz líquida conteniendo radionucleidos en concentraciones de actividad ambientales adecuadas a 1 litro. Dada la imposibilidad de obtener una muestra líquida ambiental representativa con valores de actividad certificados, el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes del Ciemat, laboratorio de patrones nacionales asociado al Centro Español de Metrología, preparó una solución acuosa sintética, con concentraciones de actividad certificadas de los siguientes radionucleidos: H-3, Th-230, Sr-90, Am-241, Cs-137 y Co-60 (tabla 1), según los procedimientos específicos IB-MBG-01 [15], IB-MBG-02 [16] e I-007 [17].

Las muestras se remitieron a los laboratorios participantes jun-

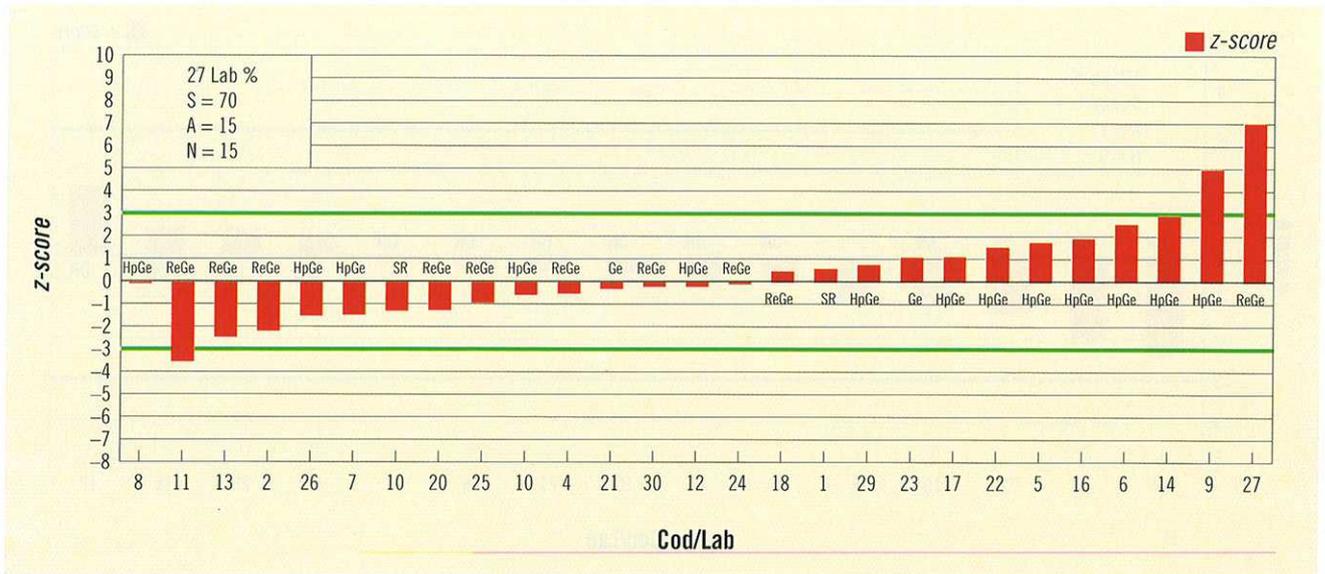


Figura 3. Valores de z obtenidos por los laboratorios participantes para Am-241 en líquido.

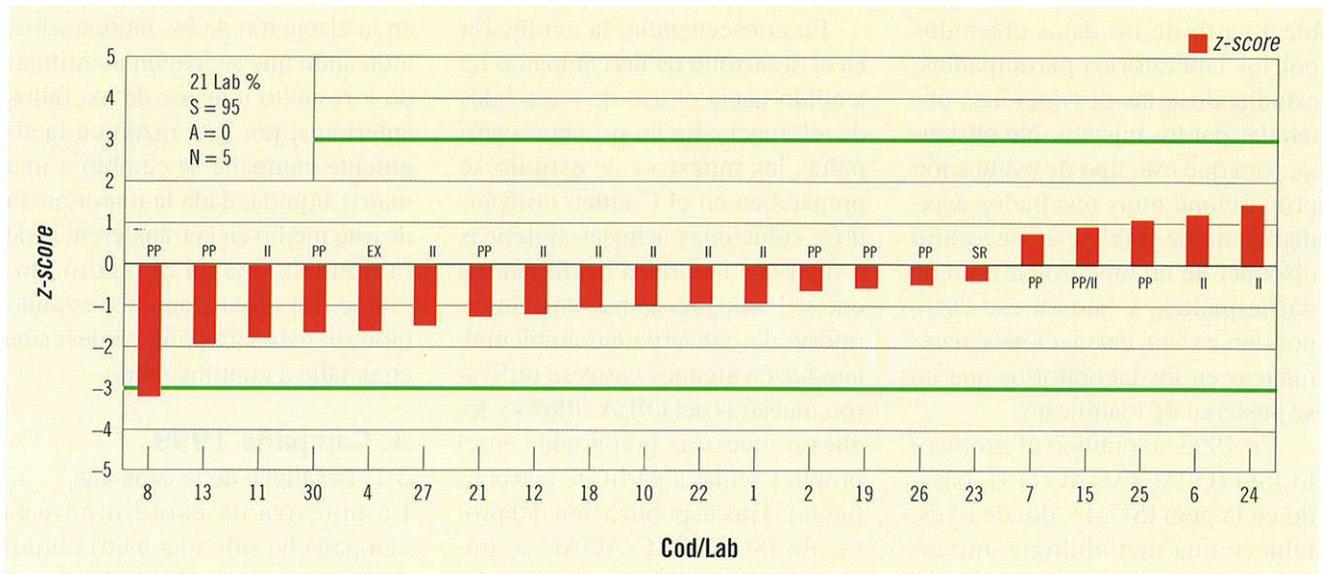


Figura 4. Valores de z obtenidos por los laboratorios participantes para Sr-90 en líquido.

to con las bases técnicas del ejercicio y un disquete con un fichero de hoja de cálculo para inclusión de los resultados. Se solicitaba la realización de una determinación para cada radionucleido utilizando los métodos habituales de análisis del laboratorio, y el envío de información relativa al método analítico, incertidumbres, sistema de medida y programa de resolución de espectros.

Enviaron resultados 30 de los 31 laboratorios participantes (figura 1). Para preservar la confidencialidad de los datos, el CSN asignó una clave secreta a cada participante, quedando así su identidad

desconocida tanto para el evaluador (Ciemat) como para el resto de participantes.

El conjunto de datos fue remitido al Ciemat donde fue normalizado y se asignaron códigos para las distintas técnicas de análisis radioquímico empleadas por los laboratorios, tratando de homogeneizar las variaciones empleadas dentro de un mismo método. Posteriormente se realizó su tratamiento estadístico y evaluación, con la clave secreta como única identificación.

### 3.2. Tratamiento de los datos

Para la evaluación del ejercicio, se ha aplicado el tratamiento de

datos *z-score*, recomendado por la ISO/IUPAC/AOAC, y que establece niveles para el grado de buen funcionamiento del laboratorio participante, utilizando la estadística clásica, pero sin incluir parámetros arbitrarios en la evaluación.

#### Formación de la clasificación z

La clasificación z se realizó por comparación de la desviación de cada laboratorio (diferencia entre su valor y el de referencia) con la desviación estándar de referencia  $\sigma$  (valor establecido como objetivo de calidad para cada análisis/radionucleido); debido a las diferentes

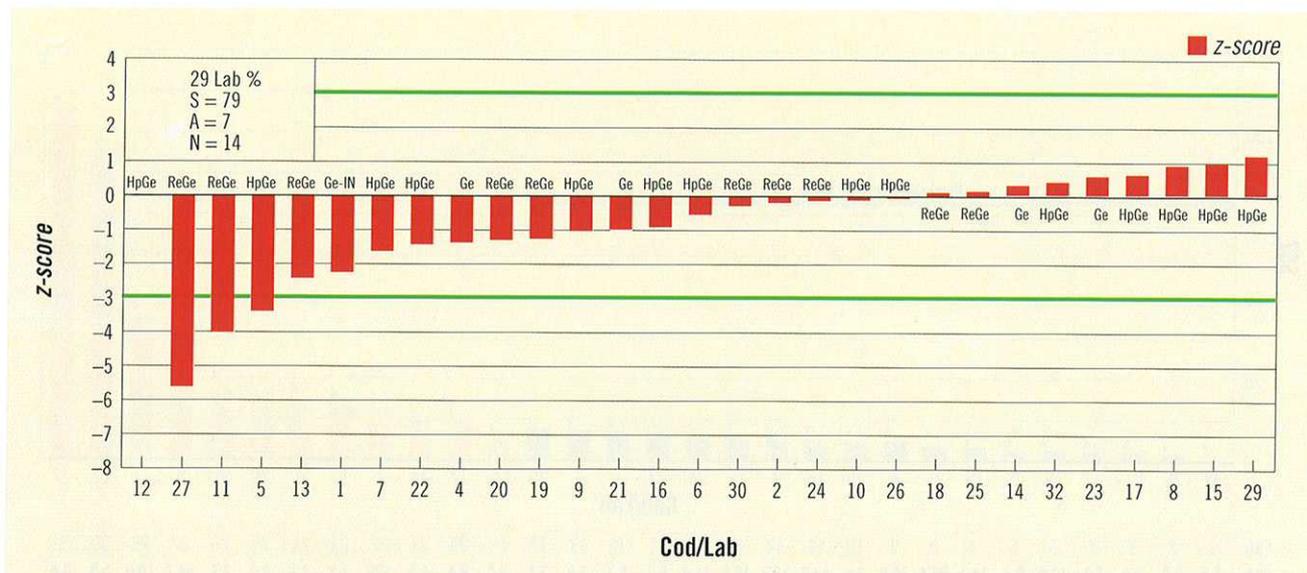


Figura 5. Valores de z obtenidos por los laboratorios participantes para Cs-137 en líquido.

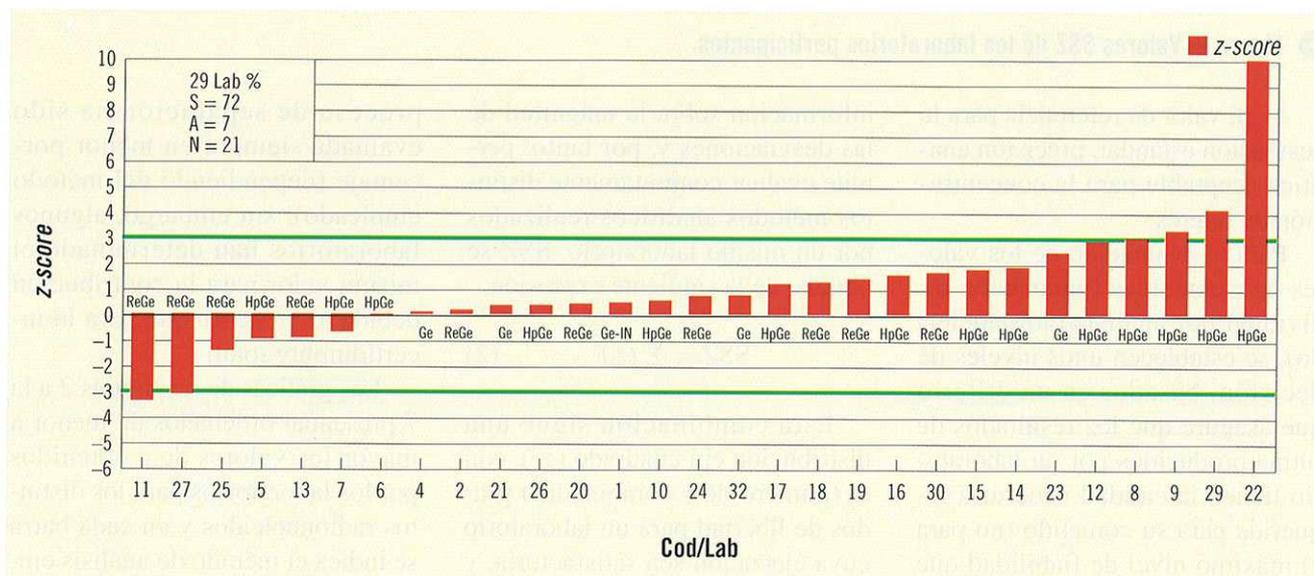


Figura 6. Valores de z obtenidos por los laboratorios participantes para Co-60 en líquido.

características de la muestra de estudio respecto a las muestras líquidas ambientales analizadas habitualmente por los laboratorios, el valor de  $\sigma$  se ha adecuado a las condiciones de un análisis no rutinario. El valor de z se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$z = (x - X) / \sigma \quad (1)$$

donde:

— x : valor de la determinación enviada por los laboratorios.

— X: valor de referencia de la actividad del radionucleido en cuestión (suministrado por el LM-RI/ Ciemat).

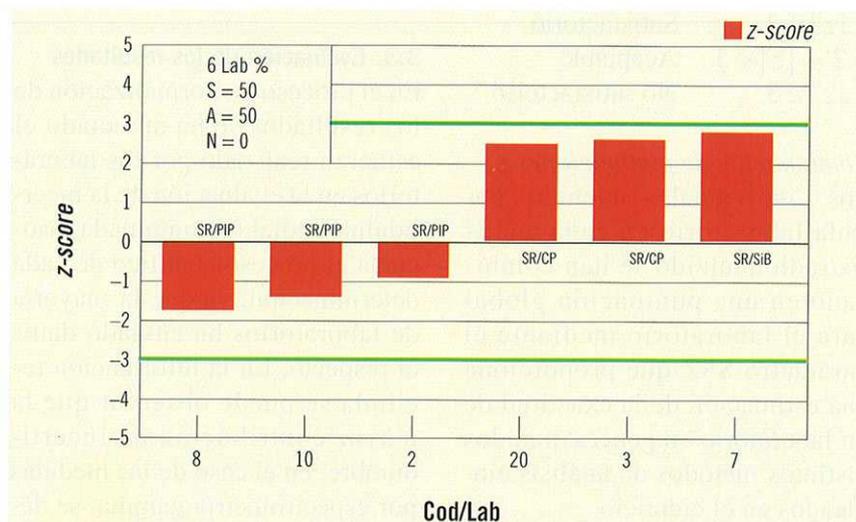


Figura 7. Valores de z obtenidos por los laboratorios participantes para Th-230 en líquido.

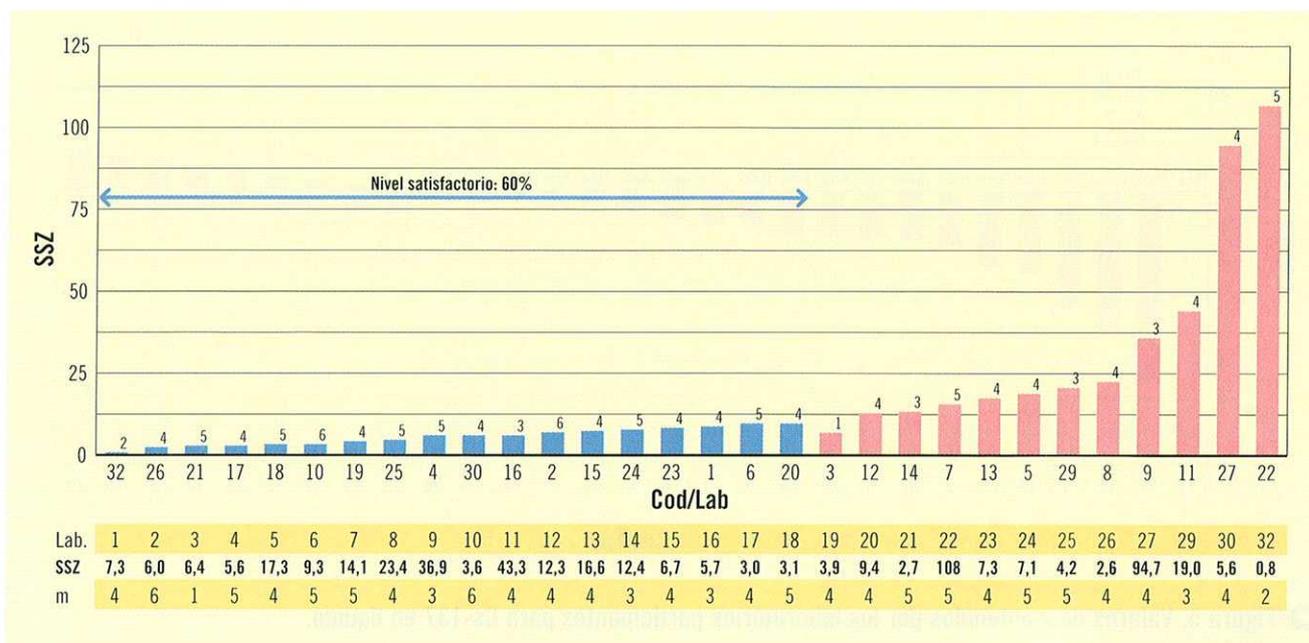


Figura 8. Valores SSZ de los laboratorios participantes.

—  $\sigma$ : valor de referencia para la desviación estándar, precisión analítica aceptable para la concentración de interés.

Para la evaluación de los valores de  $z$  obtenidos (puntuación individual por análisis/radionucleido), se establecen unos niveles de decisión, basados en un criterio que asegure que los resultados de rutina producidos por un laboratorio tienen la calidad necesaria requerida para su cometido (no para el máximo nivel de fiabilidad que el método pueda conseguir). Los criterios para  $z$  son los siguientes:

- $|z| \leq 2$  Satisfactorio
- $2 < |z| < 3$  Aceptable
- $|z| \geq 3$  No satisfactorio

*Combinación de puntuaciones z*

Los  $z$  individuales obtenidos por cada laboratorio en cada análisis/radionucleido se han combinado en una puntuación global para el laboratorio mediante el parámetro SSZ que proporciona una estimación de la exactitud de un laboratorio en general para los distintos métodos de análisis empleados en el ejercicio.

Este parámetro no considera los signos de  $z$  debido a los términos cuadráticos, con lo cual sólo aporta

información sobre la magnitud de las desviaciones y, por tanto, permite evaluar conjuntamente distintos métodos analíticos realizados por un mismo laboratorio. SSZ se obtiene de la siguiente expresión:

$$SSZ = \sum (z_i)^2 \quad (2)$$

Esta combinación sigue una distribución chi cuadrado ( $\chi^2$ ), con  $m$  (número de  $z$  combinadas) grados de libertad para un laboratorio cuya ejecución sea satisfactoria, y en consecuencia los valores obtenidos se interpretan según las tablas estadísticas  $\chi^2$ .

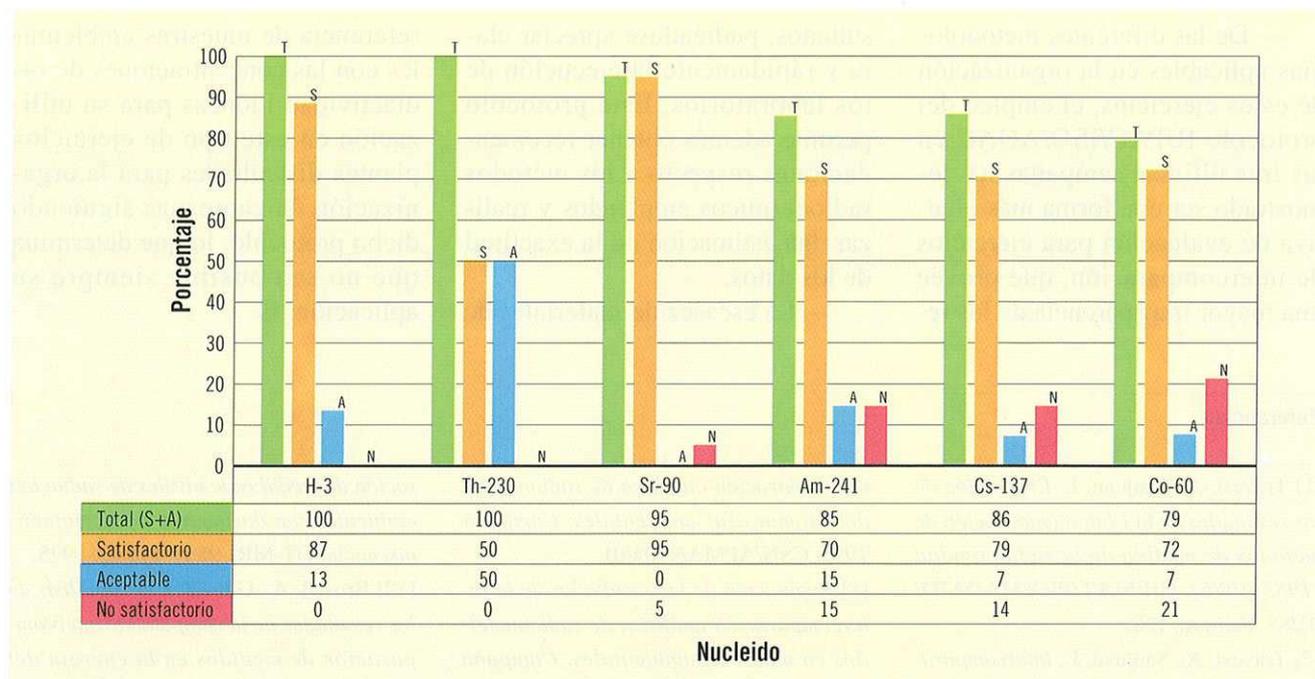
**3.3. Evaluación de los resultados**

En el proceso de normalización de los resultados se ha apreciado el esfuerzo realizado por los laboratorios en la evaluación de la incertidumbre total (o combinada) asociada al proceso analítico de cada determinación, ya que la mayoría de laboratorios ha enviado datos al respecto. En la información recibida se puede observar que la mayor contribución de incertidumbre, en el caso de las medidas por espectrometría gamma, se debe al proceso de recuento. En el caso de los análisis radioquímicos, la contribución derivada del

proceso de separación ha sido evaluada siempre en menor porcentaje (dependiendo del método empleado); sin embargo, algunos laboratorios han determinado el mismo valor para la contribución debida al recuento que para la incertidumbre total.

Las gráficas de las figuras 2 a la 7 presentan ordenados de menor a mayor los valores de  $z$  obtenidos por los laboratorios para los distintos radionucleidos y en cada barra se indica el método de análisis empleado por cada laboratorio; en ellas se puede apreciar visualmente la posición relativa de cada participante. En cada una se indica el número de laboratorios que han enviado resultados y el porcentaje que ha realizado ejecución satisfactoria (S), aceptable (A) y no satisfactoria (N). De la información facilitada en dichas gráficas se desprende que:

— En la ejecución de los análisis con separación radioquímica (H-3, Th-230 y Sr-90), no se ha observado ningún problema relevante; los resultados de los laboratorios son homogéneos, muy poco dispersos y la ejecución ha sido satisfactoria en su mayoría. En el caso del Th-230, donde la respuesta de los laboratorios ha sido escasa



► **Figura 9. Resumen de los porcentajes de ejecución de los laboratorios participantes.**

por las razones indicadas anteriormente, el porcentaje de ejecución satisfactoria ha sido del 50%.

— En las medidas por espectrometría gamma (Am-241, Cs-137 y Co-60), el porcentaje de ejecución satisfactoria ha oscilado entre el 70% y el 79%, sin embargo sorprende el mayor porcentaje de ejecución no satisfactoria en el caso del Co-60, lo que sugiere una revisión de la curva de calibración de los sistemas de medida de estos laboratorios. Asimismo, cabe resaltar que dos laboratorios han informado límites de detección elevados para Am-241 y Cs-137, respectivamente.

En la figura 8 se presentan los valores de SSZ. En la gráfica se han representado los valores obtenidos para los 30 laboratorios y en cada barra se indica el valor de *m* (numero de análisis combinados). Aplicando el nivel de probabilidad establecido, 18 de los 30 laboratorios participantes han mostrado un nivel de exactitud satisfactorio, totalizando un porcentaje del 60%, que debe considerarse como un porcentaje destacable ya que el ejercicio se ha evaluado con resultados de una única determinación por radionucleido.

Como valoración general del ejercicio para los seis radionucleidos estudiados, en la figura 9 se presenta un resumen de los porcentajes de ejecución obtenidos. Se han evaluado como ejecución aceptable entre el 79% y el 100% de los laboratorios participantes y el porcentaje de ejecución satisfactoria (excluyendo el Th-230) ha oscilado entre el 70% y el 100%, lo cual indica que los análisis radioquímicos de muestras líquidas son realizados por los laboratorios participantes en su mayoría con un nivel satisfactorio de calidad.

#### 4. Conclusiones

Como valoración global de ejercicio de intercomparación de 1999 se obtienen las siguientes conclusiones:

— La respuesta de los laboratorios ha sido mayoritaria, con una buena adecuación a las especiales bases técnicas establecidas. Respecto a las dos campañas anteriores, se ha apreciado que los participantes han realizado un esfuerzo para evaluar la incertidumbre total asociada al proceso analítico, lo cual se traduce en un mejor conocimiento del método

utilizado y en consecuencia de las posibles causas de desviación.

