



MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN



## Convenio de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y el Instituto de Salud Carlos III

*Estudio epidemiológico del posible efecto de las radiaciones ionizantes  
derivadas del funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas del  
ciclo de combustible nuclear españolas sobre la salud de la población que  
reside en su proximidad*

### ***Resumen del informe final***

Versión: diciembre 2009

Área de Epidemiología Ambiental y Cáncer  
Centro Nacional de Epidemiología  
Consejo de Seguridad Nuclear

# ÍNDICE

<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>3</b>
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	3
CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL ESTUDIO .....	3
<i>Alcance</i> .....	3
<i>Metodología</i> .....	4
RESULTADOS .....	4
<i>Instalaciones / radiación artificial</i> .....	4
<i>Radiación natural</i> .....	5
CONCLUSIONES .....	5
<b>INFLUENCIA DE LAS INSTALACIONES NUCLEARES E INSTALACIONES RADIATIVAS DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR SOBRE LA MORTALIDAD POR CÁNCER EN LAS PERSONAS QUE HABITAN EN SU ENTORNO EN ESPAÑA.....</b>	<b>6</b>
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	6
2. MATERIAL Y MÉTODOS.....	7
2.1 <i>Diseño del estudio epidemiológico</i> .....	7
Selección de los municipios del entorno de las instalaciones nucleares y municipios control.....	7
Tabla 1. Centrales nucleares e instalaciones del ciclo del combustible estudiadas .....	8
Selección de municipios de dos áreas con diferente exposición a radiación natural .....	8
Causas a estudiar .....	8
Tabla 2. Tipos de cáncer seleccionados en el estudio.....	9
2.2 <i>Estimación de la exposición a las radiaciones ionizantes en el entorno de las instalaciones objeto del estudio</i> .....	9
Selección de un indicador de exposición para cada municipio incluido en el alcance del estudio .....	9
Estimación de las dosis de radiación artificial a los miembros del público en el entorno de las centrales nucleares y de las instalaciones del ciclo y las debidas a la radiación natural.....	10
Criterios para el establecimiento de puntos de corte.....	11
2.3. <i>Análisis de la mortalidad</i> .....	11
Tabla 3. Rango de dosis de radiación artificial acumulada y natural anual en los municipios del entorno de cada una de ellas.....	13
3. RESULTADOS .....	13
<i>Comentarios generales sobre los efectivos del estudio, características socio demográficas y categorías de dosis de radiación</i> .....	13
Tabla 4. Características generales de la población estudiada en áreas adyacentes a las instalaciones.....	14
Tabla 5. Categorización de las dosis de radiación artificial (latencia de 10 años).....	15
Tabla 6. Categorización de las dosis de radiación artificial (latencia de 1 año).....	16
Tabla 7. Categorías de dosis anual de radiación natural por instalaciones en microSievert (cuartiles).....	16
<i>Comentarios sobre la magnitud de las dosis de radiación artificial y su distribución por centrales e instalaciones del ciclo</i> .....	17
<i>Resultados del análisis conjunto de las centrales nucleares</i> .....	17
Tabla 8. Análisis conjunto de todas las centrales nucleares .....	19
<i>Resultados para las instalaciones del ciclo del combustible</i> .....	20
Tabla 9. Análisis conjunto de las Instalaciones del ciclo del combustible .....	21
<i>Estudio del posible efecto de la radiación natural en el entorno de las instalaciones</i> .....	22
<i>Estudio del posible efecto de la radiación natural en zonas de alta y baja exposición alejadas de las instalaciones</i> .....	22
4. DISCUSIÓN .....	23
5. CONCLUSIONES .....	28

**Nota 1.** Este informe ha sido elaborado por el Instituto de Salud Carlos III (ISCIII) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) de acuerdo con sus respectivas competencias y funciones en los temas objeto del mismo. El CSN es el responsable de todos los aspectos relacionados con la reconstrucción de la historia de exposición de la población a las radiaciones ionizantes debidas al funcionamiento de las instalaciones y a las de origen natural. El ISCIII es el responsable del diseño y realización del estudio de mortalidad por cáncer en todos sus aspectos y de la redacción de todos los apartados del informe referidos a ello.

**Nota 2.** Para facilitar la comprensión como anexo del informe completo se ha incluido un glosario de términos técnicos y científicos que se utilizan en el mismo.

## **RESUMEN EJECUTIVO**

### **Introducción y antecedentes**

*Haciéndose eco de una demanda social sobre el impacto de las instalaciones nucleares en la salud de las personas, el Pleno del Congreso de los Diputados, en su sesión de 9 de diciembre de 2005, aprobó una Proposición No de Ley (PNL) por la que instaba al Gobierno a realizar el estudio, considerando, entre otros, los siguientes aspectos:*

- *El alcance del estudio debía incluir todas las instalaciones nucleares y sus entornos próximos, analizando los posibles efectos en la salud de la población*
- *El CSN debía colaborar, aportando la información necesaria para valorar la exposición a radiaciones de la población, tanto de origen artificial (instalaciones) como de origen natural*
- *Se debía garantizar la independencia en la investigación y la máxima transparencia en el desarrollo de las actividades. A tal efecto se planteó la creación de un "Comité Consultivo", con la participación de las instituciones afectadas, expertos independientes, entidades ecologistas y otras partes interesadas, para realizar el seguimiento de la ejecución del estudio y el análisis de resultados.*

*Con objeto de realizar el estudio, el Instituto de Salud Carlos III y el Consejo de Seguridad Nuclear suscribieron un Convenio de Colaboración en abril de 2006. A partir de esta fecha se puso en marcha el estudio, cuya ejecución se ha extendido hasta finales de 2009.*

*El Comité Consultivo se constituyó en septiembre de 2006 con un amplio abanico de organizaciones: autoridades sanitarias de todas las comunidades Autónomas afectadas por el alcance territorial del estudio, organizaciones sindicales, autoridades municipales, compañías propietarias de las instalaciones, organizaciones de defensa de la preservación del medio ambiente y seis expertos independientes (epidemiología, radiobiología y protección radiológica), junto con los representantes del Instituto de Salud Carlos III y del CSN. El Comité se ha reunido en seis ocasiones para tratar los aspectos metodológicos, los resultados de las estimaciones de dosis y los datos y resultados de los análisis de mortalidad, así como los aspectos relacionados con la comunicación y divulgación del estudio.*

### **Características básicas del estudio**

#