— Un 60% de los laboratorios ha realizado el conjunto de los análisis con un grado de exactitud satisfactorio (SSZ). Considerando individualmente cada análisis, el porcentaje de laboratorios con resultados aceptables ha oscilado entre el 79% y el 100% para los distintos radionucleidos ( $2 < |z| < 3$ ) y con resultados satisfactorios ( $|z| \leq 2$ ) entre el 70% y el 100%, (excluido el Th-230), lo cual indica que los análisis radioquímicos de muestras líquidas son realizados por la mayoría de los laboratorios participantes con un nivel satisfactorio de calidad.

Por otro lado, una valoración histórica de los resultados de estas campañas permite concluir:

— La organización periódica de ejercicios de intercomparación entre los laboratorios de medidas de baja actividad, que realizan los programas de vigilancia radiológica ambiental, ha resultado ser una herramienta muy útil para la mejora de los resultados con los años, aumentado su nivel de confianza y constituyendo, además, un medio para la actualización y depuración de los métodos de análisis.

— De las diferentes metodologías aplicables en la organización de estos ejercicios, el empleo del protocolo IUPAC/ISO/AOAC en las tres últimas campañas ha demostrado ser una forma más objetiva de evaluación para ejercicios de intercomparación, que provee una mayor transparencia de los re-

sultados, pudiéndose apreciar clara y rápidamente la ejecución de los laboratorios. Este protocolo permite además obtener recomendaciones respecto a los métodos radioquímicos empleados y realizar una estimación de la exactitud de los datos.

— La escasez de materiales de

referencia de muestras ambientales con las concentraciones de radiactividad idóneas para su utilización en este tipo de ejercicios plantea dificultades para la organización de campañas siguiendo dicho protocolo, lo que determina que no sea posible siempre su aplicación.  $\otimes$

## Referencias

- [1] Travesí, A., Sanjuan, J.: *Evaluación de los resultados de la I Intercomparación de métodos de medida de la radiactividad (1985-1986)*. CIEMAT/PRYMA/M2D/02/87. Febrero, 1987.
- [2] Travesí, A., Sanjuan, J.: *Intercomparación PRYMA-88. Evaluación de resultados de la II Intercomparación de métodos de medida de radiactividad ambiental*. CIEMAT/PRYMA/UCRE/01/89. Enero, 1989.
- [3] Travesí, A.: *Resultados obtenidos y evaluación de la III Intercomparación PRYMA-90 de métodos de medida de la radiactividad ambiental*. CIEMAT/PRYMA/UCRE/23/90. Noviembre, 1990.
- [4] Travesí, A.: *Resultados obtenidos y evaluación de la I Intercomparación CSN. IMA-91 de métodos de medida de la radiactividad ambiental*. CIEMAT/IMA/UCRE/23/91. Enero, 1992.
- [5] Travesí, A.: *Resultados y evaluación de la II Intercomparación analítica de radionucleidos en muestras ambientales CSN-Ciemat (1992-1993)*. CIEMAT/IMA/UCRE/28/93. Diciembre, 1993.
- [6] *Evaluación de los resultados de la intercomparación analítica de radionucleidos en muestras ambientales. Campaña 1994*. CSN/VIRAM/9505/06.
- [7] *Evaluación de los resultados de la intercomparación analítica de radionucleidos en muestras ambientales. Campaña 1995*. CSN/APMA/9704/01.
- [8] *Evaluación de los resultados de la intercomparación analítica de radionucleidos en muestras ambientales. Campaña 1996*. CSN/APMA/CVRA/9707/04. Y, Romero, L. *Evaluación de la intercomparación CSN/Ciemat-96 entre laboratorios nacionales de radiactividad ambiental (Sedimento lacustre)*. Informe final al CSN. CIEMAT/IMA/PIRA/07/97. Junio, 1997.
- [9] *Evaluación de los resultados de la intercomparación analítica de radionucleidos en muestras ambientales. Campaña 1998*. CSN/APMA/CVRA/9809/03. Y, Romero, L. *Evaluación de la intercomparación CSN/Ciemat-98 entre laboratorios nacionales de radiactividad ambiental (Suelo)*. Informe final al CSN. CIEMAT/DIAE/PIRA/12/98. Agosto, 1998.
- [10] *Evaluación de los resultados de la intercomparación analítica de radionucleidos en muestras ambientales. Campaña 1999*. CSN/APMA/CVRA/0001/01. Y, Romero, L. *Evaluación de la intercomparación CSN/Ciemat-99 entre laboratorios nacionales de radiactividad ambiental (Líquido)*. Informe final al CSN. CIEMAT/DIAE/PIRA/17/99. Diciembre, 1999.
- [11] Brosed, A.: *Campaña de intercomparación de medidas de niveles de radiación ambiental con dosímetros de termoluminiscencia*. DT-MRI-9504. Marzo, 1995.
- [12] Brosed, A., González, A.: *Análisis de los resultados de la campaña de intercomparación de medidas en la energía del  $^{137}\text{Cs}$  para los laboratorios de dosimetría ambiental*. DT-MRI-9603. Abril, 1996.
- [13] ISO GUIDE 43-1984(E).
- [14] Thompson, M., Wood, R.: *The international harmonized protocol for the proficiency testing of (chemical) analytical laboratories*. Pure and Applied Chemistry vol. 65, nº 9, pp. 2123-2144. IUPAC. Gran Bretaña, 1993.
- [15] *Procedimiento específico IB-MBG-01: Procedimiento para calibración de muestras radiactivas líquidas de referencia, de emisores beta-gamma, mediante recuento por centelleo en fase homogénea (Método CIEMAT-NIST)*. Ciemat, 1992.
- [16] *Procedimiento específico IB-MBG-02: Procedimiento de calibración absoluta de muestras radiactivas de referencia sólidas, de emisores beta-gamma, mediante un sistema de coincidencias 4 pi beta(CP)-gamma(NaI)*. Ciemat, 1992.
- [17] *Proceso de calibración I-007 para muestras radiactivas de referencia I-03-10 (de emisores alfa)*. Sistema de Calibración Industrial. MINER.

# El almacenamiento geológico profundo: una solución inevitable y éticamente correcta

El artículo recoge una reflexión sobre el almacenamiento geológico profundo como solución para la gestión de los residuos radiactivos de alta actividad, considerando el impacto para

las generaciones futuras. Asimismo, analiza otros posibles modelos de gestión y sus ventajas e inconvenientes respecto a un tipo de almacenamiento que el autor considera ineludible.

## 1. Introducción

Encontrar una solución al problema de los residuos radiactivos es un tema de suma importancia, no sólo para la protección del medio ambiente sino también para el futuro de la industria nuclear. Dentro de quince años, cuando se tengan que tomar las primeras decisiones sobre la sustitución de las centrales nucleares actualmente existentes, el público querrá saber cuál es la solución a este tema antes de aceptar nuevas centrales. En otras palabras, una solución aceptable en materia de gestión de los residuos nucleares es un requisito previo a cualquier posible resurgir de la energía nuclear.

Por otra parte, no parece haber necesidad de actuar con prisa, teniendo en cuenta que:

— Los volúmenes de residuos no son especialmente grandes: en el año 2020, el orden de magnitud a nivel mundial será de unos 300.000 metros cúbicos de resi-

duos de alta actividad y larga vida, y de menos de un millón de metros cúbicos de residuos de media actividad y larga vida.

— La mayor parte de los residuos ya existentes se está almacenando en condiciones seguras a la espera de una solución permanente, con algunas excepciones en los países del Este. El almacenamiento temporal en superficie o a poca profundidad es una técnica conocida y ampliamente utilizada en todo el mundo.

Descartado por motivos legales y políticos el almacenamiento definitivo a profundidad en arcillas estables en el lecho marino, existe un amplio consenso en los países afectados sobre que el almacenamiento geológico profundo constituye la única solución permanente posible, y este tema se está estudiando de forma extensa. Recientemente se ha dado un paso muy significativo en Estados Unidos: en 1998 se autorizó la operación de la Planta Piloto de Aislamiento de Residuos (Waste Isolation Pilot Plant WIPP) en Nuevo México, y a principios de 1999 se introdujeron para siempre en di-

cha instalación los primeros residuos militares de media actividad y larga vida, en una capa salina estable. Se trataba de la primera operación de este tipo en el mundo.

Los temas a considerar actualmente son los siguientes:

— ¿El almacenamiento geológico es una solución adecuada y factible?

— ¿Es una solución justa, ética y aceptable?

— ¿Es la única solución?

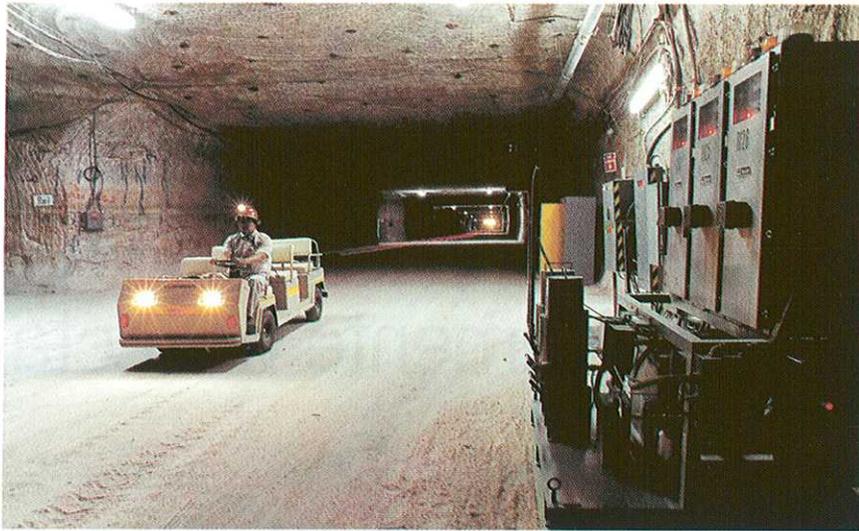
— ¿Cuándo debería demostrarse e implantarse?

El objetivo de este artículo es contribuir a responder a estas preguntas.

## 2. La solución del almacenamiento geológico profundo

El propósito del almacenamiento geológico profundo es proporcionar a las próximas generaciones, y especialmente a las que vendrán en el futuro lejano, una protección pasiva contra las liberaciones dañinas de materiales radiactivos, incluso después de perderse el recuerdo del

\* Ingeniero de Minas y ex presidente de Andra, la agencia francesa encargada de la gestión de los residuos radiactivos.



► **Figura 1.** Galerías de la Waste Isolation Pilot Plant en Nuevo México (EEUU).

almacenamiento e independientemente del conocimiento técnico de dichas generaciones.

El almacenamiento ideal estaría localizado en una zona estable y a una profundidad suficiente como para quedar protegido de las erosiones en la superficie, los grandes cambios climáticos (como, por ejemplo, una nueva era glacial), los terremotos (que son mucho menos intensos en profundidad) y la intrusión humana. Estaría ubicado en una formación impermeable, siendo las capas salinas o arcillosas sedimentarias las más adecuadas. Un encapsulado bien diseñado y suficientemente grueso, y una barrera tecnológica adicional a la geológica garantizarían la ausencia de liberaciones de radionucleidos de corta vida muy activos y peligrosos durante los primeros mil años, el periodo necesario para que se desintegraran completamente. Posteriormente, las dos barreras artificiales (el encapsulado y la barrera tecnológica) y a más largo plazo (más de 10.000 años) la barrera geológica, evitarían la liberación significativa de radionucleidos de larga vida a la biosfera en la que vivirán las generaciones del futuro.

Los elementos radiactivos remanentes tras el periodo de 1.000 años serán principalmente elementos transuránicos pesados de baja actividad (cuanto más prolongado el periodo de semidesintegración, más

baja la actividad y también algunos productos de fisión emisores beta). Ahora bien, siendo emisores alfa, estos elementos podrían provocar cánceres si se inhalaran o ingirieran en cantidades significativas. El enemigo subterráneo del almacén no es el agua en sí misma, sino el agua en circulación, capaz de lixiviar los bultos de residuos y, tras un largo proceso, llevar los elementos radiactivos a la biosfera. La solución es bastante evidente: ubicar el almacén en una formación impermeable.

Impermeable significa que la cantidad de agua en circulación en la formación geológica sea nula o muy reducida. Teniendo en cuenta que los elementos pesados en cuestión tienen un nivel de solubilidad y una movilidad en el agua muy bajos y que son fuertemente absorbidos por la formación geológica, es fácil comprender cómo y por qué un almacenamiento funciona en formaciones sedimentarias de sales (por ejemplo, WIPP) o de arcillas.

La principal cuestión es la siguiente: ¿es fiable la geología? Existen dos razones que apoyan una respuesta positiva a esta pregunta:

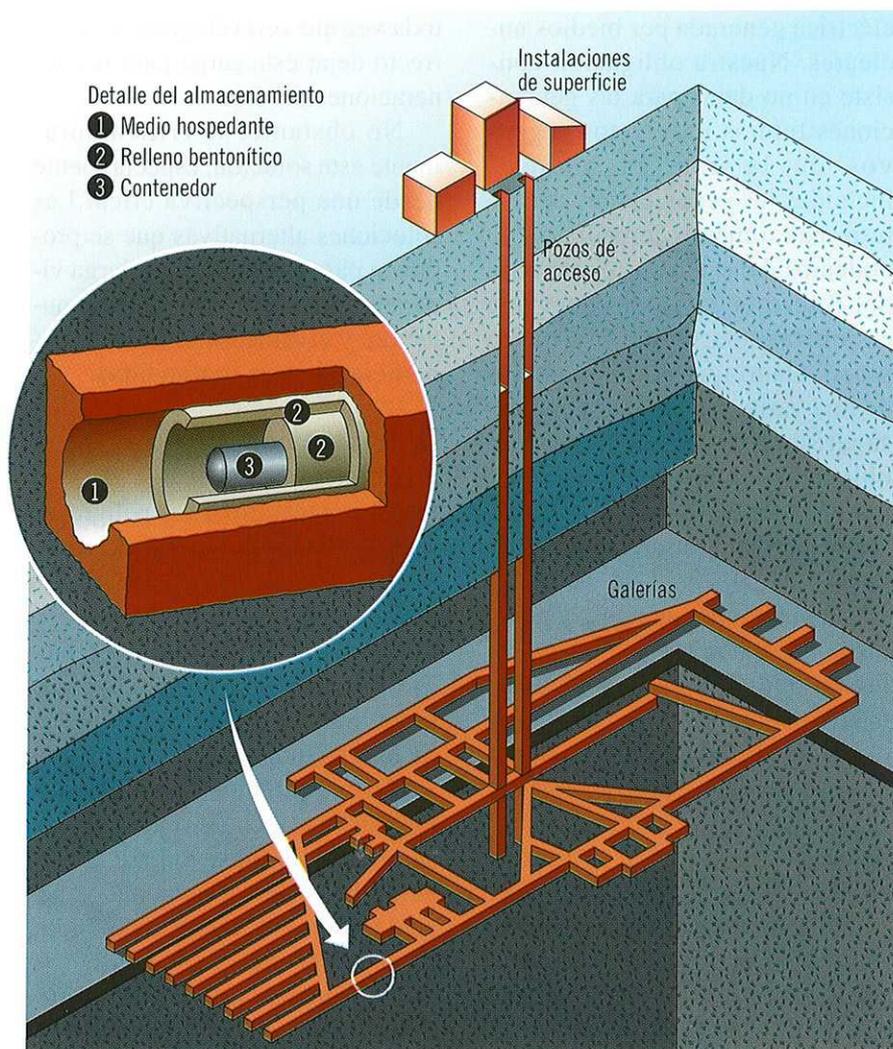
— Los análogos naturales han demostrado que en muchos casos la naturaleza ha sido capaz de sostener condiciones de impermeabilidad a lo largo de periodos muy largos. En los reactores naturales de Oklo, en Gabón, unos elementos

transuránicos han permanecido atrapados por unos pocos metros de arcilla durante dos mil millones de años. Además, existen numerosos ejemplos de elementos móviles atrapados durante millones, y a veces cientos de millones de años, por formaciones sedimentarias salinas o arcillosas, entre ellos los campos de petróleo y gas de todo el mundo.

— La estabilidad de una formación geológica a lo largo de cientos de miles de años es muy difícil de comprender para el hombre, porque la escala de tiempo geológica difiere mucho de la humana. Los cambios geológicos son generados por movimientos tectónicos, inducidos por corrientes de convección muy lentas en el manto viscoso de la Tierra. Las fallas activas próximas a la superficie son accionadas por placas que se desplazan a velocidades muy bajas y que no pueden cambiar de forma significativa en varios cientos de miles o incluso millones de años. En otras palabras, es posible prever que durante los próximos cientos de miles de años no habrá cambios significativos en la red de fallas activas en una zona sencilla y estable. Si se ubica un almacenamiento geológico en una formación que ha permanecido estable durante millones de años y que se encuentra a una distancia suficiente de las fallas activas, resulta justificado pensar que no habrá cambios en la formación en los próximos cientos de miles de años.

Además, si la geología de la formación hospedante es sencilla y estable, su modelación será sencilla y fiable, y será más fácil convencer a todos los interesados de que se ha logrado la contención pasiva de los radionucleidos de larga vida.

Algunas personas sostienen de forma entusiasta que en el futuro se podrán utilizar algunos residuos de alta actividad o de larga vida para propósitos científicos o de generación energética que no podemos imaginar actualmente, o que algún día se podrá desarrollar una forma de reducir el peligro



► Figura 2. Esquema de un almacenamiento geológico profundo (AGP).

que entrañan estos residuos. En tales casos podría ser interesante recuperar y volver a tratar los residuos. Conviene hacer unos comentarios en este sentido:

— Los residuos de media actividad (y tecnológicos), que representan el mayor volumen, están demasiado diluidos como para poder contemplar su uso o tratamiento futuro. La única posibilidad para tales residuos es un almacenamiento profundo sin la necesidad de recuperación.

— En el caso de los residuos de alta actividad y larga vida con un alto contenido de radionucleidos (por ejemplo, el combustible gastado o los residuos vitrificados) sería posible mantener las galerías del almacenamiento abiertas total o parcialmente durante algún tiempo posterior al periodo de relleno, antes de su cierre definitivo. Incluso después

del cierre de la instalación, se podría contemplar la posibilidad de recuperar los contenedores mediante técnicas mineras, siempre que se mantuviera su integridad. Lógicamente, un requisito ineludible sería que las medidas tomadas para favorecer la recuperación de los residuos no pongan en peligro la seguridad pasiva y autónoma del almacenamiento profundo a muy largo plazo.

Actualmente, el concepto de la recuperación está tan de moda que ha llegado a sustituir y a eclipsar el concepto original del almacenamiento, llevando a conclusiones erróneas y poco éticas (ver más adelante).

A lo largo de los últimos treinta años, los principales países generadores de energía eléctrica han realizado esfuerzos significativos de investigación tanto en superficie

como en laboratorios subterráneos, aunque a veces estos esfuerzos se han distribuido por un número excesivo de medios hospedantes. Lo más probable será que durante los próximos veinte años se demuestre la viabilidad de algunos proyectos de almacenamiento profundo, al igual que en el caso del WIPP, pero ¿serán aceptados estos almacenamientos por el público?

### 3. Aceptabilidad de un almacenamiento geológico profundo

Aunque ninguno de los dos sucesos tuvo que ver con los residuos nucleares, tanto Hiroshima como Chernóbil inciden con peso en la percepción pública de los riesgos asociados a este tipo de residuos.

La percepción del riesgo de los residuos radiactivos se exagera mucho, comparado con el amplio espectro de riesgos al que todo ser humano se enfrenta diariamente. La gente se asusta fácilmente cuando se le recuerda la radiactividad, independientemente de la dosis y aunque ésta sea muy inferior a la de fondo. Sin embargo, el principio de precaución no puede traducirse en una liberación nula, el riesgo cero, en ningún lugar y en ninguna actividad, incluida la nuclear.

El proceso de toma de decisiones en materia de almacenamientos es largo y difícil. Toda vez que los residuos pueden esperar, siempre se puede considerar necesaria la realización de más estudios, y a los políticos no les gusta tomar decisiones arriesgadas si cabe encontrar una buena razón para retrasarlas. La selección del emplazamiento para ubicar un almacén es asunto de interés nacional, pero siempre hay que contar con la gente del lugar, a la que hay que convencer de que el almacén es necesario y no supondrá peligro alguno para ellos ni para sus descendientes.

Por estos motivos, todo Gobierno afectado por el problema de seleccionar un emplazamiento de estas características sabe ya que tal

decisión será posible sólo después de un largo proceso, enteramente abierto, democrático y efectuado por pasos que incluyan a todos los afectados, incluidos los políticos, científicos, comunidades locales y asociaciones.

Lo principal consiste en centrar el debate público en cuestiones relevantes, utilizando argumentos honestos y de buena fe, y evitando que el proceso degenera en una especie de guerra santa. Desafortunadamente, en la mayoría de los casos el debate se centra en temas equivocados. Por ejemplo, existen numerosos aspectos científicos y técnicos complejos y difíciles de discutir, pero, quizá debido precisamente a la dificultad de tales cuestiones, los que se oponen a la idea de un almacén no quieren entrar en tales discusiones. Resulta más fácil decir, sin ofrecer ninguna demostración, que la basura nuclear constituirá un peligro para las generaciones del futuro y que la solución del almacén es poco ética. Este último argumento es tan importante que merece una discusión detallada.

#### 4. Cuestiones éticas

El aspecto ético del tema de los residuos nucleares es fundamental. ¿Qué es éticamente correcto y qué no lo es? ¿Qué clase de ayuda nos puede brindar la ética?

La regla de oro es no hacer a los demás lo que uno no quisiera que los demás le hicieran a uno. Esta regla se suele aplicar a las personas que viven en la misma época que uno, aunque se puede imaginar cómo sería igualmente aplicable a nuestros hijos y nietos. Lo que resulta mucho más difícil es concebir cómo se podría aplicar este principio a generaciones que todavía quedan tan lejanas en el futuro, que no podemos imaginar siquiera cómo será su aspecto físico. La única solución es protegerles, sean lo que sean o como sean. A largo plazo, la protección pasiva y autosuficiente es imprescindible.

Nuestra generación se beneficia de las ventajas de la energía

eléctrica generada por medios nucleares. Nuestra obligación consiste en no dejar para las generaciones futuras los efectos negativos de la energía nuclear, incluidas las generaciones del futuro más o menos inmediato. No podemos dejar a las generaciones del futuro la carga de tener que encontrar una solución a largo plazo. Dado que no disponemos de una varita mágica para que desaparezcan los residuos, nuestra obligación es no dejar el problema sin solución. No sería éticamente correcto pasarles esta patata caliente.

La obligación de nuestra generación es encontrar una buena solución que asegure la protección pasiva a largo plazo de las generaciones del futuro lejano (no dejarles esta carga) o por lo menos demostrar que se ha encontrado una buena solución y crear el consenso al respecto. También tenemos la obligación de proporcionar los recursos financieros necesarios para implantar tal solución. Este razonamiento demuestra que el único comportamiento compatible con un planteamiento ético consiste en “darse prisa poco a poco” en la selección de emplazamientos para almacenes profundos y en ir disponiendo gradualmente los fondos necesarios.

Así, el almacenamiento subterráneo parece ser una buena solución, por las siguientes razones:

— Si se ubica correctamente en una formación impermeable simple y estable, lo más probable será que se pueda demostrar su seguridad.

— El reto de la aceptación del público se podrá resolver, con toda probabilidad, si el proceso de toma de decisiones es lo suficientemente prolongado, abierto y democrático, y si se aborda por pasos.

— La protección pasiva a largo plazo ofrecida a las generaciones futuras es éticamente correcta.

— Nuestra generación se compromete a encontrar una solución,

toda vez que sería éticamente incorrecto dejar esta carga para las generaciones del futuro.

No obstante, se critica duramente esta solución, especialmente desde una perspectiva ética. Las soluciones alternativas que se proponen para los residuos de larga vida son la separación y la transmutación, y el almacenamiento en superficie o a poca profundidad.

#### 5. Separación y transmutación

Intentar transformar los peligrosos radionucleidos de larga vida en elementos de corta vida o estables es una idea lógica. En efecto, es posible incinerar o transmutar los átomos pesados de los elementos de larga vida en reactores rápidos e, incluso, en reactores de agua a presión o en ebullición. También existen nuevos tipos de reactores que se podrían emplear para este fin, como los sistemas accionados por aceleradores. Sin embargo, sigue habiendo muchos problemas:

— Antes de transmutar un elemento en un reactor es necesaria su separación. Por lo tanto, el uso de técnicas de reprocesamiento, e incluso de tecnologías de reprocesamiento avanzadas, seguiría siendo una necesidad. Es ilógico que haya personas decididamente opuestas al reprocesamiento y a favor de la transmutación.

— Serían necesarias enormes inversiones; por ejemplo, se necesitaría un reactor rápido por cada cuatro centrales nucleares. Sin embargo, va en aumento la tendencia a realizar menores esfuerzos en el desarrollo de la tecnología de este tipo de reactores (por ejemplo, el cierre del Super Phénix).

— Al igual que cualquier otro proceso industrial, el rendimiento de la transmutación/ incineración no puede llegar al 100%, por razones técnicas (todos los procesos son del tipo de periodo de semideintegración) y económicas. El proceso tarda su tiempo en un reactor y no llega a completarse nunca:

diez años en el reactor da una tasa de destrucción del 90%. No se transforman todos los elementos.

— La transmutación/incineración genera sus propios residuos y sus propios riesgos para los trabajadores.

— Los sistemas accionados por aceleradores están todavía en una temprana etapa de investigación, previa a la demostración de su viabilidad. Sería necesario un esfuerzo prolongado y costoso para demostrar la superación de todas las dificultades técnicas. La observación anterior sobre lo incompleto de la transformación sería igualmente válida para este tipo de reactor.

Así, parece que la separación y transmutación:

— Requerirían enormes inversiones, tanto en investigación fundamental como en el desarrollo de instalaciones industriales.

— Requerirían décadas de esfuerzo continuo y costoso, sin garantías de éxito.

— No serían de aplicación a los residuos diluidos (media actividad), que representan el volumen más importante de los residuos de larga vida.

— No ofrecerían un rendimiento del 100%, aunque se aplicara una técnica de éxito.

— No podrían utilizarse para algunos residuos ya existentes y ya empacutados.

Por lo tanto, esta técnica no podría pretender hacer prescindible un almacenamiento subterráneo. Tras unos esfuerzos científicos y técnicos muy prolongados y costosos, la separación y la transmutación podrían, en todo caso, proporcionar una solución parcial en el caso de los residuos de larga vida y cambiar, acaso, el tipo de residuos en el almacenamiento profundo, así como su riesgo. Se podría reducir el volumen y la actividad de los residuos, pero nunca a cero. Todavía sería necesario contar con un almacenamiento geológico profundo. Así, la separación y la transmutación no constituyen una solución alternativa al almacenamiento profundo, sino sólo una solución complementaria.

No obstante el gran interés científico de tales temas, se hace ineludible plantear la cuestión de la efectividad económica del esfuerzo requerido para transformar parcialmente el 0,3% del combustible gastado.

## 6. Almacenamiento en superficie o a poca profundidad

Para los residuos de media actividad no existe otra solución que el

almacenamiento profundo, por lo que no habría necesidad de retraso alguno una vez que tal almacenamiento estuviera disponible. Mientras tanto, este tipo de residuos se almacena en superficie.

Los residuos de alta actividad y larga vida (combustible gastado y residuos vitrificados) contienen una mezcla de nucleidos de corta vida y alta actividad (productores de calor) y de nucleidos de larga vida emisores de partículas alfa. Con el fin de evitar alteraciones en la barrera tecnológica o geológica que rodea a los residuos bajo tierra, debidas a la temperatura, es necesario almacenar los bultos en superficie durante varias décadas (50 años o más) para permitir que la temperatura se reduzca antes de introducirlos bajo tierra. En todos los casos se requiere el almacenamiento en superficie (o a poca profundidad) como solución temporal.

Sin embargo, en la actualidad algunas personas vislumbran el almacenamiento en superficie como solución a largo plazo al problema de los residuos de larga vida. Hasta se ha utilizado la curiosa expresión *almacenamiento perpetuo en superficie* en conferencias oficiales. ¿Qué sucede con tal uso erróneo del término almacenamiento?

Las razones que se suelen utilizar para defender la idea del *almacenamiento perpetuo* son las siguientes:

— Para asegurar la capacidad de recuperar los residuos, es mejor guardarlos donde estén accesibles en todo momento.

— Es más fácil revisar continuamente la seguridad de los bultos si están a la vista, donde no pueden ser olvidados.

— Para que una solución sea públicamente aceptable, los residuos deben permanecer accesibles y en un lugar donde se puedan monitorizar. Así, las generaciones del futuro tendrían la oportunidad de abordar el problema cuando se encuentre una mejor solución.



► Figura 3. Almacenamiento de residuos de alta vitrificados en Marcoule (Francia).

— Lo correcto, desde el punto de vista de la ética, es no imponer ahora a las generaciones futuras una solución (el almacenamiento profundo) sino dejarles la libertad de elegir una solución en el futuro, cuando la ciencia ofrezca mejores garantías.

Estas justificaciones son erróneas. Las trataré una por una.

El concepto de la recuperación se ha enfatizado en su mayor parte, inicialmente por los políticos, quienes pensaban que sería mejor demostrar al público que todo se llevaría a cabo paso a paso y que se aprovecharían los posibles avances científicos del futuro. La respuesta se ha dado ya: la recuperación se podrá mantener durante algún tiempo, pero en algún momento se tendrá que producir el cierre definitivo para poder asegurar la protección pasiva a largo plazo. Decidir cuál será el periodo que debe dejarse antes de ese cierre definitivo será responsabilidad de las siguientes generaciones. De cualquier manera, seguirá siendo posible recuperar los residuos tras el cierre definitivo.

Hay algo de contradictorio en la idea de que la ciencia proporcionará algún día una solución maravillosa, pero que de momento no se puede confiar en su capacidad de demostrar la seguridad de un almacenamiento bien emplazado.

Es posible y seguro guardar los residuos en una instalación de almacenamiento en superficie durante un periodo prolongado, cien años o más, pero no sería razonable mantenerlos en tal situación de forma indefinida, toda vez que esto supondría la necesidad de una monitorización y de un mantenimiento continuos. ¿Qué instituciones se encargarán de los residuos dentro de mil o diez mil años? ¿Cómo podemos fiarnos de unas civilizaciones que ni siquiera podemos imaginar? La monitorización segura de los residuos almacenados es concebible durante un periodo limitado, pero no de forma indefinida.

Además, dejar los residuos en los emplazamientos de las centrales nucleares es aún menos razonable, porque guardar unos residuos peligrosos en numerosos lugares (más de 70, sólo en Estados Unidos) aumenta el riesgo de un uso o gestión indebidos. Frente a esto, el riesgo de transportar los residuos a un emplazamiento centralizado parece mucho más reducido. Además, el riesgo del transporte es igual para una instalación centralizada de almacenamiento provisional que para un almacenamiento profundo.

Dejar los residuos en la superficie significaría dejar para las generaciones del futuro toda la carga de su gestión, sin ofrecerles una solución viable. El almacenamiento en superficie (o a poca profundidad) se debe considerar una solución temporal, y no puede sustituir a la solución definitiva inevitable: el almacenamiento profundo. Esta última solución es la única que ofrece una protección pasiva para las generaciones del futuro lejano, sea cual sea su civilización. El propósito del almacenamiento profundo no es el de dejar los residuos bajo tierra y olvidarnos de ellos. Todo lo contrario, se trata de emplazar los residuos en un lugar seguro donde seguirán siendo inocuos incluso después de haberse olvidado.

## 7. Conclusiones

A veces resulta difícil comprender cómo se pueden sostener opiniones tan divergentes sobre tales asuntos. La radiactividad es, sin lugar a dudas, un tema polémico, pero hay otras razones.

La industria nuclear encuentra dificultades a la hora de explicar los temas técnicos que maneja, y los distintos errores que ha cometido en el pasado en materia de comunicación le han restado credibilidad. A los científicos les encanta recibir fondos para investigar proyectos muy interesantes a largo plazo. El objetivo de los grupos antinucleares es combatir enérgicamente el concepto del almacenamiento pro-

fundo utilizando todos los medios disponibles, para poder decir dentro de quince años que la industria nuclear no ha sido capaz de encontrar una solución al problema del almacenamiento de sus residuos, que esto es un tema de enorme importancia y que por tanto no sería razonable renovar el parque nuclear existente.

Con vistas a aclarar el debate, la conclusión se puede resumir en las siguientes manifestaciones:

— El almacenamiento geológico profundo es la única solución éticamente correcta a largo plazo y que proporciona una protección pasiva para las generaciones del futuro. Permite recuperar los residuos, si fuera necesario, durante algún tiempo previo al cierre definitivo. En todos los casos, el almacenamiento profundo es una solución ineludible. La separación y la transmutación podrían ser una solución parcial, pero muy costosa. Podrían constituir una solución complementaria a un almacenamiento profundo.

— El almacenamiento en superficie o a poca profundidad es una solución provisional y nunca podría considerarse permanente. La opción de no hacer nada, es decir, dejar los residuos esparcidos de forma indefinida en instalaciones de almacenamiento en superficie, es éticamente inaceptable. Nuestra generación debe demostrar que existe una solución que permita asegurar la protección pasiva de las generaciones del futuro de los residuos nucleares.

— Nuestra generación debe proporcionar la financiación, realizar todos los estudios y crear un consenso para demostrar la viabilidad de los almacenamientos profundos. Nuestros hijos tendrán la responsabilidad de tomar la decisión sobre su implantación o no. Nuestros nietos serán los responsables de mantenerlos abiertos durante un determinado periodo y, luego, de cerrarlos para asegurar la protección pasiva a largo plazo. 

# El proyecto Tracer: aplicación del código Corvel en ríos y embalses

En el artículo se describen los principales experimentos desarrollados en este proyecto, cuyo objetivo es adaptar el código Corvel en

los sistemas hidrológicos que podrían verse afectados por un vertido accidental procedente de una central nuclear.

## 1. Introducción

En julio de 1997, el CSN, la Universidad Complutense de Madrid (UCM), Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas, y el Cedex (Área de Aplicaciones Isotópicas) formalizaron un acuerdo específico de colaboración cuyo objeto era la realización del proyecto Tracer. El objetivo de este proyecto de investigación es amplio, proponiéndose la calibración en ríos y embalses del código Corvel. Este código se desarrolló entre los años 1994 y 1996 gracias a una beca de formación del CSN desarrollada dentro del Área de Ciencias de la Tierra (Subdirección de Tecnología Nuclear), impulsándose en 1997 la calibración del mismo dentro de Tracer [1].

Corvel permite realizar el cálculo de concentraciones en tiempo real de radioisótopos contenidos en vertidos líquidos accidentales a lo largo de las aguas superficiales que

los transportan. Para que el código Corvel sea completamente operativo y, sobre todo, garantice la fiabilidad exigible, ha sido necesario adaptar y calibrar sus parámetros de entrada y sus modelos de resolución en todos y cada uno de los sistemas hidrológicos relacionados con las centrales nucleares españolas. Esta calibración es uno de los objetivos del proyecto Tracer, siendo las zonas de aplicación aquellos sistemas hidrológicos que podrían ser afectados por un hipotético vertido accidental procedente de una central nuclear.

La calibración del código Corvel se ha realizado en tramos de río para cuantificar la longitud de mezcla, los coeficientes de dispersión longitudinal y los tiempos de tránsito, utilizando trazadores no radiactivos. En el caso de los embalses se han determinado perfiles verticales de densidad, así como la densidad media del agua de entrada al embalse, lo cual permite identificar el grado de homogeneidad horizontal de la densidad del agua embalsada y, de esta manera, detectar posibles corrientes preferentes en superficie o en profundidad.

El objetivo final del proyecto Tracer es dotar al CSN de una he-

rramienta, completamente operativa y optimizada, para su utilización en situaciones de hipotéticas emergencias y en tiempo real.

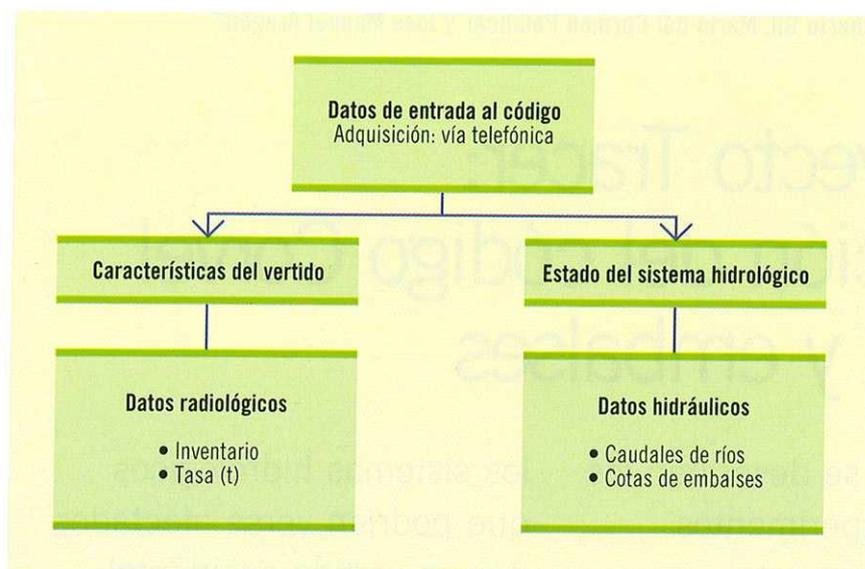
## 2. El código Corvel

El código Corvel (cálculo de concentraciones en tiempo real de radioisótopos contenidos en vertidos líquidos accidentales en aguas superficiales) realiza predicciones en forma de curvas concentración-tiempo de la evolución longitudinal de vertidos líquidos en medio hídricos superficiales. Este código fue elaborado en el Departamento de Ingeniería Química [2] de la UCM como principal objetivo de una beca de formación dotada por el Consejo de Seguridad Nuclear (septiembre 1994 a septiembre de 1996).

El código Corvel está estructurado en tres bloques que cumplen las funciones siguientes: base de datos, modelación y cálculo, y presentación de resultados.

La base de datos almacena características hidráulicas e hidrológicas de ríos y embalses, hojas de operación de embalses, datos meteorológicos y, en general, todo el análisis correspondiente a los datos experimentales disponibles.

\* F. Sánchez, M.C. Palancar y J.M. Aragón pertenecen al Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid. R. Gil es técnico del Área de Ciencias de la Tierra del CSN y coordinador del proyecto Tracer.



● Figura 1. Adquisición de datos de entrada al código Corvel.

El bloque de modelación se constituye con diferentes modelos físico-matemáticos del transporte y mezcla en sistemas hidrológicos, así como con las herramientas de cálculo que se precisan para determinar los parámetros necesarios para la caracterización hidráulica y dispersante de los medios considerados.

Corvel realiza predicciones de curvas concentración-tiempo para emisiones con tasa de vertido variable. El posterior análisis de estas predicciones permite conocer el tiempo de llegada del frente, el tiempo de tránsito o duración de la exposición, la concentración de actividad máxima y el tiempo a que se produce, así como el error asociado a la predicción.

El código Corvel fue diseñado para suministrar dos tipos de información seleccionables por el usuario: información de uso inmediato y/o información de análisis de eventos. En el primero de los casos, la información es la estrictamente necesaria para la toma de decisiones en circunstancias accidentales; en el segundo, la información es mucho más abundante y permite un estudio más detallado del vertido y sus posibles consecuencias. Independientemente de la opción elegida, la presentación de resultados se realiza mediante

informes, gráficas, tablas y archivos de datos. Las diferentes opciones presentadas están orientadas a facilitar al usuario las tareas de análisis, comparación e interpretación de resultados.

Una ventaja adicional del código Corvel, que se mantuvo como principio de diseño desde su concepción, consiste en demandar poca información al usuario (figura 1), lo que permite su ejecución en tiempo real.

### 3. El proyecto Tracer

Los sistemas modelizados por el código Corvel son medios naturales con características hidráulicas, hidrológicas y dispersantes particulares poco estudiadas previamente, variables y afectadas por un gran número de factores. Este conjunto de circunstancias mostró la necesidad de calibrar y adaptar el código Corvel a cada sistema en concreto para poder asegurar su operatividad y, sobre todo, para garantizar la fiabilidad exigible a una herramienta de este tipo. Esta necesidad de calibrado y adaptación fue la causa de que el 1 de agosto de 1997 se firmara un acuerdo específico entre el CSN, Cedex y la UCM para la realización de un proyecto de investigación denominado Tracer (calibración en ríos y embalses del código Corvel, para el cálculo de concen-

traciones en tiempo real de radioisótopos contenidos en vertidos líquidos accidentales). Durante los dos años de duración del acuerdo se han estudiado los sistemas hidrológicos en los que se encuentran emplazadas las centrales nucleares de Trillo, José Cabrera, Almaraz, Santa María de Garoña, Cofrentes y Ascó.

Las actividades que se contemplan en las especificaciones técnicas del proyecto Tracer son las siguientes:

— Caracterización hidrológica e hidráulica de los sistemas hidrológicos objeto de estudio.

— Realización de medidas de campo en ríos y embalses.

— Adaptación del código Corvel.

#### 3.1. Sistemas hidrológicos objeto de estudio

La figura 2 delimita los tramos de sistemas hidrológicos estudiados y las cuencas de los ríos en que se encuentran emplazados.

La zona de influencia de las centrales nucleares de Trillo y José Cabrera se encuentra situada en la cuenca del río Tajo y abarca un sistema hidrológico de cierta complejidad (figura 3) que incluye un tramo de río de libre circulación (entre la presa del embalse de La Ermita y la cola del embalse Entrepeñas) y cuatro embalses: Entrepeñas, Bolarque, Zorita Hidráulica y Almoguera. Además, el embalse de Bolarque recibe aportes significativos del embalse de Buendía y está conectado, mediante la central hidráulica reversible Bolarque II, con el embalse de La Bujeda, donde se inicia el trasvase Tajo-Segura. La figura 3 contiene un esquema del sistema hidrológico, así como los emplazamientos de las centrales nucleares, señalados por triángulos de color rojo.

La central nuclear de Almaraz utiliza en su ciclo de refrigeración el agua del embalse de Arrocampo, y éste avena en el embalse de Torrejón-Tajo.

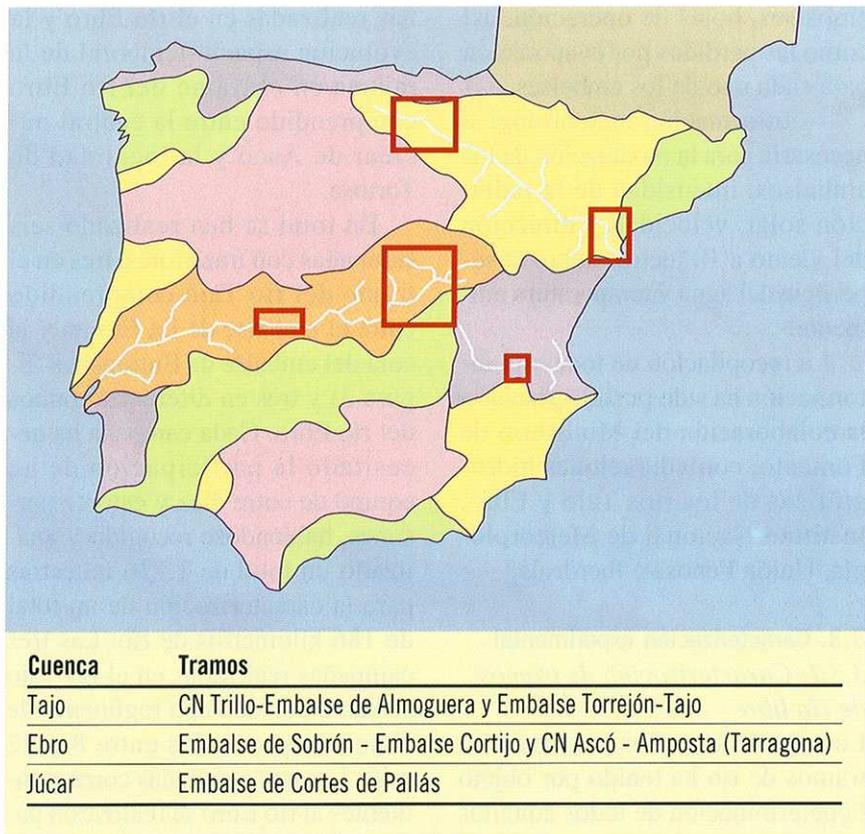
En la cuenca del río Ebro se encuentran emplazadas dos centrales nucleares, Santa María de Garoña y Ascó. La central nuclear de Santa María de Garoña, emplazada en la cola del embalse de Sobrón, utiliza el agua del propio embalse en su ciclo de refrigeración. El agua turbinada por la central hidráulica del mismo nombre discurre a través de dos embalses más, situados aguas abajo de Sobrón, los embalses constituidos por la presa de Puentelarrá y por el Dique del Ebro. Desde este punto, y hasta el embalse de El Cortijo, existe un tramo de río de flujo regulado, que también ha sido objeto de estudio en el proyecto Tracer. Aguas abajo de este emplazamiento se ha estudiado otro tramo del río Ebro, el tramo correspondiente a la zona de influencia de la central nuclear de Ascó. El estado de flujo del río entre la localidad de Ascó y su desembocadura en Amposta está regulado por la operación del embalse de Flix y por el Azud de Cherta, del que parten los dos canales de riego más importantes del bajo Ebro.

La central nuclear de Cofrentes se encuentra emplazada en la cuenca del río Júcar, más concretamente a orillas del embalse de Embarcaderos, que en la actualidad forma un solo cuerpo con el embalse Cortes de Pallás.

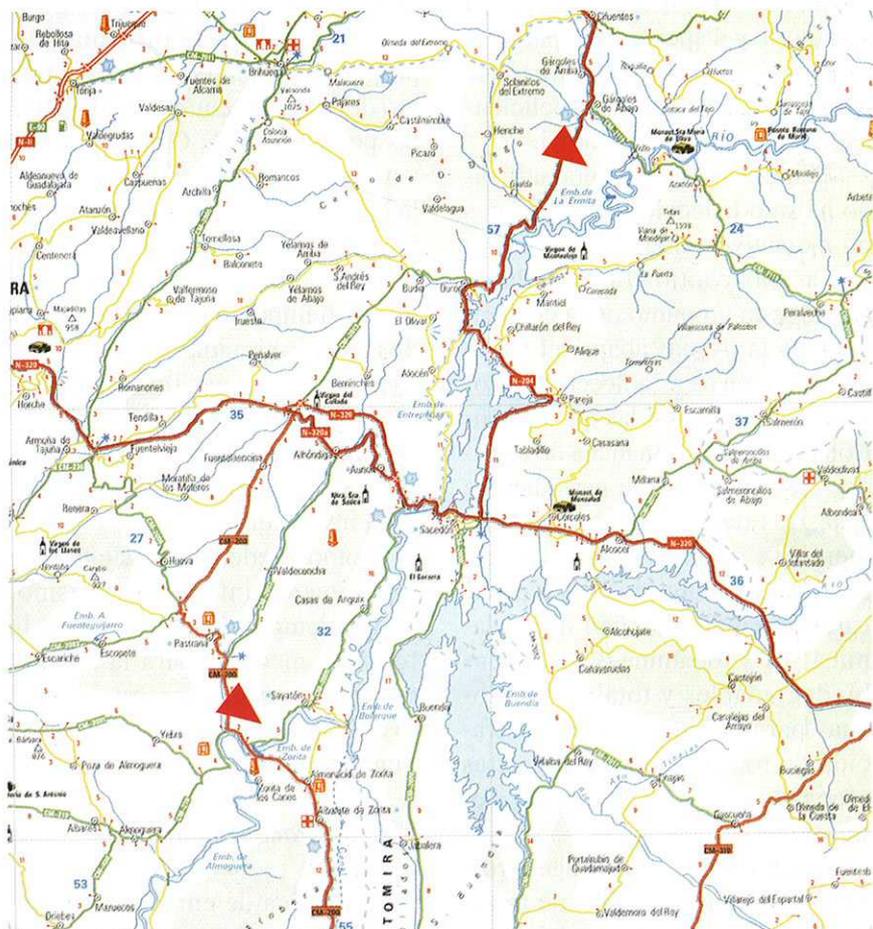
**3.2. Caracterización hidrológica e hidráulica**

La caracterización hidrológica e hidráulica de los medios estudiados ha hecho necesario recabar información sobre los siguientes aspectos:

- Datos de aforos mecánicos y curvas de gasto en estaciones de aforo ubicadas en los tramos de río estudiados o en puntos próximos a éstos.
- Planos detallados de las zonas objeto de estudio.
- Planos y especificaciones de presas y vasos de embalses, curvas de capacidad y superficie libre de



► Figura 2. Situación de los sistemas hidrológicos estudiados.



► Figura 3. Emplazamientos hidrológicos de las centrales de Trillo y José Cabrera.

embalses, hojas de operación, así como las pérdidas por evaporación para cada uno de los embalses.

— Información meteorológica necesaria para la modelación de los embalses: intensidad de la radiación solar, velocidad y dirección del viento a 10 metros sobre la superficie del agua y temperatura ambiente.

La recopilación de toda esta información ha sido posible gracias a la colaboración del Ministerio de Fomento, confederaciones hidrográficas de los ríos Tajo y Ebro, Instituto Nacional de Meteorología, Unión Fenosa e Iberdrola.

### 3.3. Caracterización experimental

#### 3.3.1. Caracterización de tramos de río libre

La experimentación realizada en tramos de río ha tenido por objeto la determinación de todos aquellos parámetros necesarios para caracterizar la dinámica del flujo de agua, en especial los aspectos relacionados con su capacidad de transporte y dispersión. El parámetro más significativo de entre todos los analizados ha sido el coeficiente de dispersión longitudinal.

El método experimental utilizado ha sido la técnica de trazadores no radiactivos, que consiste en inyectar una cantidad conocida de trazador en un punto de la corriente de agua. Aguas abajo del punto de inyección se establecen estaciones de muestreo en las que se controla el paso de la mancha de trazador mediante la toma periódica de muestras de agua que, posteriormente, se analizan en el laboratorio. Los trazadores utilizados en las campañas realizadas han sido rodamina WT y rodamina B, sustancias biodegradables y totalmente inocuas para la biota. La concentración de rodamina en las muestras recogidas se ha determinado por fluorimetría.

Las figuras 4 y 5 recogen, respectivamente, la mancha de trazador en las proximidades del punto de inyección en una de las campa-

ñas realizadas en el río Ebro y la evolución espacio-temporal de la misma en el tramo del río Ebro comprendido entre la central nuclear de Ascó y la localidad de Tortosa.

En total se han realizado seis campañas con trazadores, tres en el tramo del río Tajo comprendido entre el embalse de La Ermita y la cola del embalse de Entrepeñas (figura 3) y tres en diferentes tramos del río Ebro. Cada campaña ha necesitado la participación de un equipo de entre diez y catorce personas, habiéndose recogido y analizado un total de 1.736 muestras para la caracterización de un total de 186 kilómetros de río. Las tres campañas realizadas en el río Tajo se han efectuado con regímenes de flujo comprendidos entre 8 y 32 m<sup>3</sup>/s. Las tres campañas correspondientes al río Ebro se realizaron para un único régimen de flujo.

Las curvas recogidas en la figura 5 son el resultado de un ensayo con inyección de trazador aguas abajo de Ascó. La información proporcionada indica que en el tramo del río Ebro comprendido entre las poblaciones de García y Miravet, de 16,4 kilómetros de longitud, la concentración de trazador máxima se reduce en un 65%, debido a la dispersión y dilución, mientras que el tiempo de llegada aumenta desde aproximadamente cinco a siete horas. Así, en Tortosa la concentración máxima de trazador se reduce en un 85% y ésta se detecta a partir de las 30 horas de producirse la inyección.

Como puede verse, este tipo de experimento informa, asimismo, de los tiempos disponibles para la toma de medidas para la mitigación de consecuencias, así como de los tiempos de exposición en cada punto concreto.

#### 3.3.2. Caracterización de embalses

La dinámica de embalses de tipo monomítico [3], tipo al que pertenecen los embalses objeto de estu-

dio, se caracteriza por la existencia de un ciclo térmico anual que presenta dos estados extremos. Durante los meses de invierno y los comienzos de la primavera, el embalse presenta un estado vertical homogéneo y las propiedades del agua se mantienen uniformes en toda la masa del embalse. A medida que avanza la primavera, y más intensamente en los meses de verano, el intercambio de calor con la atmósfera origina un estado estratificado durante el cual las propiedades del agua presentan perfiles térmicos del tipo mostrado en la figura 6. En la columna de agua se pueden diferenciar tres zonas: epilimnion, metalimnion e hipolimnion.

La caracterización dinámica de un embalse exige conocer al menos los siguientes factores:

— Periodos de tiempo en los que el embalse permanece en régimen de mezcla completa o estratificación.

— Espesor y coeficientes de difusión de las distintas láminas de agua que aparecen en el estado estratificado.

Además de este proceso dinámico debido al ciclo anual, el agua del embalse está sometida a procesos de advección, dilución y difusión, que producen una variación de las propiedades del medio en la dirección longitudinal del embalse.

La caracterización experimental de embalses se ha realizado a partir de perfiles termoconductivimétricos verticales, que permiten conocer las variaciones que se producen en la temperatura y la concentración salina y, por tanto, la variación de la densidad del agua con la profundidad.

Estas medidas se han realizado desde puntos singulares como presas o puentes en todos los embalses englobados en el proyecto Tracer. En los embalses de Entrepeñas, Bolarque, Zorita Hidráulica y Almoquera, esta caracterización se ha visto completada con estudios horizontales realizados desde una embarcación, que han permitido la

toma de medidas experimentales a lo largo y ancho de la masa de agua contenida en el vaso del embalse.

Se han realizado un total de 72 campañas de medidas que han dado lugar a una base de datos de 7.000 pares de valores de temperatura y conductividad eléctrica.

### 3.4. Adaptación del código Corvel

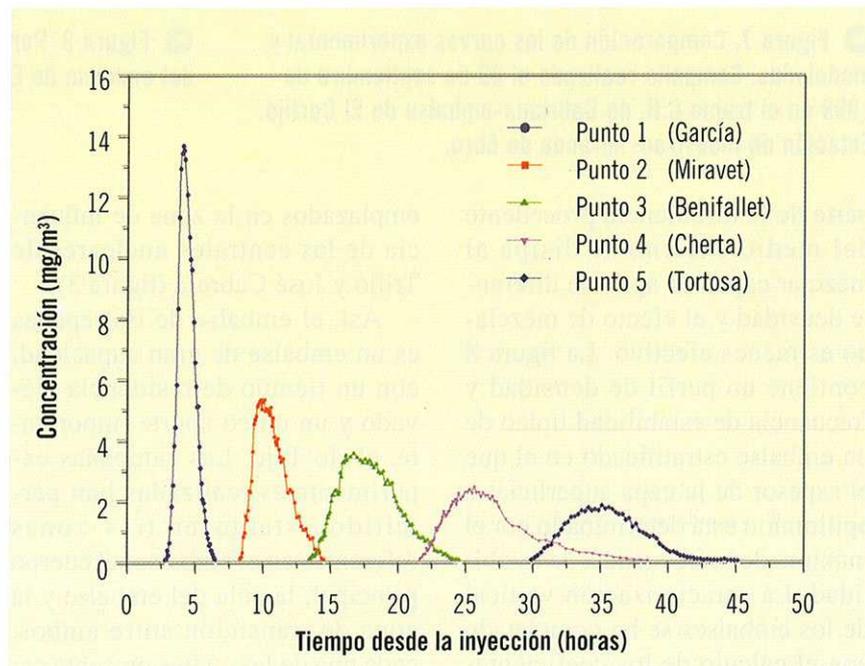
El análisis de los datos experimentales obtenidos en las campañas realizadas en ríos ha permitido la modelación de los propios experimentos con trazadores y la verificación de los modelos de ajuste utilizados por comparación entre las curvas experimentales y las modeladas. Dicha comparación ha permitido establecer recomendaciones sobre cuál de los métodos de cálculo del coeficiente de dispersión y modelo de predicción es el más adecuado para cada uno de los tramos estudiados (figura 7).

La caracterización del tramo del río Tajo se ha completado correlacionando el coeficiente de dispersión y los estadísticos de las curvas concentración-tiempo frente a la distancia al punto de inyección, con el caudal fluente en el río. Esta información se ha introducido en el código Corvel, lo que permite la predicción de la evolución de un hipotético vertido en cualquier punto situado aguas abajo de la central de Trillo.

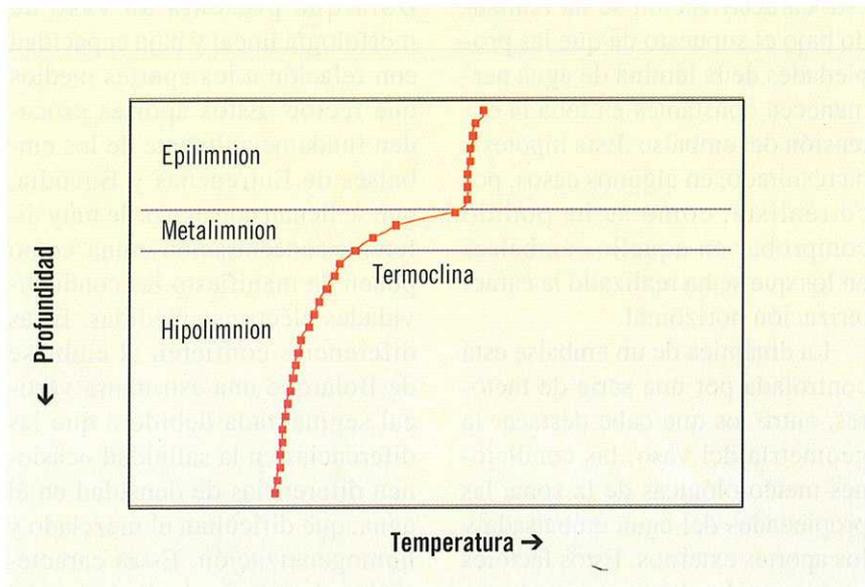
Los datos experimentales obtenidos en las campañas de caracterización vertical de embalses han permitido evaluar la variación de la densidad del agua y de la estabilidad de la columna de agua con la profundidad. La estabilidad de la masa de agua, evaluada a través de la llamada frecuencia de estabilidad, indica el grado de turbulencia y, por tanto, de mezcla que los agentes externos pueden inducir en el medio hídrico. Una masa de agua de propiedades homogéneas puede alcanzar un grado de mezcla elevado con pequeños aportes energéticos, cuando existe una cierta estabilidad; por el contrario,



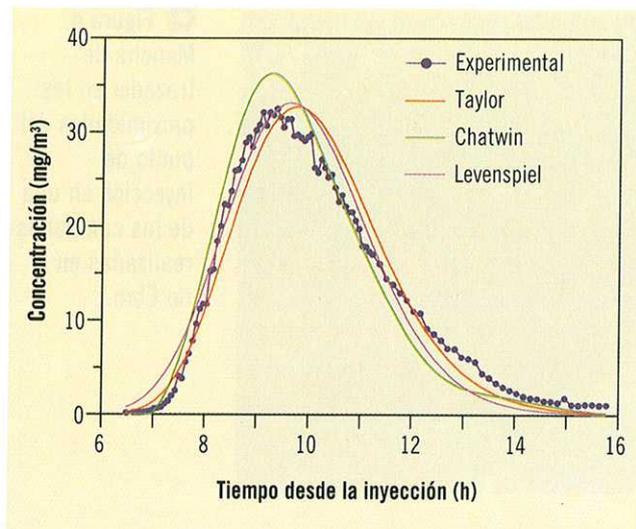
► **Figura 4.** Mancha de trazador en las proximidades del punto de inyección en una de las campañas realizadas en el río Ebro.



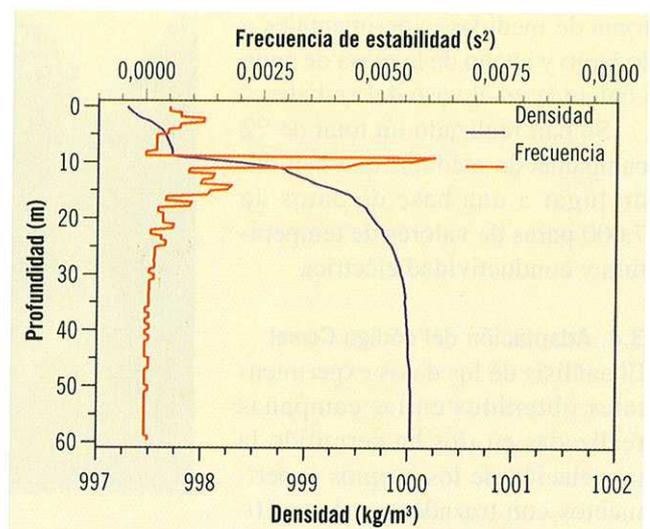
► **Figura 5.** Paso de la nube de trazador por los puntos de muestreo del tramo Ascó-Tortosa.



► **Figura 6.** Perfil térmico de un embalse estratificado.



► Figura 7. Comparación de las curvas experimental y modeladas. Campaña realizada el 29 de septiembre de 1998 en el tramo C.H. de Cabriana-embalse de El Cortijo. Estación de muestreo: Miranda de Ebro.



► Figura 8. Perfiles verticales de densidad y estabilidad del embalse de Entrepeñas (presa). N.D.C.A.: 196.

parte de la turbulencia procedente del medio externo se disipa al mezclar capas de agua de diferente densidad y el efecto de mezclado es menos efectivo. La figura 8 contiene un perfil de densidad y frecuencia de estabilidad típico de un embalse estratificado en el que el espesor de la capa superficial o epilimnion está determinado por el máximo de la frecuencia de estabilidad. La caracterización vertical de los embalses se ha completado con el cálculo de los coeficientes de difusión en la epilimnion e hipolimnion. Conviene señalar que esta caracterización se ha realizado bajo el supuesto de que las propiedades de la lámina de agua permanecen constantes en toda la extensión del embalse. Esta hipótesis ha resultado, en algunos casos, poco realista, como se ha podido comprobar en aquellos embalses en los que se ha realizado la caracterización horizontal.

La dinámica de un embalse está controlada por una serie de factores, entre los que cabe destacar la geometría del vaso, las condiciones meteorológicas de la zona, las propiedades del agua embalsada y los aportes externos. Estos factores varían mucho de unos embalses a otros, como ocurre en los cuatro

emplazados en la zona de influencia de las centrales nucleares de Trillo y José Cabrera (figura 3).

Así, el embalse de Entrepeñas es un embalse de gran capacidad, con un tiempo de residencia elevado y un único aporte importante, el río Tajo. Las campañas experimentales realizadas han permitido establecer tres zonas diferentes en el embalse: el cuerpo principal, la cola del embalse y la zona de transición entre ambos, cada una de las cuales presenta características dispersantes y diluyentes diferentes. El embalse de Bolarque presenta un vaso de morfología lineal y baja capacidad con relación a los aportes medios que recibe. Estos aportes proceden fundamentalmente de los embalses de Entrepeñas y Buendía, que se llenan con aguas de muy diferente concentración salina, como ponen de manifiesto las conductividades eléctricas medidas. Estas diferencias confieren al embalse de Bolarque una estructura vertical segmentada debido a que las diferencias en la salinidad ocasionan diferencias de densidad en el agua, que dificultan el mezclado y homogeneización. Estas características hacen que la dinámica del embalse resulte compleja, espe-

cialmente cuando se produce interacción entre las estratificaciones de origen térmico y químico.

Los embalses de Zorita Hidráulica y Almoguera presentan numerosos puntos en común, entre ellos una capacidad pequeña y bajos tiempos de retención hidráulica, aunque la presencia de la central nuclear José Cabrera en el primero de estos embalses (figura 9) hace que sus dinámicas presenten características muy diferentes. La influencia térmica de la central divide el embalse de Zorita en tres zonas con diferentes propiedades: una primera zona, libre de la influencia del vertido; una segunda, situada frente al emplazamiento de la central, en la que los efectos térmicos y cinéticos son más marcados; y finalmente, la zona del cuerpo principal próxima a la presa. Estos aportes energéticos llegan al embalse de Almoguera, pero uniformizados en la masa de agua, por lo que este embalse exhibe un comportamiento totalmente diferente.

Esta información, junto con los parámetros característicos de la difusión longitudinal y vertical de cada una de las zonas y embalses, se ha introducido en la base de datos del código Corvel, por lo que la



► **Figura 9.** Embalse de Zorita Hidráulica y central nuclear José Cabrera.

predicción del comportamiento del embalse cuenta con un alto grado de realismo y fiabilidad.

#### 4. Conclusiones

El proyecto Tracer está permitiendo adaptar y calibrar los parámetros y modelos en todos y cada uno de los sistemas hidrológicos relacionados con las centrales nucleares españolas con el objetivo de dejar operativo el código Corvel. Esta calibración se ha realizado en los tramos de ríos y en los embalses ubicados aguas abajo de centrales nucleares.

La utilización de rodamina (trazador químico no radiactivo) ha

permitido cuantificar la longitud de mezcla, los coeficientes de dispersión longitudinal y los tiempos de tránsito en los tramos de río. Cada uno de estos parámetros varía según el caudal del río. Los parámetros determinados en el río Tajo se han obtenido con regímenes de flujo comprendidos ente 8 y 32 m<sup>3</sup>/s. Los parámetros que se han obtenido en el río Ebro se han efectuado únicamente para un régimen de flujo. En el caso de los embalses se han determinado perfiles verticales de densidad en distintos meses del año con la finalidad de definir en qué periodos de tiempo el embalse presenta estrati-

ficación y en cuáles homogeneización y mezcla de las aguas. Toda la información obtenida se está introduciendo en la base de datos del código Corvel, lo que va a permitir realizar la predicción de la evolución de un hipotético vertido en aguas superficiales.

El desarrollo de Tracer supone disponer de una herramienta completamente operativa y fiable, y la actualización de su base de datos interactiva asociada es necesaria para calibrar el código y adaptarlo a la evolución natural del medio hidrológico. Esto supone dotar al cuerpo técnico del Consejo de Seguridad Nuclear de una herramienta específica para modelar y predecir la dispersión de contaminantes radiactivos vertidos accidentalmente en aguas superficiales. ☞

*Agradecimientos:* Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Confederación Hidrográfica del Tajo, Confederación Hidrográfica del Ebro, Unión Fenosa e Iberdrola por todas las facilidades dadas en la toma de medidas y por su total disposición a proporcionar las informaciones solicitadas. También a los alumnos de 5º curso de Ingeniería Química y Licenciatura en Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid por su colaboración en diferentes tareas del proyecto.

#### Referencias

[1] Alegría, J.: *Memoria de la propuesta de acuerdo específico CSN-UCM-CEDEX para el desarrollo del proyecto Tracer*. STN/TGE/CITI/9704/664.

[2] Sánchez, F.: *Dispersión de contaminantes en ríos. Cálculo de coeficientes de dispersión a partir de datos de campañas de aforo mecánico*. Departamento de In-

geniería Química, UCM (1995).

[3] Hutchinson, G.E.: *A Treatise on Limnology*. Ed. John Wiley & Sons (1967).

● A. Genescà, L. Tusell, I. Ponsa, L. Latre, M. Martín, R. Miró, J. Egozcue\*

# Mecanismos de formación de las alteraciones cromosómicas

El análisis de los efectos de la radiación ionizante sobre los cromosomas se ha convertido en una de las herramientas básicas en protección radiológica. A continuación,

se resumen los efectos que producen las radiaciones ionizantes en el ADN, así como los mecanismos naturales de reparación que poseen las células.

## 1. Aberraciones cromosómicas

Las radiaciones ionizantes inducen aberraciones cromosómicas de manera muy eficiente y dependiente de la dosis. Estas aberraciones proceden de la ausencia de reparación o de la reparación incorrecta de las lesiones inducidas en el DNA. Así, pueden distinguirse aberraciones cromosómicas incompletas (si no ha habido reparación o ésta ha sido incompleta) y completas (si la reparación se ha llevado a cabo de manera errónea).

Existen dos tipos de aberraciones cromosómicas completas: simétricas y asimétricas. Las aberraciones cuya formación va acompañada de la producción de un fragmento cromosómico sin centrómero (acéntrico) se denominan asimétricas. Entre ellas se encuentran los cromosomas dicéntricos y los anillos. Aquellas aberraciones que, como las translocaciones recíprocas o las inversiones, no van acompañadas de la formación de un fragmento acéntrico se denominan simétricas (figura 1).

Las reorganizaciones cromosómicas asimétricas suelen dar lugar a la pérdida de material cromosómico debido a que el fragmento acéntrico no puede unirse al huso mitótico. En el caso de intercambios asimétricos que resultan en la formación de un cromosoma con dos centrómeros (dicéntrico) pueden esperarse problemas mecánicos de segregación debidos a la formación frecuente de *puentes anafásicos* cuando los dos centrómeros de una misma cromátide son tirados hacia polos opuestos. Esto a menudo conlleva la muerte de la célula. Así, las células que presentan reorganizaciones cromosómicas asimétricas son eliminadas progresiva y rápidamente. Las formas simétricas (translocaciones recíprocas e inversiones) no producen problemas mecánicos durante la división celular. Por ello, es probable que puedan transmitirse de una generación celular a otra y persistir durante un largo periodo de tiempo.

El análisis de las aberraciones cromosómicas inducidas tras la exposición ocupacional o accidental a radiaciones ionizantes permite estimar el grado de exposición mediante la valoración de los efectos biológicos ocasionados. Este tipo

de análisis se denomina dosimetría biológica y se ha convertido en una de las herramientas básicas en protección radiológica.

## 2. Metodología de análisis cromosómico

El análisis de las aberraciones cromosómicas está generalmente restringido a la fase de división del ciclo celular (concretamente, metafase mitótica o meiótica) dado que únicamente en esta fase los cromosomas tienen un grado de condensación suficiente para permitir su análisis bajo el microscopio óptico. Mediante las técnicas de tinción uniforme de los cromosomas únicamente pueden detectarse aquellas aberraciones cromosómicas que produzcan una alteración en la apariencia de los cromosomas tales como cromosomas dicéntricos, anillos y fragmentos acéntricos. Otras alteraciones más sutiles, como translocaciones e inversiones, requieren métodos más sofisticados de detección tales como la producción de un patrón de bandas a lo largo de los cromosomas o las técnicas recientemente desarrolladas de hibridación *in situ* fluorescente (FISH).

Las técnicas de FISH se basan en reacciones de hibridación en las

\* Los autores pertenecen al Departamento de Biología Celular, Fisiología e Inmunología de la Universidad Autónoma de Barcelona.

que sondas de DNA de cadena sencilla se unen a secuencias complementarias de DNA celular desnaturizado formando moléculas híbridas estables de doble cadena. Las sondas más utilizadas en la actualidad en protocolos de FISH son moléculas de DNA marcadas con fluorocromos detectables bajo el microscopio óptico de fluorescencia.

Las sondas de DNA de mayor relevancia para el análisis de las aberraciones cromosómicas inducidas por la radiación ionizante pueden clasificarse en las siguientes categorías (figura 2):

— Librerías de sondas de DNA específicas para cada cromosoma. Producen el pintado de cromosomas enteros o brazos cromosómicos. Permiten la detección de intercambios simétricos y asimétricos entre porciones pintadas y no pintadas de los cromosomas.

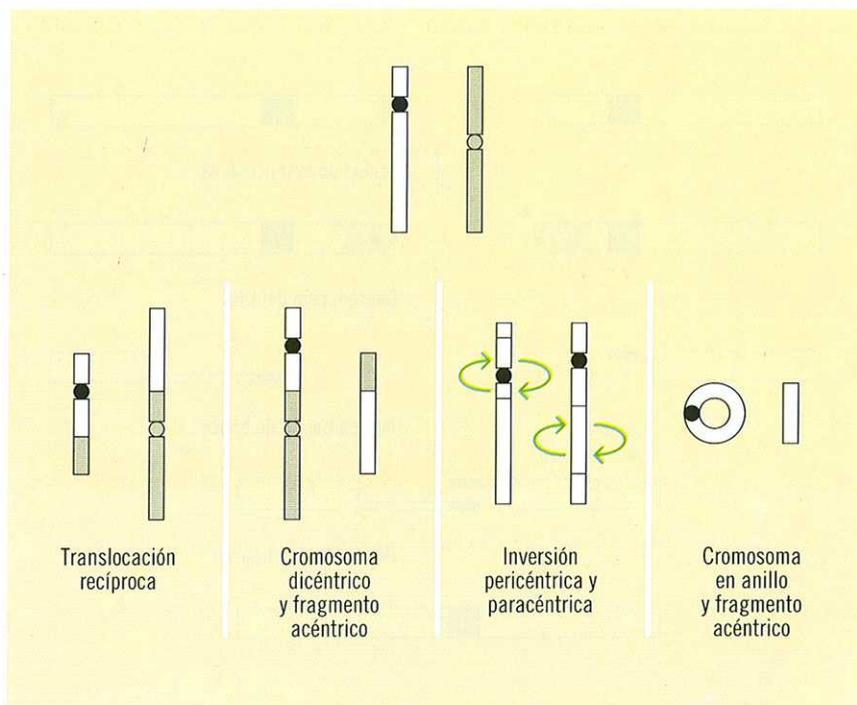
— Sondas de secuencia repetitiva. Permiten la detección específica de algunas regiones de los cromosomas que, como los centrómeros y los telómeros, están formados por secuencias de DNA repetitivo.

— Sondas de DNA de secuencia única.

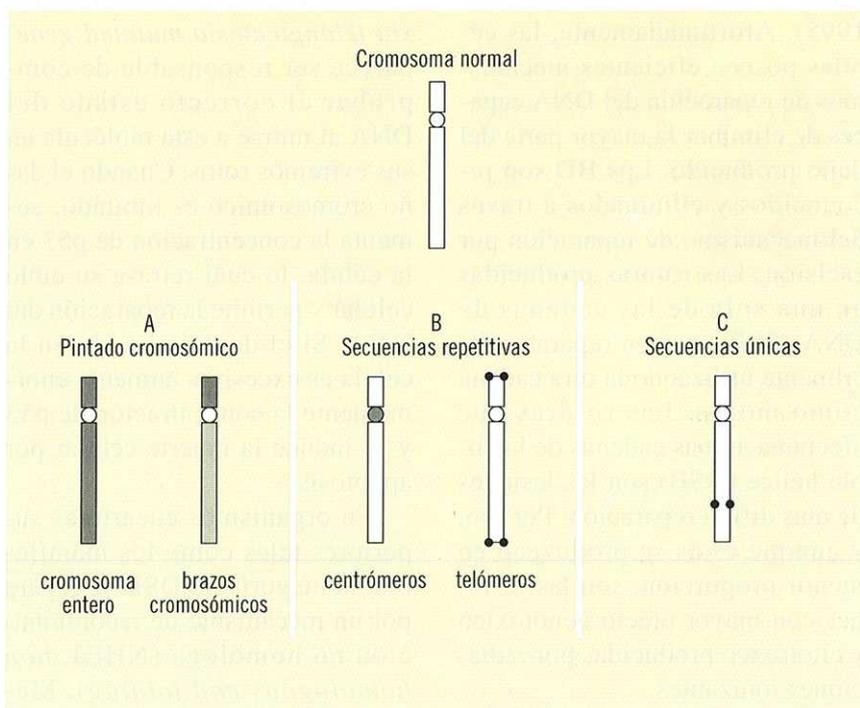
Recientemente se han desarrollado moléculas PNA (*peptide nucleic acid*) para ser usadas como sondas en reacciones de hibridación. Se aplican en la detección de secuencias de DNA repetitivo tales como las que constituyen los centrómeros y los telómeros. La ventaja de estas sondas PNA es que, al llevar las cargas eléctricas negativas del ácido nucleico neutralizadas por el péptido, tienen mayor afinidad y mejor especificidad que las sondas de DNA.

### 3. Lesiones en el DNA y su reparación

La acción mutagénica de la radiación ionizante se descubrió hace ya más de 70 años. Sin embargo, todavía hoy no se conocen con exactitud los mecanismos moleculares implicados en la generación de mutaciones. Las radiacio-



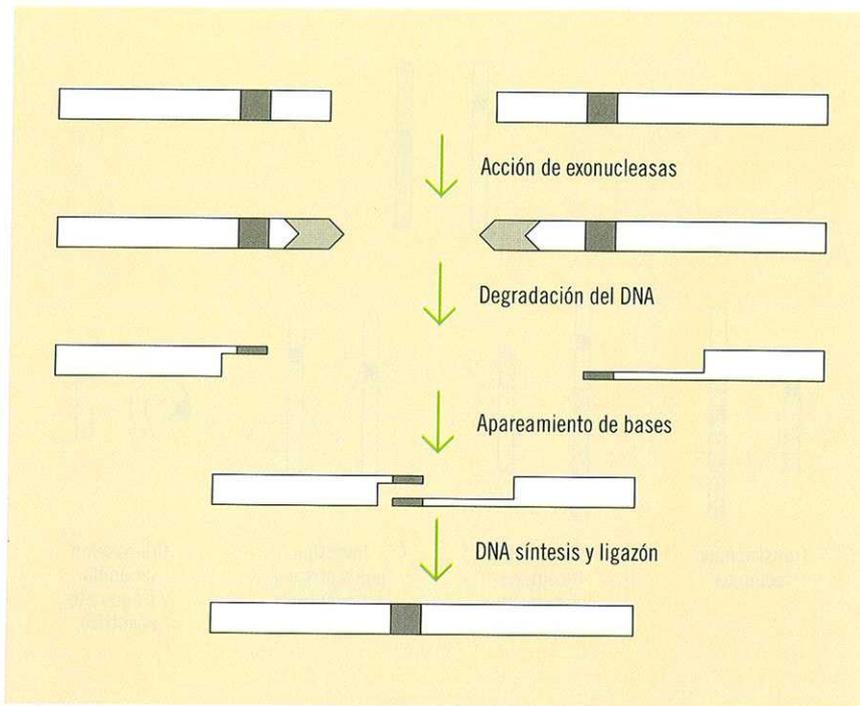
► Figura 1. Reorganizaciones cromosómicas simétricas y asimétricas.



► Figura 2. Tipos de sondas utilizadas en protocolos de FISH.

nes ionizantes producen una gran variedad de lesiones en el DNA de las células. Entre estas lesiones se encuentra el daño de bases (BD, *base damage*), las roturas de cadena sencilla (SSB, *single strand breaks*) y las roturas de doble cadena (DSB, *double strand breaks*). Las proporciones en las que se producen las distintas le-

siones dependen básicamente de la calidad de la radiación. Para las radiaciones de baja energía (rayos X y  $\gamma$ ) los BD y las SSB son las lesiones predominantes. Se ha estimado que una dosis de 1Gy de radiación de baja energía produce en el DNA de una célula 600-1.000 SSB y 500-20.000 BD en comparación a 16-40 DSB (Ward,



► **Figura 3. Mecanismos de reparación de DSB por recombinación no homóloga.**

1995). Afortunadamente, las células poseen eficientes mecanismos de reparación del DNA capaces de eliminar la mayor parte del daño producido. Los BD son reconocidos y eliminados a través del mecanismo de reparación por escisión. Las roturas producidas en una sola de las cadenas de DNA (SSB) pueden repararse fácilmente utilizando la otra cadena como molde. Las roturas que afectan a ambas cadenas de la doble hélice (DSB) son las lesiones de más difícil reparación. Por eso, y aunque éstas se produzcan en menor proporción, son las lesiones con mayor efecto genotóxico y citotóxico producidas por radiaciones ionizantes.

Mientras permanecen abiertos, los extremos libres de los cromosomas que aparecen en la célula tras la inducción de una DSB son el sustrato de enzimas hidrolíticas, tales como exonucleasas celulares, y pueden dar lugar a la degradación de cromosomas enteros o fragmentos cromosómicos. Las células son capaces de detectar las DSB inducidos en su DNA para permitir su reparación. La proteína producto del gen ATM (*ata-*

*xia telangiectasia mutated gene*) parece ser responsable de comprobar el correcto estado del DNA al unirse a esta molécula en sus extremos rotos. Cuando el daño cromosómico es limitado, aumenta la concentración de p53 en la célula, lo cual retrasa su ciclo celular y permite la reparación del DNA. Si el daño inducido en la célula es excesivo, aumenta enormemente la concentración de p53 y se induce la muerte celular por apoptosis.

En organismos eucariotas superiores tales como los mamíferos, la mayoría de DSB se repara por un mecanismo de recombinación no homóloga (NHEJ, *non homologous end joining*). Mediante este mecanismo se pueden unir covalentemente dos extremos de DNA que presenten una complementariedad de unos pocos pares de bases mediante procesos que implican la degradación nucleolítica de los extremos rotos, el alineamiento de los dos extremos que contengan unos pocos pares de base de homología (1-4pb) y su ligamiento (figura 3). Las proteínas implicadas en la reparación de DSB por NHEJ son:

— El heterodímero Ku70-Ku80, que se une a las DSB participando en el reconocimiento del daño y en la yuxtaposición de los extremos rotos.

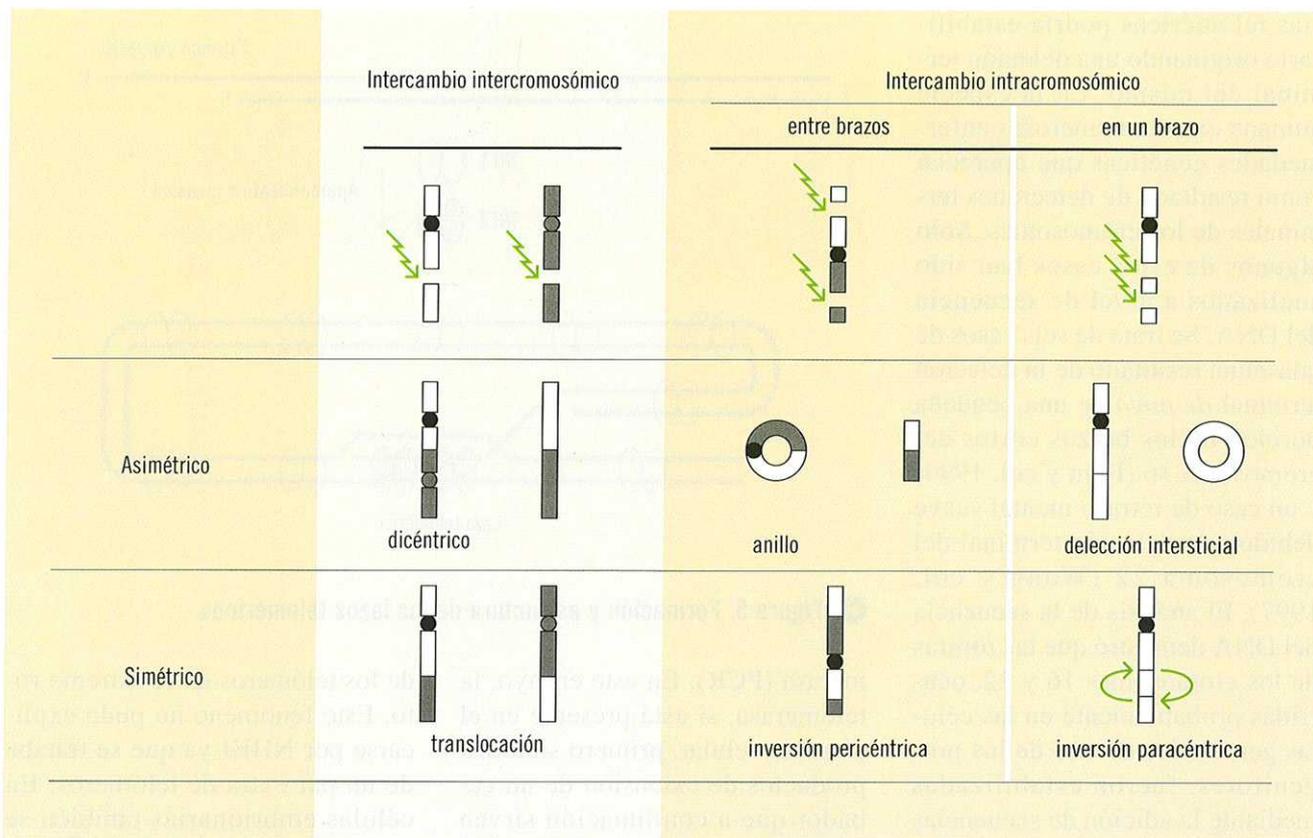
— El complejo Rad50-Mre11-Nbs1, implicado en el procesamiento nucleolítico de los extremos previo a su ligamiento.

— El enzima ligasa IV, que cataliza la unión de los extremos.

Este sistema de reparación no homóloga tiene la característica de modificar la secuencia original de bases en el sitio de rotura, con la introducción de pequeñas inserciones, deleciones o sustituciones de base. Así, puede causar la restitución del cromosoma original con pequeñas modificaciones en el sitio de rotura, pero también puede originar reorganizaciones cromosómicas más profundas.

Se estima que más del 90% de las DSB inicialmente producidas se reparan por NHEJ restituyendo el cromosoma en su forma original. Una parte de las restantes DSB son las responsables de la formación de aberraciones cromosómicas. No se conocen con exactitud los pasos críticos que se hallan en la transición de las DSB a la alteración de la estructura de los cromosomas. El modelo más ampliamente aceptado para explicar la mecánica que origina las aberraciones cromosómicas se conoce con el nombre de *teoría de rotura y reunión*. Su versión más actual (para revisión ver Savage, 1989) propone que los intercambios cromosómicos tales como dicéntricos, translocaciones, inversiones y anillos derivan de la producción de dos DSB inducidas en una misma célula en un corto espacio de tiempo y de su posterior unión ilegítima por NHEJ.

La reunión ilegítima de extremos produciendo una reorganización cromosómica parece posible dadas las cortas secuencias de homología requeridas por los mecanismos de NHEJ. La producción de reorganizaciones intracromosómicas (anillos e inversiones) o



► **Figura 4.** Producción de reorganizaciones cromosómicas simétricas y asimétricas por la reunión ilegítima de los extremos obtenidos tras la inducción de dos DSB.

entre brazos de cromosomas distintos (dicéntricos y translocaciones) dependerá de la localización de las roturas y de los extremos entre los que se produzca la reunión (figura 4).

Finalmente, se ha propuesto que una pequeña parte de las DSB no reparadas por NHEJ puedan estabilizarse mediante la adición de telómeros. En el campo de la biología de las radiaciones, los telómeros son potencialmente capaces de abrir un camino en nuestra comprensión de los procesos de reparación del daño en el DNA. Los telómeros son cortas secuencias de DNA repetidas en tándem que se hallan en los extremos de los cromosomas. Los mecanismos convencionales de replicación del DNA por polimerasas son incapaces de copiar los extremos de los cromosomas. Por eso, las células somáticas pierden una porción de cromosoma en cada división. El enzima telomerasa, activo únicamente en células con elevada ca-

pacidad de proliferación como las células germinales y embrionarias, es el encargado de sintetizar las secuencias teloméricas de los extremos de los cromosomas y así recuperar la longitud normal de los mismos para la siguiente generación.

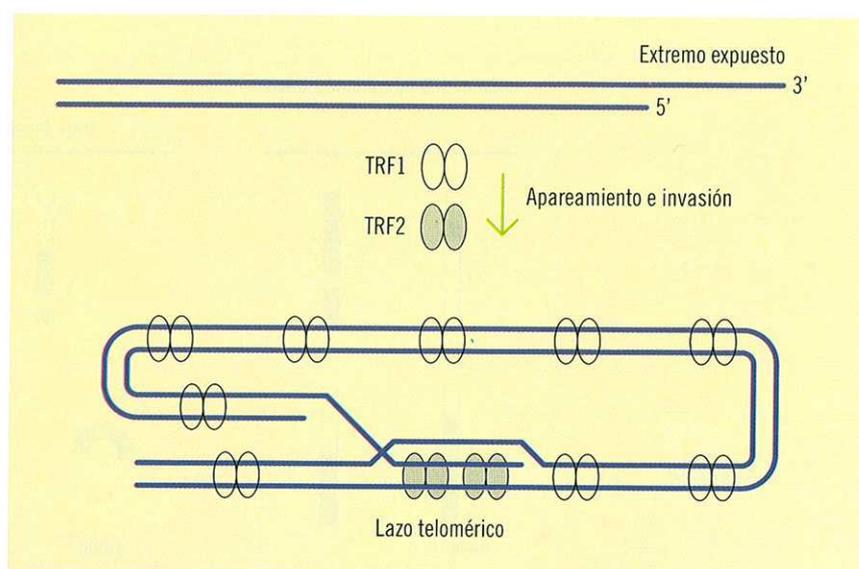
La principal función de los telómeros es evitar que los extremos cromosómicos se unan unos a otros. Sin embargo, la presencia de DNA telomérico *per se* no es suficiente para que el telómero realice su función. Recientemente, las proteínas TRF1 y TRF2, que se hallan específicamente asociadas a las secuencias teloméricas, han emergido como factores clave en la cicatrización de los cromosomas de mamífero. TRF2 protege los extremos cromosómicos de su fusión con otros extremos. Cuando se inhibe TRF2, la célula detecta los extremos teloméricos naturales de los cromosomas como roturas en el DNA. Como resultado, se produ-

ce la apoptosis de las células de mamífero vía ATM y p53 (Karlseider y col, 1999). TRF2 protege los extremos cromosómicos a través de un cambio en la arquitectura de los mismos. Recientemente, se ha demostrado que TRF2 es capaz de modelar los extremos lineales de las moléculas de DNA, formando grandes lazos (Griffith y col, 1999) que permiten a las células de mamífero enmascarar los extremos naturales de los cromosomas (figura 5). Los telómeros deben tener una longitud mínima para evitar la fusión entre extremos cromosómicos. Las células derivadas de ratones *knockout* para telomerasa presentan telómeros de longitud sensiblemente inferior y a menudo se observa en estas células la fusión entre cromosomas (Hande y col, 1999). La pérdida de la estructura en lazo podría ser la causante de tales fusiones.

Tras la rotura accidental de un cromosoma, la adición de secuen-

cias teloméricas podría estabilizarlo originando una deleción terminal del mismo. En la especie humana existen numerosas enfermedades genéticas que aparecen como resultado de deleciones terminales de los cromosomas. Sólo algunos de estos casos han sido analizados a nivel de secuencia del DNA. Se trata de seis casos de talasemia resultado de la deleción terminal *de novo* de una pequeña porción de los brazos cortos del cromosoma 16 (Flint y col, 1994) y un caso de retraso mental suave debido a la deleción terminal del cromosoma 22 (Wong y col, 1997). El análisis de la secuencia del DNA demostró que las roturas de los cromosomas 16 y 22, ocurridas probablemente en las células germinales de uno de los progenitores, fueron estabilizadas mediante la adición de secuencias teloméricas al extremo roto por el enzima telomerasa. Es posible que éstos sean ejemplos de un proceso de cicatrización de roturas cromosómicas raro en la especie humana. Sin embargo, dicho mecanismo puede tener consecuencias importantes dada su influencia en la promoción de deleciones terminales.

En nuestro laboratorio, en colaboración con otros laboratorios europeos, iniciamos hace algunos años un estudio acerca del papel del proceso de adquisición de telómeros en la cicatrización y estabilización de roturas cromosómicas inducidas por rayos X. Dicho estudio se llevo a cabo en células germinales y embrionarias de ratones irradiados *in vivo*. En primer lugar, se analizó la actividad del enzima telomerasa en ambos tipos celulares. Dicho análisis se realizó mediante la aplicación de un ensayo muy sensible denominado TRAP (Telomere Repeat Amplification Protocol, Piatyszek y col, 1995) para la detección de actividad telomerasa en extractos celulares. El TRAP se basa en la reacción en cadena de la poli-



► Figura 5. Formación y estructura de los lazos teloméricos.

merasa (PCR). En este ensayo, la telomerasa, si está presente en el extracto celular, primero sintetiza productos de extensión de un cebador que a continuación sirven de molde para su amplificación por PCR. Mediante este ensayo se observó que los ovocitos y los embriones de ratón presentaban una elevada actividad telomerasa. En cambio, los espermatozoides de ratón presentaban una actividad muy baja. Además, se detectó un aumento significativo en la actividad del enzima en ovocitos, embriones y extracto testicular tras la irradiación de los ratones. Esto puede ser una respuesta inducida por el daño causado en el DNA y sugiere que el enzima telomerasa podría tener algún papel en los mecanismos de reparación y cicatrización de las roturas inducidas en el DNA.

En nuestro estudio, la caracterización de las roturas cromosómicas se realizó en espermatoцитos, cigotos y embriones de ratón a dos células. Se aplicaron técnicas de FISH con sondas de DNA centromérico y telomérico. Tras la irradiación de los ratones se observó la inducción de un elevado número de roturas cromosómicas en las células germinales. Sin embargo, en sólo una pequeña proporción de los mismos se observó la adquisición

de los telómeros en el extremo roto. Este fenómeno no pudo explicarse por NHEJ ya que se trataba de un par extra de telómeros. En células embrionarias también se observó la presencia de telómeros en los extremos rotos de varios fragmentos cromosómicos. En particular, se observó una porción significativa de fragmentos acéntricos en exceso (no acompañados de dicéntricos ni anillos) con señales teloméricas en ambos extremos. Éstos parecen ser el indicio de un fenómeno de adquisición de telómeros distinto a la simple reunión de extremos.

No se conoce con exactitud el mecanismo que permitiría la cicatrización de roturas cromosómicas. Mientras algunos autores señalan la adición directa de secuencias teloméricas a los extremos rotos por el enzima telomerasa, Preston, 1997, otros apuntan hacia un mecanismo de captura de telómeros por el cual el cromosoma roto podría robar el telómero de otro cromosoma intacto mediante un mecanismo de reparación homóloga vía Rad52 (Slijepcevic y Bryant, 1998). Sea cual sea el mecanismo de sellado de roturas cromosómicas, éste debe estar bajo un control muy estricto a fin de evitar el sellado indiscriminado de las roturas espontáneas que ocu-

rren durante los procesos de recombinación meiótica o producción de anticuerpos.

En la actualidad se ha iniciado, en colaboración con diversos laboratorios europeos de reconocido prestigio, un proyecto de investigación del fenómeno de cicatrización de las roturas inducidas en los cromosomas en distintos ambientes celulares, a fin de determinar los mecanismos implicados. Para ello se utilizarán células derivadas de ratones deficientes para telomerasa y para distintas proteínas de reparación (Ku80, ATM y PARP).

Es posible que en organismos multicelulares tales como mamífe-

ros, la importancia de cada uno de los mecanismos citados (NHEJ, telomerasa y captura de telómeros) dependa del tipo de tejido y estadio de desarrollo. La elección de un mecanismo de reparación u otro podría estar determinada por la competencia entre las proteínas Rad52 (captura de telómeros), Ku (NHEJ) y telomerasa para unirse a los extremos rotos de una molécula de DNA. En células con elevada tasa de proliferación tales como las células germinales o los embriones tempranos se ha observado una elevada concentración de telomerasa y proteínas del grupo de Rad52. En estas células, la contri-

bución de los mecanismos de recombinación homóloga y telomerasa podría ser más importante que en el resto de las células.

El progreso en la comprensión de los mecanismos de reparación de las DSB contribuirá a conocer las relaciones que existen entre las vías de respuesta al daño inducido y las enfermedades genéticas. Esperamos además que este conocimiento pueda tener una influencia favorable en la evaluación de los riesgos derivados de la exposición a radiación ionizante y otros agentes clastogénicos para mejorar el uso terapéutico de estos agentes en el tratamiento del cáncer. ☼

## Referencias

- Flint J., Craddock C.F., Villegas A., Bentley D.P., Williams H.J., Galanello R., Cao A., Wood W.G., Ayyub H., Higgs D.R. (1994): *Healing of broken human chromosomes by the addition of telomeric repeats*. Am. J. Hum. Genet. 55:505-512.
- Griffith J.D., Comeau L., Rosenfields S., Stansel R.M., Bianchi A., Moss H., de Lange T. (1999): *Mammalian telomeres end in a large duplex loop*. Cell 97:503-514.
- Hande M.P., Samper E., Lansdorp P.M., Blasco M. (1999): *Telomere length dynamics and chromosomal instability in cells derived from telomerase null mice*. J. Cell Biol. 144:589-601.
- Karlseeder J., Broccoli D., Dai Y., Hardy S., de Lange T. (1999): *P53 and ATM dependent apoptosis induced by telomeres lacking TRF2*. Science, 283: 1321-1325.
- Piatyszek M.A., Kim N.W., Weinrich S.L., Hiyama K., Hiyama E., Wright W.E., Shay J.W. (1995): *Detection of telomerase activity in human cells and tumors by a telomeric repeat amplification protocol (TRAP)*. Meth. Cell Sci. 17:1-15.
- Preston R.J. (1997): *Telomeres, telomerase and chromosome stability*. Radiat. Res. 147:529-534.
- Savage J.R.K. (1989): *The production of chromosome structural changes by radiation: An update of Lea (1946)*. Br. J. Radiobiology 62:507-520.
- Slijepcevic P. and Bryant P. (1998): *Chromosome-healing, telomere capture and mechanisms of radiation-induced chromosome breakage*. Int. J. Radiat. Biol. 73:1-13.
- Ward J.F. (1995): *Radiation mutagenesis: the initial DNA lesions responsible*. Radiat. Res. 142:362-368.
- Wong A.C.C., Ning Y., Flint J., Clark K., Dumanski J.P., Ledbetter D.H., McDermid H.E. (1997): *Molecular characterization of a 130-Kb terminal microdeletion at 22q in a child with mild mental retardation*. Am. J. Hum. Genet. 60: 113-120.

# Aplicación de la espectrometría gamma *in situ* a la dosimetría externa

En este artículo se describen las actividades y resultados obtenidos por el Grupo de Dosimetría de las Radiaciones del Ciemat en la puesta a punto de la técnica de espectrometría

gamma *in situ*, así como su aplicación a dosimetría externa. Se analizan también sus posibilidades de aplicación a diferentes campos de la protección radiológica.

## 1. Introducción

La evolución experimentada por la vigilancia radiológica ambiental a lo largo del tiempo ha potenciado el desarrollo de técnicas de medida que permitan conocer en un corto periodo la situación radiológica de una zona, especialmente en caso de accidente. Una de estas técnicas es la denominada espectrometría gamma *in situ*, que comenzó a desarrollarse en los años sesenta en Estados Unidos durante la realización de las pruebas nucleares, siendo también utilizada en la prospección de minerales de uranio.

Su uso se ha incrementado en todo el mundo, siendo ampliamente utilizada durante el accidente de la central nuclear de Three Mile Island y especialmente en la vigilancia realizada para determinar las consecuencias del accidente de Chernóbil, donde se hizo necesaria la utilización de técnicas rápidas y fiables de determinación de la contaminación ambiental.

La espectrometría gamma realizada en campo es un método basado en la medida de la distribución espectral de la tasa de fluencia fotónica. De acuerdo con la *Publicación n.º 53* de la ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) [1], el término espectrometría gamma *in situ* se ha adoptado más específicamente para aquellas medidas realizadas a nivel del suelo y a una altura aproximada de un metro sobre el terreno.

La técnica puesta a punto dentro del proyecto de investigación sobre la aplicación de la espectrometría gamma *in situ* a la dosimetría ambiental de la radiación externa permite, mediante una medida realizada en unos minutos, caracterizar radiológicamente áreas en la que existan emisores gamma y obtener las dosis asociadas por el conjunto y cada uno de los isótopos identificados. Los resultados obtenidos son representativos de una superficie de varios cientos de metros cuadrados. Esta técnica representa una clara ventaja sobre los métodos tradicionales de vigilancia que implican el muestreo y el posterior análisis de las muestras en el laboratorio.

El proyecto ha sido realizado por un equipo investigador formado por José Carlos Sáez, José María Gómez, Ana María Romero y Antonio Delgado, pertenecientes al grupo de Dosimetría de las Radiaciones del Ciemat, con la colaboración de personal perteneciente a la Unidad de Protección Radiológica del citado organismo.

## 2. Objetivos del proyecto

El proyecto de investigación fue realizado dentro del acuerdo específico de colaboración firmado el 30 de noviembre de 1996, por un periodo de dos años, entre el Ciemat y el CSN, que tenía por objeto "disponer de la técnica completa de espectrometría gamma *in situ* y desarrollar nuevas posibilidades" [2].

El objetivo general del proyecto era la puesta a punto de la técnica de aplicación de la espectrometría gamma *in situ* a la dosimetría ambiental de radiación externa, siendo sus principales fases las siguientes:

- Calibración de los sistemas espectrométricos.
- Adaptación de las medidas espectrométricas a la determinación de dosis.

\* Licenciado en Ciencias Químicas, pertenece al CSN desde su creación. En la actualidad desempeña sus funciones en la Subdirección General de Protección Ambiental.



► **Figura 1.** Situación en campo de los equipos de medida. Balsas de fosfoyesos de la zona de la industria de fosfatos de Huelva.

— Comparación de los métodos espectrométricos con otros métodos de determinación de dosis, a través de la medida en un emplazamiento de referencia.

— Definición de escenarios reales representativos con realización de medidas comparadas.

El proyecto se encuadra dentro de los programas de investigación y desarrollo contemplados en el convenio marco de colaboración CSN-Ciemat [3], en el área de protección radiológica, y específicamente en el programa relativo al desarrollo de metodología y equipamientos para la medición de la exposición externa o de la contaminación interna de personas (apartado II.2.2 del anexo al convenio).

Este proyecto está incluido, a su vez, en uno de los grandes campos de actividad contemplados en el Plan Quinquenal de Investigación (1997-2001) del CSN [4] y específicamente en el campo de protección radiológica, dentro de la línea de protección radiológica del público y el medio ambiente, en el área de investigación en impacto radiológico

ambiental de la operación de las instalaciones nucleares. Entre las actividades previstas en esta área están los estudios encaminados a la caracterización del campo de radiación externa en un emplazamiento, identificando a los radionucleidos que lo originan y permitiendo simultáneamente la estimación de las dosis ambientales resultantes mediante algoritmos de cálculo.

Adicionalmente, es uno de los proyectos que ha sido considerado dentro del Plan Coordinado de Investigación (PCI) CSN-Unesa, establecido dentro del convenio marco, firmado el 22 de septiembre de 1997, entre ambos organismos [5].

### 3. Desarrollo del proyecto

Dentro del proyecto se han llevado a cabo las actividades que se indican a continuación [6, 7 y 8].

#### 3.1. Calibración de los distintos instrumentos

Durante el desarrollo del proyecto, se utilizaron dos tipos de sistemas espectrométricos, de centelleo sólido (NaI:TI, yoduro sódico

activado con talio) y de semiconductor de GeHp (detector de germanio de alta pureza), que fueron sometidos a las correspondientes calibraciones.

#### 3.1.1. Calibración de instrumentos activos

Dado que uno de los objetivos del proyecto era la realización de medidas comparadas de determinación de dosis ambientales, con una serie de instrumentos activos, se llevó a cabo una calibración conjunta del sistema espectrométrico con una serie de instrumentos de medida (HPIC Reuter-Stokes RS-112, HPIC Reuter-Stokes RS-111 y un detector doble Geiger Muller de la red Revira del CSN).

Esta calibración se realizó mediante las técnicas denominadas *free-field* y *shadow-shield* en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Risø, en Dinamarca.

#### 3.1.2. Calibración semiempírica

Los picos de un espectro son una medida del flujo de radiación  $\gamma$  de una determinada energía que alcanza el detector. Mediante la calibración del detector con fuentes puntuales, se puede determinar su respuesta en términos de las cuentas de un fotopico para un flujo dado como una función de la energía  $\gamma$  y el ángulo de incidencia. De esta forma, el área de un fotopico sería una medida del flujo incidente en el detector en la situación de campo (figura 1). Un método de calibración combinando la exposición a fuentes puntuales y cálculos teóricos fue desarrollado en el Environmental Measurements Laboratory (EML), del DOE de EEUU [9]. En este método, el proceso de calibración viene representado por la siguiente ecuación, que relaciona la tasa de exposición en el aire sobre el terreno, con la tasa de cuentas del fotopico:

$$N_f/I = (N_0/\Phi) \cdot (N_f/N_0) \cdot (\Phi/I)$$

De manera similar, la concentración en el terreno de un radionu-

cleido dado estaría relacionada con las cuentas registradas en el fotopico por una ecuación análoga:

$$N_f/A = (N_0/\Phi) \cdot (N_f/N_0) \cdot (\Phi/A)$$

donde:

—  $N_f/I$  = c.p.m. en el fotopico por  $\mu\text{R/h}$ .

—  $I$  = Tasa de exposición en  $\mu\text{R/h}$  a 1 metro sobre el terreno para todas las radiaciones  $\gamma$  provenientes de un radionucleido dado y las secundarias producidas en el suelo y en el aire.

—  $N_f/A$  = Tasa de contaje (c.p.m.) en un fotopico del espectro que corresponde a una determinada  $\gamma$  de un radionucleido presente en el terreno, con un inventario de actividad  $A$ .

—  $A$  = Concentración de actividad del radionucleido en el terreno ( $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  o  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

—  $(N_0/\Phi)$  = Tasa de contaje (c.p.m.) obtenida en el fotopico de interés por unidad de flujo total (sin colimar) de la radiación gamma que incide sobre el detector en una dirección paralela al eje de simetría del mismo.

—  $(N_f/N_0)$  = Factor de corrección angular a aplicar sobre  $(N_0/\Phi)$ , para tener en cuenta que la radiación  $\gamma$  durante la realización de las medidas no incide paralelamente al eje de simetría del detector.

—  $(\Phi/I)$  = Cociente entre el flujo en el detector debido a la radiación  $\gamma$  de energía  $E$ , emitida por un radionucleido dado y sus descendientes, y la correspondiente concentración de actividad de dicho radionucleido en equilibrio con sus descendientes.

—  $(\Phi/A)$  = Cociente entre el flujo en el detector debido a la radiación  $\gamma$  de energía  $E$  emitida por un radionucleido dado y sus descendientes y la correspondiente concentración de actividad del radionucleido en equilibrio.

La determinación de los factores  $(N_0/\Phi)$ ,  $(N_f/N_0)$ ,  $(\Phi/I)$  y  $(\Phi/A)$  se ha llevado a cabo mediante este método. Dado que  $(N_0/\Phi)$  y  $(N_f/N_0)$



► **Figura 2.** Ejercicio de calibración realizado en la zona terrestre del Laboratorio Nacional de Risø.

dependen del detector empleado, se determinan experimentalmente, mientras que los factores  $(\Phi/I)$  y  $(\Phi/A)$  se obtienen de forma teórica, considerando las distintas geometrías de la distribución de la actividad en el terreno, que son las siguientes:

— Distribución exponencial en el terreno (deposición antigua isótopos artificiales).

— Distribución superficial (deposición reciente isótopos artificiales).

— Distribución uniforme (isótopos naturales).

Para todas estas geometrías se determinaron los diferentes flujos fotónicos en función del espectro de energías de los distintos radionucleidos.

### 3.1.3. Calibración matemática

Con relación al detector de GeHp, se ha realizado adicionalmente una calibración mediante el método más novedoso existente actualmente para sistemas utilizados en la espectrometría gamma *in situ*, un método de calibración matemática en eficiencias, mediante el código denominado ISOCS (*in situ object counting system*). Este

método se basa en la modelización matemática, mediante métodos de MonteCarlo, de la respuesta del detector en una geometría de medida y término fuente parametrizados [10]. Mediante este método se puede conocer la influencia de diferentes factores de interés, analizando únicamente los espectros y los parámetros de ajuste de la simulación. En el programa de calibración están consideradas nueve geometrías (caja simple, caja compleja, plano rectangular, cilindro simple, cilindro complejo, plano circular, esfera, tubería y pozo/marinelli) y mediante su aplicación se obtienen las correspondientes curvas de eficiencia para las distintas geometrías que se incorporan a los programas de análisis espectrométrico. La geometría aplicable a la espectrometría gamma *in situ*, medidas en campo, sería la denominada plano circular.

Para dar una idea de la capacidad del método se relacionan a continuación los datos de entrada que se pueden suministrar para las características específicas de la geometría anteriormente indicada de plano circular:



► **Figura 3.** Ejercicio de calibración realizado en la zona marítima del Laboratorio Nacional de Risø.

— Dimensiones, composición química y densidad de cada una de las zonas o capas.

— Dimensiones, composición química y densidad de capas absorbentes interpuestas entre el detector y el objeto de interés.

— Orientación y distancia del detector frente al plano de referencia.

— Parámetros meteorológicos, temperatura, presión atmosférica y humedad relativa, para el cálculo de la atenuación en el aire.

— Tipo de colimador y características, dimensiones, material y densidad.

La posibilidad de calibración para geometrías diferentes de las consideradas ambientales hace que esta técnica pueda ser utilizada para la caracterización de residuos, de zonas interiores contaminadas, de materiales de distinto tipo procedentes de operaciones de desmantelamiento, etcétera [11].

### 3.2. Adaptación de las medidas espectrométricas a la determinación de dosis

El cálculo de la tasa de exposición implica una interpretación adecuada de los espectros obtenidos, así

como la utilización de aproximaciones adicionales que permitan la conversión de los datos espectrométricos en la magnitud radiológica de interés, como serían la tasa de exposición ( $\mu\text{R/h}$ ) o la tasa de dosis absorbida ( $\text{nGy/h}$ ).

Los dos métodos utilizados normalmente para determinar la tasa de exposición son los denominados:

— Método del espectro total.

— Método del operador de conversión espectro-exposición.

El primero permite una estimación rápida con la hipótesis de que el número total de cuentas en el espectro está directamente relacionado con la cantidad total de radiación. Este método no permite la identificación de los radionucleidos ni el cálculo de las contribuciones en función de la energía de los fotones, únicamente resulta adecuado para estimar exposiciones donde se conoce el radionucleido predominante.

El método del operador de conversión espectro-exposición,  $G(E)$ , permite descomponer magnitudes tales como la exposición en función de la energía de los fotones detectados, pudiéndose de-

terminar las contribuciones de los radionucleidos predominantes. Este método produce resultados más fiables si el número de fotopicos de referencia es superior a diez. Para la determinación experimental del operador de conversión normalmente se emplean fuentes puntuales con actividades del orden de  $1\text{MBq}$  que imparten tasas de exposición a 1 metro entre 1 y  $130\ \mu\text{R/h}$ .

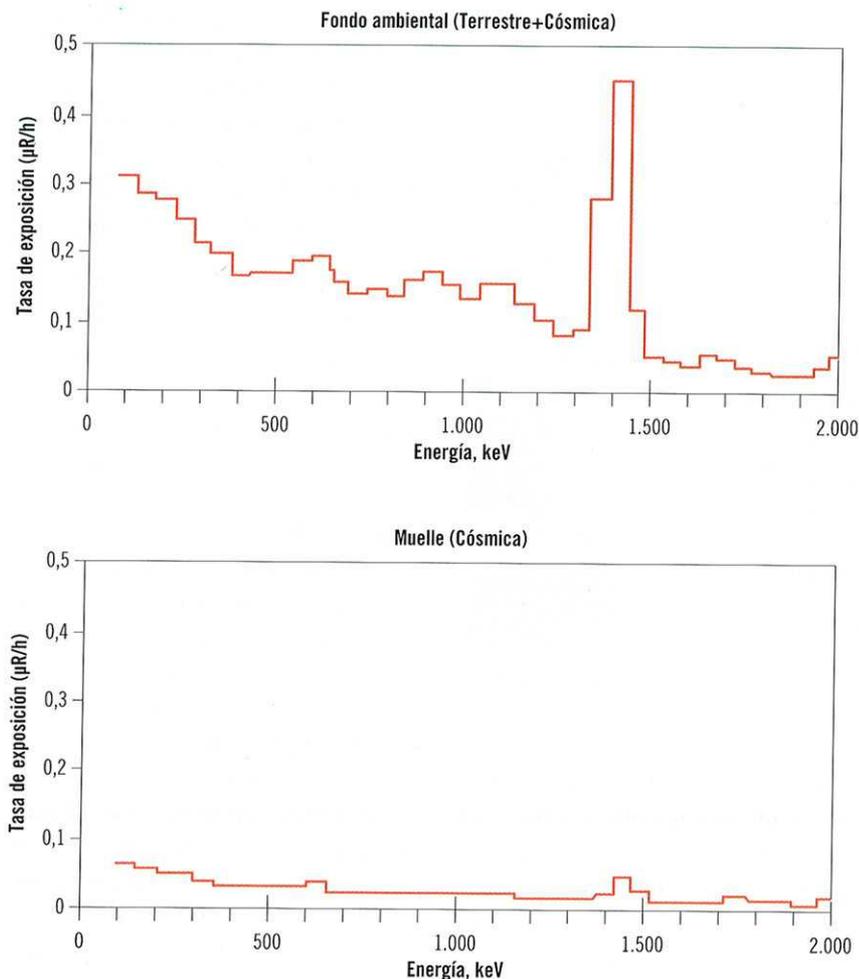
Los métodos expuestos se aplicaron a los espectros obtenidos en el ejercicio de calibración realizado en el Laboratorio Nacional de Risø.

Los métodos se aplicaron a los espectros obtenidos mediante irradiación con fuentes y a espectros ambientales tomados respectivamente en una zona interior cercana a la orilla del mar (figura 2), así como en un muelle de madera que se internaba en el mar unos diez metros (figura 3). Los espectros de tasas de exposición correspondientes a cada una de las zonas indicadas se exponen en la figura 4.

En el espectro correspondiente a la zona terrestre se observó la contribución predominante del K-40 en la región de los  $1.400\ \text{keV}$  y contribuciones más pequeñas correspondientes a los emisores gamma de las series naturales del Th-232 y del U-238.

El espectro obtenido en el muelle presentó una distribución casi uniforme (radiación cósmica) en todo el rango de energía  $0\text{-}2.000\ \text{keV}$ , únicamente alterada por un ligero aumento en la región de los  $1.400\ \text{keV}$  debido al K-40 existente en el agua de mar.

Como se ha indicado anteriormente, mediante la calibración semiempírica, se obtenían los factores  $N_f/I$  para cada radionucleido de interés y para cada geometría considerada. Este factor relaciona el número de cuentas detectadas en el fotopico con la tasa de exposición en aire debida a la unidad de concentración de



► **Figura 4.** Distribuciones de exposición obtenidas mediante la aplicación del operador  $G(E)$  a los espectros obtenidos con un detector de NaI:TI.

actividad de un isótopo dado, aspecto que permite tener una librería de factores de conversión de dosis para los principales isótopos artificiales y naturales. Existen, no obstante, publicaciones en las que se encuentran tabulados estos factores para diferentes geometrías, como la *Publicación n° 53* de la ICRU [1].

Antes de convertir las cuentas registradas en el espectro en tasa de exposición se debe eliminar la contribución de la radiación cósmica y de los sucesos debidos a los procesos de absorción parcial (dispersión Compton, fundamentalmente). Esta eliminación se realiza mediante la técnica denominada *stripping* [12], técnica que ha sido aplicada durante el desarrollo del proyecto.

### 3.3. Comparación de métodos de medida de dosis ambientales

La comparación entre los diferentes métodos de medida se llevó a cabo en dos zonas del Ciemat, una denominada Terraza (edificio sede del grupo de dosimetría) (figura 5) y otra denominada Esmeralda (estación de referencia para la medida de radionucleidos y dosis ambientales).

En ambos emplazamientos se recogieron tres espectros consecutivos, de 60 minutos cada uno, obteniendo las concentraciones de actividad de los radionucleidos identificados, naturales (K-40 e isótopos de las series del U-238 y del Th-232) y artificiales, únicamente Cs-137 en la zona de Esmeralda.

También se obtuvieron las tasas de dosis en aire que fueron compa-

radas con los valores de las cámaras de ionización. Se realizaron seis medidas de tasa de dosis por cada uno de los espectros recogidos. De los valores de dosis medidos con las cámaras de ionización se sustrajo la componente cósmica, estimada en un valor de 39,4 nGy/h

En los valores de dosis se observó una buena correspondencia entre los obtenidos mediante espectrometría  $\gamma$  y los medidos con las cámaras (relación entre 0,88 y 0,95), contribuyendo el K-40 en un 50% a los valores de dichas dosis.

### 3.4. Comparación de medidas en escenarios reales

Como escenario real para la realización de medidas comparadas se escogió el entorno de la industria de fosfatos de Huelva, dentro de un estudio solicitado por el CSN al Ciemat con objeto de determinar la situación radiológica de dicha zona [13].

El equipo técnico del Ciemat llevó a cabo una serie de actividades para realizar la caracterización radiológica, que incluyeron el muestreo y análisis de material de las balsas de residuos y de los vertidos líquidos, la estimación de la exhalación de Rn-222 y la medida de la radiación gamma ambiental, que fue realizada con una cámara de ionización presurizada. También se realizaron medidas mediante espectrometría gamma *in situ* con el detector de GeHp, que se llevaron a cabo en la zona de balsas, en la zona restaurada y en una zona de la marisma, con objeto de establecer el fondo de referencia. Tanto el detector de GeHp como la cámara se colocaron en sendos trípodes a una altura de un metro sobre el suelo (figuras 1 y 6).

En la calibración matemática del detector de GeHp se consideró una geometría circular de 30 m de diámetro y un metro de espesor, pero con distintas composiciones químicas y densidades, las cuales se obtuvieron experimentalmente de

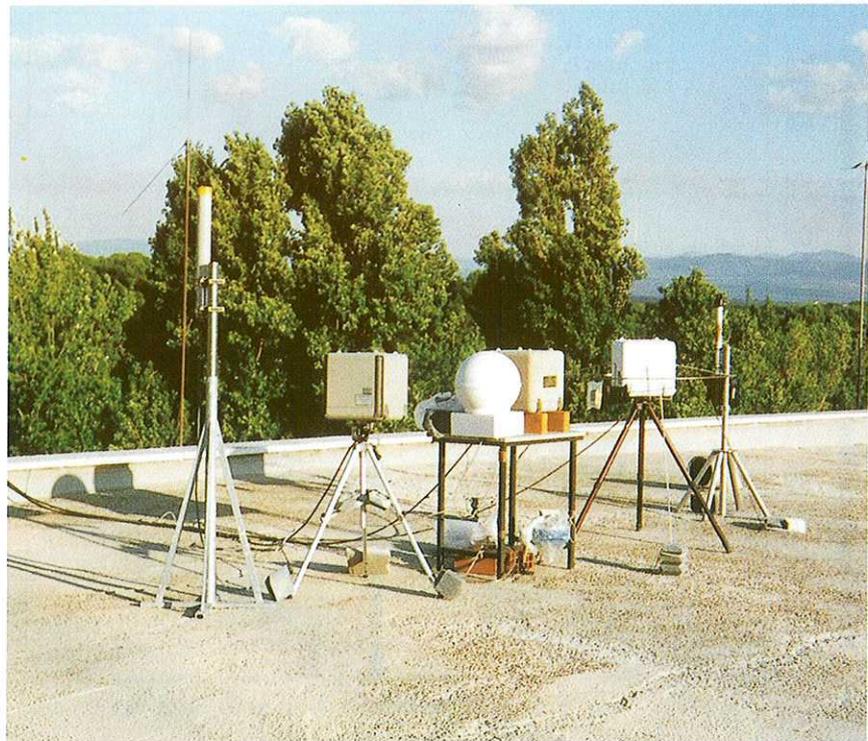
las muestras de suelo recogidas tanto en las balsas de fosfoyesos como en la marisma y en la zona restaurada. La contribución de la radiación cósmica se estimó en 32,2 nGy/h y se llevó a cabo mediante el código CARI-3 [14].

Los resultados de este estudio mostraron las características peculiares de las balsas de fosfoyesos, donde se midieron tasas de dosis del orden de 200 nGy/h. Estas dosis eran debidas principalmente a la contribución del Bi-214 y del Pb-214. Aunque se determinó la presencia de Ra-226 en mayor concentración, su contribución a la dosis fue inapreciable (figura 7). En las balsas, la relación entre las dosis obtenidas mediante espectrometría  $\gamma$  y las medidas con la cámara, estuvo comprendida entre 0,82 y 0,92.

En las zonas restauradas se constató el efecto de atenuación de la radiación, dado que se utilizó material proveniente de la marisma con bajo contenido de isótopos de las series del U-238 y del Th-232. La tasa de radiación proveniente del suelo en ambas zonas, restaurada y marisma, fue muy baja (del orden de unos 40 nGy/h).

#### 4. Conclusión y previsiones futuras

Mediante el proyecto llevado a cabo por el Grupo de Dosimetría de Radiaciones del Ciemat se ha puesto a punto la técnica de espectrometría gamma *in situ*, de acuerdo con la instrumentación más avanzada disponible, detectores de semiconductor de germanio ultrapuro, y los métodos más novedosos de calibración matemática, que permiten la aplicación de la técnica, no únicamente en los escenarios típicos de vigilancia del medio ambiente sino en escenarios asociados al interior de instalaciones nucleares y radiactivas, bien en fase de operación o de desmantelamiento así como en la caracterización de residuos.



► Figura 5. Medidas realizadas en el Ciemat. Terraza.



► Figura 6. Medidas realizadas en la zona de la industria de fosfatos de Huelva. Marismas.

Aunque se ha aplicado esta metodología en campo (Ciemat y zona de la industria de fosfatos de Huelva), obteniendo una correspondencia muy aceptable entre

las tasas de dosis externas estimadas mediante espectrometría y los equipos de referencia, el grupo investigador tiene previsto seguir verificando la disponibilidad de

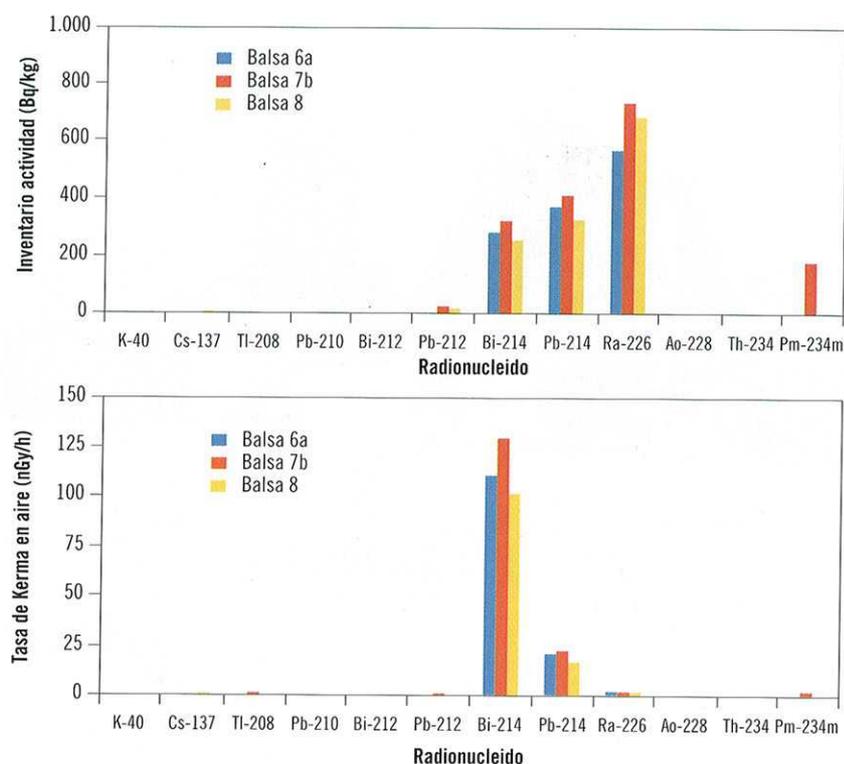


Figura 7. Concentraciones de actividad y tasas de kerma en aire en las balsas de fosforesos de Huelva.

## Referencias

- [1] *Gamma Ray Spectrometry in the Environment*. Informe ICRU nº 53. International Commission on Radiation Units and Measurements. 1994.
- [2] Acuerdo específico de colaboración entre el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas y el Consejo de Seguridad Nuclear para la aplicación de la espectrometría gamma *in situ* a la dosimetría ambiental de radiación externa.
- [3] Convenio marco de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y el Centro de Investigaciones Energéticas Tecnológicas y Medioambientales. 30 de julio de 1996.
- [4] *Plan Quinquenal de Investigación (1997-2001)*. Colección documentos CSN. 1997.
- [5] Convenio marco de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y Unidad Eléctrica, S.A. 22 de septiembre de 1997.
- [6] J.C. Sáez, A.M. Romero, A. Delgado: *Introducción a las técnicas de calibración de detectores activos en dosimetría ambiental*. Acuerdo específico CIEMAT-CSN 96/207 sobre aplicación de la espectrometría gamma *in situ* a la dosimetría ambiental de radiación externa. CIEMAT/IMA/53G20/01/97. Febrero 1997.
- [7] J.C. Sáez, A.M. Romero, A. Delgado: *Estimación de la distribución de la exposición en función de la energía mediante espectrómetros de centelleo*. Acuerdo específico CIEMAT-CSN 96/207 sobre aplicación de la espectrometría gamma *in situ* a la dosimetría ambiental de radiación externa. CIEMAT/IAE/53G26/02/97. Septiembre, 1997.
- [8] J.C. Sáez, E. Correa, J.M. Gómez, A.M. Romero, A. Delgado: *Sistema de espectrometría gamma *in situ* basado en un detector de germanio de alta pureza (SEGIS)*. CIEMAT/DIAE/53250/01/98. Septiembre 1998.
- [9] Beck, H.L. et al.: *In Situ Ge(Li) and NaI (Tl) Gamma-Ray Spectrometry*. Report HASL-258. U.S Department of Energy, Environmental Measurements Laboratory, 1972.
- [10] J.C. Sáez, E. Correa, J.M. Gómez, A.M. Romero, A. Delgado: *Aplicación de la espectrometría gamma *in situ* a la dosimetría ambiental de radiación externa*. Acuerdo Específico CIEMAT-CSN 96/207. III Jornada Técnica sobre el desarrollo del Plan de Investigación del Consejo de Seguridad Nuclear. Diciembre, 1998.
- [11] C. Sancho, E. Correa, N. Navarro, A. Alvarez y J.C. Sáez: *Validación de un sistema de espectrometría gamma *in situ*. Comparación con medidas en laboratorio*. 24 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española (1998).
- [12] Miller, K.M: *A spectral stripping method for a Ge spectrometer used for indoor gamma exposure rate measurements*. EML-419. U.S Department of Energy. July, 1984.
- [13] *Revisión de la situación radiológica en la zona de vertidos de la industria de fosfatos de Huelva para el Consejo de Seguridad Nuclear*. Dpto. Impacto Ambiental de la Energía CIEMAT/DIAE/PI-RA/08/98. Junio, 1998.
- [14] *CARI-3, A program for use on personal computer for calculating cosmic ray dose rate*. Civil Aeromedical Institute of the Federal Aviation Authority in the United States of America.

esta técnica en diferentes escenarios de interés en la vigilancia radiológica del país, como podrían ser:

— Localización de áreas de actividad elevada en estudios radiométricos.

— Caracterización de la respuesta a la radiación cósmica.

— Aplicación de la técnica a entornos complejos, zonas urbanas e interior de instalaciones.

— Caracterización radiológica de zonas donde se está realizando vigilancia radiológica con otros métodos: zona de influencia del accidente de Palomares, zona restaurada de la antigua fábrica de concentrados de Andújar, zona de la mina y la fábrica de concentrados de uranio de Saelices el Chico, así como aquellas zonas donde están emplazadas las estaciones de medida en continuo de la red Revira del CSN. 

# Noticias

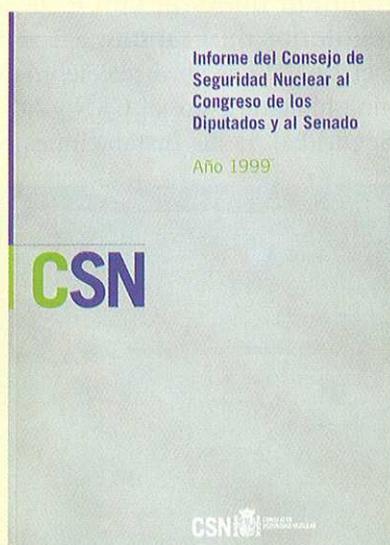
● Consejo de Seguridad Nuclear .....	37	● Tecnología .....	45
● Principales acuerdos del CSN .....	39	● Investigación y desarrollo .....	45
● Información general .....	39	● Protección radiológica .....	45
● Centrales nucleares .....	43	● Publicaciones .....	46

## ● CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

### El CSN entregó su informe anual al Parlamento

El Consejo de Seguridad Nuclear remitió en el mes de mayo al Congreso de los Diputados y al Senado su primer informe de carácter anual, correspondiente al año 1999. Dicho informe, que recoge las actividades de control que el organismo llevó a cabo para vigilar el funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas, se presentaba en años anteriores con carácter semestral, pero la Ley 14/1999 de Tasas y Precios Públicos modificó la periodicidad del documento para facilitar el trabajo de la comisión del Congreso de los Diputados encargada de su evaluación y para homologar la estructuración de datos con la de organismos equivalentes de otros países con los que España mantiene obligaciones internacionales.

El informe detalla los sucesos más importantes ocurridos en las instalaciones a lo largo del año y los resultados de las tareas de inspección efectuadas por el organismo regulador. Incluye, además, una descripción de los mecanismos mediante los cuales el CSN controla el funcionamiento de dichas instalaciones y aporta los últimos resultados disponibles sobre los controles radiológicos del personal profesionalmente expuesto y del medio ambiente.



Informe del CSN al Parlamento correspondiente a las actividades de 1999.



André Claude Lacoste (izquierda) y Cayetano López, conferenciantes en el Consejo de Seguridad Nuclear.

### Conferencias en el CSN

El pasado 26 de abril, André Claude Lacoste, director de la Dirección de Seguridad de las Instalaciones Nucleares (DSIN) de Francia, pronunció una conferencia en el Consejo de Seguridad Nuclear. En su charla, que llevaba por título *Contribution of WENRA to the EU enlargement process*, Lacoste repasó los avances de este grupo de trabajo en su tarea de armonizar las políticas europeas en lo referente a seguridad nuclear, gestión de residuos y transporte de material radiactivo.

El día 26 de mayo, Cayetano López, catedrático de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), impartió una conferencia en el Consejo de Seguridad Nuclear bajo el título *El impacto de Internet sobre la sociedad*. Tras hacer una breve historia sobre el papel de las nuevas tecnologías en la sociedad moderna, Cayetano López aseguró que Internet es todavía una herramienta rudimentaria en comparación con lo que será en poco tiempo. El que fuera rector de la UAM recordó que Internet consiguió conquistar en cuatro años y medio a 50 millones de personas, un público al que la radio tardó en llegar 38 años y la televisión 13. Defendió además la contribución de Internet a una educación más igualitaria.

### Seguimiento del convenio de colaboración con el Ministerio de Interior

El día 9 de marzo se reunió la comisión mixta de seguimiento del convenio de colaboración firmado en mayo de 1999 entre el Ministerio de Interior (Dirección General de Protección Civil) y el CSN. Este convenio abarca las actuaciones previstas en respuesta a eventuales situaciones de emergencia radiológica y nuclear.

La reunión se centró en la revisión del Plaben (Plan Básico de Emergencia Nuclear), el estudio de la directriz básica de emergencias radiológicas, la planificación de simulacros en emergencias nucleares, los equipamientos para emergencias radiológicas y el desarrollo del acuerdo adoptado por el Consejo de Ministros el 31 de octubre de 1999 sobre información a la población en caso de emergencia radiológica.

### Entrevistas con la presidenta del Congreso de los Diputados y con el presidente de la Comisión de Economía y Hacienda

El 11 de junio, el presidente del CSN mantuvo una entrevista con la presidenta del Congreso de los Diputados, Luisa Fernanda Rudi, en la que expuso las líneas estratégicas de actuación del Consejo para dar cumplimiento a las responsabilidades que la ley le atribuye y la especial vinculación del organismo con el Parlamento, del cual depende y al que rinde cuentas de sus actuaciones.



Luisa Fernanda Rudi, presidenta del Congreso de los Diputados.

El 21 de junio, el presidente de la Comisión de Economía y Hacienda del Congreso de los Diputados, Santiago Lanzuela, visitó el CSN, donde mantuvo una entrevista con el presidente del organismo. En la reunión se expusieron las líneas básicas de actuación del Consejo y los trabajos que desarrolla para llevar a cabo las responsabilidades que tiene encomendadas.

Desaparecida la Comisión de Industria y Energía, será la Comisión de Economía y Hacienda la que se encargue de los asuntos de la competencia del Consejo, dentro de la cual se constituirá una ponencia específica que estudie los informes del CSN.

### Visita del embajador en Viena ante Naciones Unidas

Antonio Núñez García-Saucó, nuevo embajador en Viena ante Naciones Unidas, visitó el CSN el 19 de junio y mantuvo una reunión con el presidente y los consejeros Agustín Alonso, José Ángel Azuara y Paloma Sendín. Durante la reunión se analizaron temas relacionados con el OIEA, como la Conferencia General

que se celebrará el próximo 18 de septiembre, la Convención de Seguridad Nuclear o la contribución española y del CSN al Organismo Internacional de Energía Atómica. El CSN mantiene una importante participación en la agencia de Viena: durante 1999 asistió a más de 50 sesiones convocadas por este organismo.

### El Centro de Información recibe su visitante 10.000



Alumnos del colegio Santa María del Camino de Madrid, durante su visita al Centro de Información del CSN.

El pasado 24 de marzo, el Centro de Información del CSN recibió su visitante número 10.000. La cifra se alcanzó durante la visita de un grupo de estudiantes de cuarto curso de ESO, perteneciente al colegio Santa María del Camino de Madrid. Desde su inauguración, en octubre del año 1998, hasta el 20 de junio de este año, el centro ha sido visitado por 12.208 escolares y representantes de instituciones, universidades y otros colectivos. Todos ellos han participado de la experiencia interactiva que ofrece este centro, en el que se explica qué son las radiaciones, para qué se usan, qué riesgos tienen y cuál es la función del organismo encargado de la seguridad nuclear y la protección radiológica.

### Reunión bilateral con el organismo regulador de Francia

Del 27 al 29 de abril se celebró en Salamanca la reunión bilateral entre el CSN y la DSIN (Dirección de Seguridad de las Instalaciones Nucleares francesa)



Miembros de las delegaciones del CSN y de la DSIN, durante su visita a la fábrica de elementos combustibles de Juzbado.

## PRINCIPALES ACUERDOS DEL CSN

### Gestión de aceites usados, con baja actividad, en Cofrentes

El Consejo aprobó en diciembre de 1999 la metodología establecida en el proyecto presentado por Unesa para la gestión de aceites contaminados en la operación de las centrales nucleares.

De acuerdo con esta decisión, se ha aprobado la gestión como residuos convencionales de aceites de muy bajo contenido en actividad, generados durante la operación de la central nuclear de Cofrentes, en cumplimiento de la legislación vigente sobre residuos radiactivos, estableciendo requisitos

que aseguren que las dosis potencialmente recibidas por los miembros del público sean triviales, muy por debajo de los límites fijados.

### Aprobación de la metodología Giralda para Cofrentes

El Consejo ha informado favorablemente la metodología Giralda para la realización del diseño y la evaluación de la seguridad de las recargas de la central nuclear de Cofrentes, metodología con la que ya se aprobó la anterior recarga de la central, efectuada en abril de 1999, pero que ahora se informa

como sistemática para todas las recargas de esta central.

### Gestión de fuentes de radio en el Ciemat

El Consejo ha informado favorablemente el plan de gestión de los materiales radiactivos almacenados en una instalación radiactiva del Ciemat. Dicho plan prevé que Enresa envíe a Estados Unidos las fuentes y materiales que contengan radio-226, debiendo esta empresa informar al CSN de los transportes que realice y elaborar un informe sobre los aspectos de seguridad nuclear y protección radiológica, una vez finalizada la operación.

correspondiente al año 2000. La agenda incluía asuntos de legislación, gestión de residuos y revisión de la seguridad en centrales nucleares. Al final de la reunión se realizó una visita a la fábrica de Juzbado. La delegación del CSN estuvo compuesta por el presidente, el secretario general, el director técnico, el subdirector de Ciclo y Residuos y el responsable de relaciones internacionales.

### Comité de Dirección de la NEA/OCDE

El Consejo de Seguridad Nuclear participó en el Comité de Dirección de la NEA (Agencia de Energía Nuclear de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), que se celebró en la sede de la OCDE en París los días 10 y 11 de mayo. Representó al CSN el secretario general, Luis del Val. El comité aprobó la propuesta de programa de trabajo y el presupuesto para el periodo 2001-2002 y discutió la reestructuración de los comités técnicos. Durante la reunión se organizaron dos debates específicos sobre el desarrollo sostenible y la ampliación de la NEA a los países del este de Europa.

### Visita de una representación de Ucrania

Dentro del programa bilateral existente entre el CSN y la SNRA (Administración Estatal de Regulación Nuclear ucraniana), durante los días 17 al 19 de mayo, y por invitación del Consejo, el CSN recibió la visita de una delegación ucraniana formada por miembros del Parlamento, del Ministerio de Finan-

zas y del SNRA, para debatir la experiencia del Consejo en la financiación del organismo regulador a través de tasas. El parlamento de Ucrania ha debatido durante el mes de junio una ley de tasas propuesta por el SNRA, que ha tomado como modelo la ley española.

### Reunión del WENRA

En Bruselas se celebró, entre los días 17 al 19 de junio, una reunión del WENRA (Asociación de Reguladores Nucleares de Europa Occidental). Durante el encuentro se discutió la nueva revisión del informe sobre el estado de la seguridad nuclear en los países candidatos a la ampliación de la Unión Europea, las actividades internas de armonización y las relaciones del WENRA con las instituciones europeas. En la sesión del segundo día participaron los organismos reguladores de los países candidatos y las tres direcciones generales involucradas en la ampliación: DG ELARG, DG TREN y DG ENV.

## INFORMACIÓN GENERAL

### Simulacro de emergencia en Santa María de Garoña

El día 14 de marzo se llevó a cabo un simulacro de emergencia exterior en el entorno de la central nuclear de Santa María de Garoña, que incluyó la puesta en  
(continúa en la página 42)

## REORGANIZACIÓN DEL CSN

### 1. Necesidad de abordar una reestructuración organizativa del CSN. Cambios en el entorno legislativo y su incidencia en el marco competencial y funcional del CSN

En los dos últimos años se han producido dos cambios legislativos que han alterado de manera significativa el ámbito competencial y funcional del CSN:

— La Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico.

— La Ley 14/1999, de 4 de mayo, de Tasas y Precios Públicos por servicios prestados por el CSN.

La Ley del Sector Eléctrico ha desregulado la actividad de generación eléctrica, estableciendo un régimen de libre competencia. En este nuevo sistema, a diferencia del anterior, no se reconocen directamente en la tarifa los costes de generación, que son remunerados vía precios.

El impacto de la desregulación económica en la seguridad

de las centrales no es un tema exclusivo de España, sino que está siendo considerado y abordado por los organismos reguladores de varios países, como Suecia, Estados Unidos y Alemania, que están adoptando decisiones para la reorientación de sus prácticas.

En este nuevo marco, el CSN debe velar, por un lado, para que las exigencias económicas no influyan negativamente en la seguridad nuclear y, por otro lado, debe evitar imponer cargas innecesarias a los explotadores de las instalaciones.

Para lograr este objetivo resulta imprescindible reforzar la actividad inspectora y de control y el análisis de la experiencia operativa de las centrales nucleares, así como mejorar la eficacia reguladora, analizando la relación coste-beneficio asociada a los requisitos a exigir, y concentrando la inspección y la evaluación en aquellos aspectos con mayor incidencia en la seguridad, utilizando nuevas técnicas y métodos de tra-

bajo, y nuevos métodos de planificación e inspección.

La aprobación de la Ley de Tasas ha supuesto la atribución al CSN de nuevas competencias en materia de protección radiológica del público y del medio ambiente, gestión de residuos radiactivos, coordinación de emergencias nucleares y radiológicas, y actividades no reguladas por la legislación nuclear y normas técnicas.

### 2. Apoyos parlamentarios

La Comisión de Industria, Energía y Turismo del Congreso de los Diputados, consciente de la nueva realidad, normativa y fáctica, y de su incidencia en la seguridad nuclear y la protección radiológica, adoptó diversas resoluciones constatando la necesidad de dar respuesta a estos nuevos retos mediante el establecimiento de una estructura diferente y suficiente del organismo, para reforzar el control de las centrales nucleares y afrontar las nuevas responsabilidades en el

Organigrama del CSN (1999)



ámbito de la vigilancia radiológica del medio ambiente, instando al Gobierno y al propio Consejo a adoptar las medidas necesarias al respecto.

### 3. La reorganización del CSN, respuesta a los nuevos retos

La reorganización del CSN se ha producido mediante la modificación puntual de su Estatuto (artículo 41), aprobada, a petición del Consejo, por Real Decreto 469/2000, de 7 de abril, publicado en el BOE del día 10 de mayo.

Los aspectos generales más destacables son los siguientes:

— A nivel organizativo se separan las competencias en materia de seguridad nuclear y protección radiológica mediante el desdoblamiento de la antigua Dirección Técnica en la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear y la Dirección Técnica de Protección Radiológica. Esta separación se explica por razones de racionalidad y eficiencia, por cuanto que al ser los conocimientos técnicos y científicos y las ramas de especialidad que sustentan cada una de estas funciones

diferentes y regirse por normativas técnicas distintas, con la separación entre las mismas se puede lograr un mayor grado de especialización y de eficiencia de los recursos humanos y técnicos disponibles. Este concepto de asunción por organismos distintos de las funciones correspondientes a seguridad nuclear y protección radiológica está generalizado en la mayor parte de los países de la OCDE que cuentan con instalaciones nucleares.

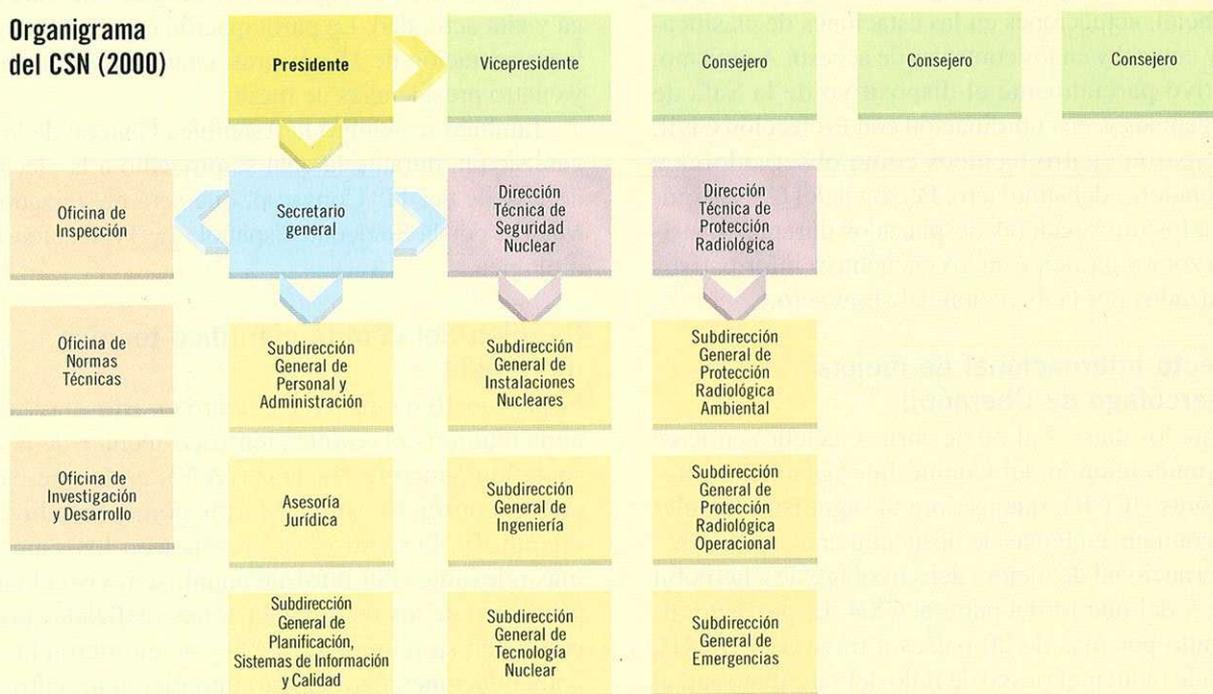
— En la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear se agrupan todas las funciones relativas a la seguridad de las instalaciones nucleares, excepto las de almacenamiento de residuos radiactivos de media y baja actividad, que corresponden a la Dirección Técnica de Protección Radiológica. También asume lo relativo a la seguridad de los transportes de sustancias nucleares y materiales radiactivos. Esta agrupación de competencias en un solo centro directivo altamente especializado permitirá optimizar la inspección, la eficacia reguladora y el control de las instalaciones nucleares.

— La Dirección Técnica de Protección Radiológica, además de la inspección y control de las instalaciones radiactivas, de la protección radiológica de los trabajadores y de la gestión de residuos radiactivos de media y baja actividad, asume las nuevas competencias en materia de protección radiológica del público y del medio ambiente y de emergencias radiológicas. Se separa lo relativo a la protección radiológica de los trabajadores de lo que atañe a la protección radiológica ambiental y del público en general, por las diferentes connotaciones y requerimientos específicos que tienen.

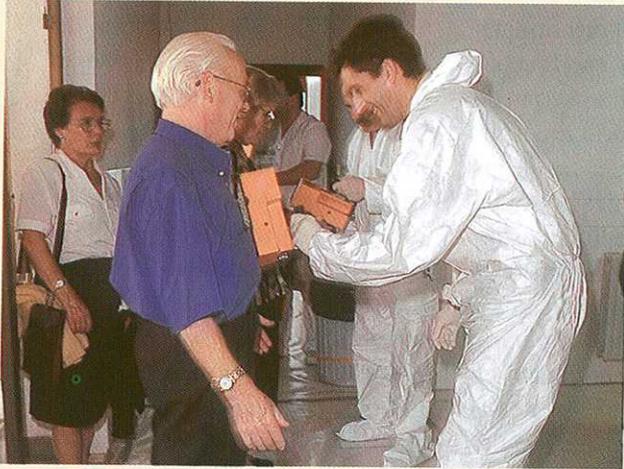
— Se refuerzan las actividades horizontales de planificación, normas técnicas, investigación y desarrollo y coordinación de la inspección, encuadrándolas en la Secretaría General. Para ello, además de la actual Oficina de Inspección, se crean sendas oficinas de Normas Técnicas e I+D.

**Luis del Val, secretario general del CSN.**

**Organigrama del CSN (2000)**



(viene de la página 39)



Un momento del desarrollo del simulacro de emergencia exterior en el entorno de la central nuclear de Santa María de Garoña.

práctica de las principales medidas de protección en emergencias: confinamiento, profilaxis y evacuación. Durante el simulacro se activaron los principales elementos de decisión y actuación del Plan de Emergencia Nuclear de Burgos (Penbu), entre ellos el Centro de Coordinación Operativa Provincial, la Sala de Emergencias del CSN y el Centro Estatal de Coordinación de la Dirección General de Protección Civil, los centros de coordinación operativa de las poblaciones afectadas, los controles de accesos y las estaciones de clasificación y descontaminación de Medina de Pomar y Miranda de Ebro.

El Consejo de Seguridad Nuclear participó en el diseño y preparación del simulacro, así como en su ejecución en varios puntos de actuación relacionados con las actividades del grupo radiológico del plan provincial, actuaciones en las estaciones de clasificación y control y en los controles de acceso. Asimismo, se activó parcialmente el dispositivo de la Sala de Emergencias y, en coordinación con Protección Civil, participaron cuatro técnicos como observadores y controladores del simulacro. Personal del CSN acompañó a los informadores desplazados durante su visita a la zona y participó en los encuentros informativos organizados por la dirección del simulacro.

### Proyecto internacional de mejora del sarcófago de Chernóbil

Durante los días 17 al 20 de abril se celebró en Kiev la segunda reunión del Comité Internacional de Reguladores (ICCR), que asesora al organismo regulador ucraniano en temas de licenciamiento del proyecto internacional de mejora del sarcófago de Chernóbil (SIP), y del que forma parte el CSN. El proyecto, financiado por más de 20 países a través del BERD, pretende reducir el riesgo de fallo del sarcófago actual y proponer una solución definitiva para el material nuclear contenido en su interior.

El comité realizó una serie de recomendaciones, que atañen no sólo a aspectos concretos de la evolución y gestión del proyecto, sino a las propias capacidades del organismo regulador para poder ejercer su función.

### Reunión del grupo CONCERT

Durante los días 29 y 30 de junio se celebró en Kiev la reunión del grupo Concert, que preside el consejero del CSN Aníbal Martín. La agenda incluyó debates sobre la eficiencia del organismo regulador y la garantía de calidad interna. Aprovechando esta visita, se mantuvieron reuniones bilaterales con el organismo regulador ruso (GAN), en Moscú, y con la autoridad ucraniana (SNRA), en Kiev. Ambas reuniones responden a una solicitud recibida de dichos organismos.

### Décimo congreso de la IRPA

En Hiroshima (Japón) se celebró, entre el 14 y el 19 de mayo, el X Congreso de la Asociación Internacional sobre Protección Radiológica (IRPA), organización que agrupa a 16.000 profesionales de todo el mundo relacionados con la protección radiológica para intercambiar conocimientos y experiencias sobre el tema mediante reuniones y congresos que se celebran cada cuatro años.

En esta ocasión, el título del congreso fue *Armonización de las radiaciones, humanidad y ecosistema* y se estructuró en 24 sesiones monográficas, destacando las dedicadas a nuevos modelos de dosimetría interna, exposición ocupacional a rayos cósmicos y radón, lecciones aprendidas de los accidentes -incluyendo una sesión especial sobre Tokaimura-, percepción pública y gestión de residuos de vida larga y alta actividad. La participación española incluyó la presentación de 15 pósteres, cuatro presentaciones y cuatro presidencias de mesa.

También se celebró la Asamblea General de la organización, durante la cual se procedió a la elección de la sede del 11º Congreso, que será organizado en Madrid por la Sociedad Española de Protección Radiológica.

### Reunión del comité científico-técnico de la AVN

El pasado 10 de mayo se celebró en Bruselas la décima reunión del comité científico-técnico de la Asociación Vinçotte Nuclear (AVN), en la que participó el consejero Aníbal Martín, como miembro del mismo. En la reunión se presentaron los aspectos más relevantes del informe anual, se revisó el cumplimiento de las recomendaciones realizadas por el comité en su reunión de 1999 y se emitieron las recomendaciones para el próximo ejercicio, entre las que destacan la definición del papel de AVN en el sistema regulador belga, el establecimiento de un

enlace de datos con la sala de emergencias de AVN, el desarrollo de los análisis probabilísticos de seguridad, la actualización de los APS o la posibilidad de que AVN considere la realización de una misión OSART en alguna central nuclear belga.

### Estudio sobre el impacto del combustible gastado

La Agencia de la Energía Nuclear (NEA) de la OCDE presentó en mayo un estudio técnico sobre el impacto radiológico derivado de la gestión del combustible gastado, comparando el que se produce cuando es sometido a reprocesado y cuando es almacenado directamente. El informe se ha llevado a cabo por encargo de la comisión OSPAR y ha sido realizado por 18 expertos internacionalmente reconocidos. Sus conclusiones indican que en ambos casos el impacto radiológico es mínimo, muy por debajo de los límites establecidos para el público en general y los trabajadores en particular, y que no se han encontrado diferencias significativas entre ambos ciclos, por lo que no caben argumentos a favor de uno ni de otro.

### Misión aérea del OIEA para localizar fuentes abandonadas en Georgia

Desde la independencia del estado de Georgia, antiguo miembro de la URSS, se ha encontrado en su territorio cerca de 300 fuentes radiactivas abandonadas, en algunos casos con graves consecuencias, como la irradiación sufrida por once guardias de frontera que debieron ser hospitalizados en 1997.

Para tratar de reducir el problema, y a requerimiento del Ministerio de Medio Ambiente de este país, el OIEA ha lanzado un programa de reconocimiento aéreo de Georgia para la detección de otras fuentes radiactivas abandonadas y descontroladas. Entre el 23 de mayo y el 16 de junio pasado, un equipo de seis personas sobrevoló una zona concreta del territorio georgiano a bordo de un helicóptero equipado con un sistema de detección de rayos gamma, facilitado por el Comisariado de la Energía Atómica francés. Los resultados de la misión serán ofrecidos por el OIEA al Gobierno de Georgia antes de hacerse públicos.

## ▶ CENTRALES NUCLEARES

*Información referida a los meses de marzo, abril y mayo de 2000.*

### José Cabrera

La central funcionó durante este periodo sin incidencias destacables. El Consejo de Seguridad Nuclear informó favorablemente la revisión 31 de las especificaciones técnicas, que incluye la mejora y actualización de los apartados correspondientes a las fuentes

de corriente alterna y sus bases, así como otros cambios de menor relevancia.

El CSN comunicó al titular un apercibimiento por la ejecución inadecuada de unas pruebas de vigilancia, en las que no se respetaba estrictamente la secuencia requerida.

Durante estos meses, el CSN realizó cinco inspecciones a la central.

### Santa María de Garoña

La central funcionó durante este periodo sin incidencias destacables.

El CSN informó favorablemente la renovación del uso de varios barracones para almacenamiento transitorio de materiales con bajo nivel de actividad.

Durante estos meses, el CSN realizó seis inspecciones a la central.

### Almaraz

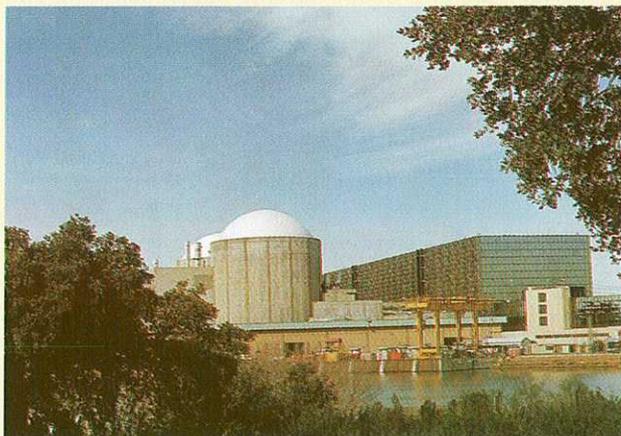
Las dos unidades de la central nuclear de Almaraz funcionaron durante los tres meses sin incidencias destacables. La unidad II inició una parada para recargar combustible el día 6 de mayo.

El CSN informó favorablemente la revisión AC-10 del estudio de seguridad, que incluye una puesta al día general del documento.

Asimismo, el CSN informó favorablemente las revisiones 56 y 51 de las especificaciones técnicas de ambas unidades, en las que se modifican los apartados correspondientes al control de boro del primario, al núcleo del reactor, al sistema de extracción de calor residual, a las protecciones contra tensión degradada y a los informes remitidos al Consejo.

El 18 de mayo, el CSN emitió un dictamen favorable para la renovación de la autorización de explotación de ambas unidades por un periodo de diez años, estableciendo las condiciones correspondientes a dicha autorización. Para la emisión de este dictamen se tuvo en cuenta la evaluación de la revisión periódica de la seguridad presentada en junio de 1999.

El CSN emitió un informe favorable admitiendo que el embalse de Arrocampo pueda cumplir funcio-



Central nuclear de Almaraz.

nes de seguridad como sumidero final de calor en el caso extremo y muy poco probable, detectado en la revisión de bases de diseño efectuada por la central, en el que la temperatura del embalse de esenciales pudiera no permitir mantener las condiciones ambientales establecidas en determinadas salas de la central. En todo caso, en el informe del CSN se establece que esta situación debe considerarse transitoria y que el titular tiene que presentar una propuesta de modificación del sumidero final de calor en el plazo de un año.

Asociadas a este cambio, se informaron favorablemente las revisiones 57 y 52 de las especificaciones técnicas, en las que se adaptan los apartados correspondientes al sumidero final de calor.

También se informaron favorablemente las revisiones 58 y 53 de las especificaciones técnicas de ambas unidades, en las que se actualizan los apartados correspondientes a las unidades de aire acondicionado de sala de control, a los puntos de consigna de la instrumentación de disparo de reactor y los límites de distribución de potencia, y a la instrumentación de actuación de salvaguardias. En todos los casos, menos el primero, que corresponde a ambas unidades, se trata de cambios para el nuevo ciclo de funcionamiento de la unidad II, iniciado tras la última recarga.

Durante estos meses, el CSN realizó 13 inspecciones a la central.

### Ascó

Las dos unidades de la central nuclear de Ascó funcionaron durante los tres meses sin más incidencias destacables que las tres paradas automáticas no programadas que se indican a continuación.

El día 10 de marzo se produjo una parada automática de la unidad I durante el proceso de reducción de potencia para el inicio de una parada de recarga, al producirse un fallo en la transferencia del transformador auxiliar de grupo a un transformador de arranque, que acabó provocando bajo nivel en los generadores de vapor.

El 14 de abril se produjo una parada automática de la unidad I por actuación de la protección de secuencia inversa del alternador durante la ejecución de una



Central nuclear de Ascó.

prueba periódica de dicha protección, debido al fallo de un relé inhibitor.

El 4 de mayo se produjo una parada automática de la unidad II por bajo nivel en un generador de vapor causado por el cierre espurio de la válvula de control de agua de alimentación.

En el periodo comprendido entre el 11 de marzo y el 8 de abril tuvo lugar la parada para recarga de la unidad I, en la que, entre otras actividades, se realizaron las modificaciones en el alternador y otros equipos eléctricos, necesarias para la subida de potencia.

El CSN informó favorablemente la revisión 59 de las especificaciones técnicas de la unidad I, en la que se modifican los apartados afectados por la subida de potencia, que son requeridos para iniciar la carga del combustible, y se autoriza la carga del combustible tipo MAEF.

Con fecha 4 de abril, el CSN emitió un dictamen favorable para la subida de potencia térmica de la unidad I al 108%. El Consejo también informó favorablemente las revisiones correspondientes a esta modificación del estudio de seguridad (revisión 26) y de las especificaciones técnicas (revisión 60).

Con posterioridad, el CSN informó favorablemente los resultados de las pruebas realizadas en la unidad I para confirmar el correcto funcionamiento a la potencia incrementada.

El CSN informó favorablemente una solicitud de exención temporal al reglamento de funcionamiento y al plan de emergencia interior, con relación a la necesidad de disponer en los turnos del puesto de ayudante del supervisor.

Durante estos tres meses, el CSN realizó seis inspecciones a la central.

### Cofrentes

La central funcionó durante este periodo sin incidencias destacables.

El CSN comunicó al titular un apercibimiento por no haber realizado un análisis adecuado de la respuesta de la central tras un suceso ocurrido en la misma.

El Consejo propuso la apertura de un expediente sancionador por haber efectuado el titular una modificación en la configuración de las penetraciones de la contención sin haber analizado adecuadamente que dicha modificación cambiaba el tipo de prueba que periódicamente se debe realizar, según establecen las especificaciones técnicas aplicables.

Durante estos meses, el CSN realizó dos inspecciones a la central.

### Vandellós II

La central funcionó durante este periodo sin incidencias destacables.

Durante estos meses, el CSN realizó tres inspecciones a la central.

## Trillo

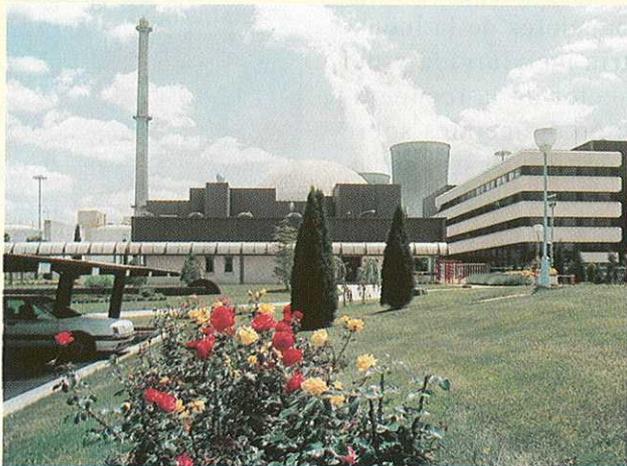
La central funcionó durante este periodo sin más incidencias que una parada automática no programada, que se produjo el 24 de abril al alcanzarse bajo nivel en los generadores de vapor tras cerrar espuriamente la válvula de descarga de una bomba de agua de alimentación principal.

La central realizó una parada para recarga en el periodo comprendido entre los días 1 y 22 de abril.

El CSN informó favorablemente una solicitud de exención temporal de los requisitos de operabilidad del sistema sísmico de protección contra incendios.

Se informó también favorablemente la revisión 24 de las especificaciones técnicas en la que se actualizan diversos apartados en relación con modificaciones implantadas durante la recarga.

Durante estos meses, el CSN realizó ocho inspecciones a la central.



Central nuclear de Trillo.

## TECNOLOGÍA

### Celebrado en Barcelona el congreso Codes 2000

Durante los días 10 al 13 del pasado mes de abril se celebró en Barcelona un congreso internacional bajo el título *OECD/CSI Workshop on Advanced Thermal-Hydraulic and Neutronic Codes: Current and Future Applications*. La reunión, a la que asistieron un total de 116 participantes de 22 países, fue patrocinada por la NEA, la Universidad Politécnica de Barcelona y el CSN. Por parte española, hubo cuatro presentaciones técnicas, así como una disertación a cargo del consejero del CSN Agustín Alonso titulada *Uso de códigos avanzados termohidráulicos y neutrónicos en países intermedios: el caso de España*.



Logotipo del congreso Codes 2000.

Este foro permitió analizar los desarrollos realizados durante los últimos años, así como establecer los puntos susceptibles de mejora. Además, se puso de manifiesto el importante papel de las metodologías basadas en el uso de códigos realistas dentro de las nuevas tendencias reguladoras y el modo en que el uso de estas potentes herramientas permite mejorar el conocimiento del comportamiento de las centrales nucleares y, simultáneamente, incrementar la disponibilidad de las mismas, sin menoscabo de la seguridad.

## INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

### Primeras actividades del CEIDEN

El Comité Estratégico de I+D sobre Energía Nuclear (CEIDEN) está elaborando una primera versión de las estrategias y prioridades sobre I+D, que tiene previsto concluir en fecha próxima.

Este comité, promovido por el Ministerio de Industria y Energía en el último trimestre de 1999, está presidido por el director general de la Energía, e integrado por el secretario general del CSN, los presidentes de Enusa y Enresa, los directores de producción de Endesa e Iberdrola, el director general del Ciemat y el asesor energético del director de la Oficina de Ciencia y Tecnología.

Entre los objetivos asignados al CEIDEN se encuentra la definición de las líneas de investigación y el establecimiento de un plan estratégico conjunto de I+D a escala nacional, a partir de los análisis, estudios y propuestas preparadas por los diferentes agentes tecnológicos; establecer los esquemas de financiación de los nuevos desarrollos; y orientar, cuando sea posible, la obtención de fondos de otros programas, como el V Programa Marco de Euratom, y realizar el seguimiento de los programas de I+D en desarrollo, efectuando recomendaciones para corregir las desviaciones.

Se trata de coordinar a las entidades implicadas para optimizar los medios y recursos disponibles. Como tareas iniciales el comité se impuso el conocimiento de la realidad de los distintos programas existentes para después establecer temas prioritarios y estrategias a seguir. Para realizar estas tareas se constituyó una comisión que dispone ya de una primera base de datos de proyectos, y tiene muy avanzada la elaboración de unas estrategias de I+D, a través de siete grupos de trabajo.

## PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

### Gestión de la exposición ocupacional en las centrales nucleares

El Sistema de Información de Exposiciones Ocupacionales (ISOE) es una iniciativa de la Agencia de

Energía Nuclear de la OCDE, cuyas labores de secretariado comparte hoy con el OIEA, para el intercambio de información y experiencias sobre la protección radiológica de los trabajadores de las instalaciones nucleares y su optimización. Entre sus actividades se encuentra la organización de un seminario anual que se celebra alternativamente en Europa y en Estados Unidos.

El cuarto de estos seminarios se celebró en Tarragona del 4 al 7 de abril. Fue organizado por el Centro Técnico Regional Europeo del ISOE, en colaboración con la Comisión Europea, con el patrocinio de Enresa, la asociación Ascó-Vandellós y Framatome. Asistieron 160 expertos de 23 países, la mayoría perteneciente a la UE y EEUU, resaltando también la presencia de representantes del este de Europa.

La apertura del seminario corrió a cargo del vicepresidente del CSN, Aníbal Martín, quien destacó los desafíos que plantea el nuevo marco de liberalización del sector eléctrico en el ámbito internacional y expresó su confianza en que continuarán progresando los niveles de calidad desarrollados por las instalaciones, de los que la protección radiológica es un indicador esencial.

Entre los temas abordados cabe destacar los debates sobre nuevos retos para la mejora de los resultados, desmantelamiento de instalaciones nucleares, cambio de grandes componentes, sistemas de medida de las radiaciones y técnicas de reducción de dosis.

### Reuniones Alara: recomendaciones y nueva convocatoria

El comité de organización de la tercera reunión Alara, celebrada en noviembre pasado en Munich, ha identificado los aspectos más relevantes puestos de manifiesto durante las sesiones de trabajo. Estos aspectos se engloban en dos grandes grupos, que incluyen las situaciones de riesgo de contaminación interna: las debidas al funcionamiento normal de las instalaciones del ciclo de combustible y operaciones de desmantelamiento, donde la exposición es predecible y los valores por debajo de los límites, y las producidas por exposición accidental, que pueden ser evaluadas probabilísticamente y deben tratarse mediante medidas preventivas. También se destaca la necesidad de disponer de métodos y recursos lo más sencillos posible pero con suficiente precisión para la estimación rutinaria de las dosis internas.

De las conclusiones se extraen seis recomendaciones, entre las que destacan: realizar esfuerzos para incrementar la información sobre el número de trabajadores expuestos y el perfil de las dosis; establecer un balance entre la precisión científica de los datos y la rapidez de disponibilidad de la información, aplicando los protocolos más complejos cuan-

do las dosis sean altas; promover la aplicación del principio Alara para exposición externa a la exposición interna e incrementar la frecuencia de intercambios de información como los producidos durante la tercera reunión Alara.

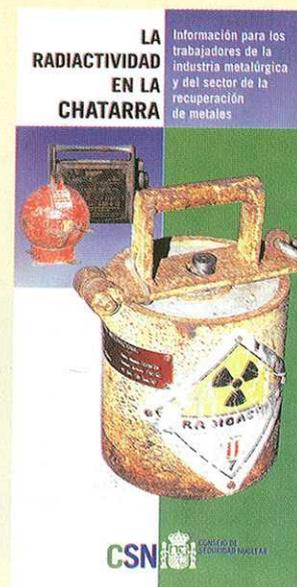
El cuarto seminario de la red Alara europea se celebrará en Amberes (Bélgica), durante los días 20 al 22 de noviembre próximo, bajo el título *La gestión de riesgos ocupacionales radiológicos y no radiológicos: lecciones a aprender*.

## ► PUBLICACIONES

### La radiactividad en la chatarra

CSN 2000

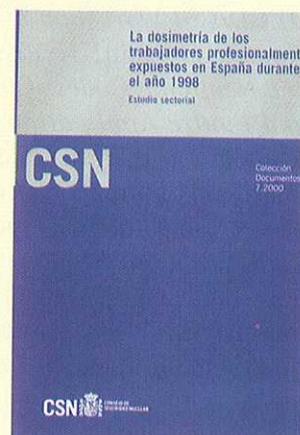
El objetivo de este folleto es aportar información útil para los trabajadores de la industria metalúrgica y del sector de la recuperación de metales sobre cómo actuar si se detecta material radiactivo entre la chatarra. Esta publicación se suma a otras actuaciones llevadas a cabo recientemente por el Consejo de Seguridad Nuclear dentro de un programa más extenso promovido conjuntamente por la industria del metal, el sector de la recuperación y diversos organismos públicos.



### La dosimetría de los trabajadores profesionalmente expuestos en España durante el año 1998

CSN. Colección Documentos 7.2000

Este documento, que recoge información sectorial, tiene por objetivo realizar un seguimiento de la distribución de dosis anual en los distintos tipos de trabajo que implican exposición a las radiaciones ionizantes. Incluye datos de dosimetría externa e interna, así como la comparación de los datos dosimétricos correspondientes a 1998 con los relativos a los años 1995, 1996 y 1997. De esta forma se pretende



### Los residuos peligrosos. Caracterización, tratamiento y gestión

Editores: J.J. Rodríguez y A.  
Irabien Gullías.  
Editorial Síntesis

Es sabido que la cantidad de residuos, desechables o no, que produce una sociedad es uno de los índices más explícitos de su nivel de desarrollo, es decir, del nivel de vida. Ciertamente, ésta es una manera optimista de plantear el problema global y sería un sofisma admitirlo como justificación de cierta autocomplacencia con que algunos sectores de nuestra sociedad, sobre todo en tiempos pasados, han agredido al entorno –al medio ambiente– con su producción masiva de desechos apoyándose en la mística del desarrollismo. Y es que, ciertamente, son dos conceptos a primera vista contradictorios. No hay en el mundo ni una sola agrupación social que globalmente renuncie a mejorar, en uno u otro capítulo, su nivel de bienestar. Pero tal proceso supone inevitablemente un incremento en la producción de residuos. Sin embargo, y ésta debe ser la piedra angular sobre la que se apoye la solución a este dilema aparente, es posible cohonestar ambas posiciones; es decir, se puede mantener un

desarrollo sostenido, minimizando al mismo tiempo la producción de residuos. Y esta postura, que es estrictamente técnica, con el objetivismo que eso supone, ha de ser explicada claramente a los poderes públicos a fin “de que se haga lo que debe ser hecho”. Naturalmente, el primer paso a dar es averiguar la fenomenología del proceso, es decir, conocer con detalle el proceso de su producción y de su evaluación/eliminación. Y éste, que es un problema presente en casi todas las actividades de la sociedad moderna, todavía no está completamente resuelto. Naturalmente se continúa investigando porque sólo si se tiene un conocimiento detallado del fenómeno global se estará en condiciones de atacar de forma óptima la manera de minimizar la acumulación de residuos.

El libro *Los residuos peligrosos. Caracterización, tratamiento y gestión* contempla este tema con perspectiva global. Es la primera publicación en castellano en que se analiza conjuntamente la problemática de los residuos provenientes de cualquier tipo de industria. El tratado incluye procedimientos de caracterización, técnicas de tratamiento físico y químico, técnicas biológicas e incine-

ración, eliminación geométrica y minimización en la producción. También se incluye la problemática de los residuos radiactivos, especie de ente malévolos que –a juzgar por la forma de pronunciarse de algunos grupos sociales– esperarán agazapados lo que tengan que esperar, para después actuar de forma insidiosa, atacando a traición y destruyendo al ser humano y a su entorno.

Por supuesto, la parte jurídica –regulación, auditorías, alcance y gestión de la calidad–, como parte inevitable en la actualidad de cualquier proceso tecnológico, también está presente, aunque en una proporción adecuada, es decir, mínima (65% del promedio de los temas técnicos). Completa este magnífico libro un capítulo inicial de contenido histórico y un prólogo que, desde el principio, centra el problema en su escaño propio.

Nada puede decirse de sus autores que no sea en tono de alabanza: profesores de la universidad y, en general, expertos –muy expertos– en el tema del que escriben. Es un libro que, hoy por hoy, inmersos como estamos en la cultura de protección al medio ambiente, debería figurar en toda biblioteca.  
**Rafael Caro.**

evaluar la tendencia experimentada a lo largo del tiempo en relación con la vigilancia y control dosimétrico de los trabajadores profesionalmente expuestos.

### Proyecto DAÑOS

CSN. Colección Otros Documentos. 19.2000

Este documento recoge las conclusiones y metodología aplicada en el desarrollo del proyecto de investigación DAÑOS, que el Consejo de Seguridad Nuclear inició en diciembre de 1996, en colaboración con Enresa, y que se ha llevado a cabo durante los años 1997 y 1998. Con esta investiga-

ción se ha pretendido desarrollar una metodología para mejorar las estimaciones de peligrosidad y riesgo sísmico en emplazamientos españoles, corrigiendo así la escasez de datos que se produce por tratarse la Península Ibérica de una zona con una sismicidad baja. 



(Page 2)

**Analytical intercomparisons in environmental samples. 1999 campaign**

**Lucila María Ramos, Lourdes Moreno, Rosario Salas**

Radiological surveillance of the environment calls for a high degree of metering sensitivity since very low radioactivity levels are being determined. Quality systems are implemented to guarantee suitable result reliability and controls are applied such as intercomparison exercises. This article presents a historic review of the campaigns carried out and the 1999 campaign is analyzed in detail.

(Page 11)

**Deep geological storage: an inevitable, ethically correct solution.**

**Maurice Allegre**

The article reflects on deep geological storage as a solution for high activity radioactive waste management and considers the impact for coming generations. It also analyzes other possible management models and their advantages and

# Resúmenes

disadvantages with respect to a type of storage the author deems unavoidable.

(Page 17)

**The Tracer project: calibration of the Corvel code in rivers and reservoirs**

**Fernando Sánchez, Roberto Gil, María del Carmen Palancar, José Manuel Aragón**

The article describes the main experiments carried out in this project, the aim of which is to adapt the Corvel code into the hydrological systems which might be affected by an accidental discharge from a nuclear power plant.

(Page 24)

**Chromosomic alterations through ionizing radiations: formation mechanisms**

**A. Genescà, L. Tusell, I. Ponsa, L. Latre, M. Martín, R. Miró, J. Egozcue**

Analyzing the effects of ionizing radiations on chromosomes has become one of the basic tools in radiological protection. The effects caused by ionizing radiations on the DNA are summarized hereafter, together with the natural repair mechanisms cells possess.

(Page 30)

**Application of *in situ* gamma spectrometry to external dosimetry**

**José Luis M. Matarranz**

This article describes the activities and results obtained by the Ciemat's Radiation Dosimetry Group in fine tuning the *in situ* gamma spectrometry technique, as well as its application to external dosimetry. The possibilities for its application to different radiological protection fields are also analyzed.

## Seguridad Nuclear Boletín de suscripción

Institución/Empresa

Nombre

Tel.

Fax

Dirección

CP

Localidad

Provincia

Fecha

Firma

Enviar a Consejo de Seguridad Nuclear, Servicio de Publicaciones. c/ Justo Dorado, 11. 28040 Madrid. Número de fax: 91 346 05 58.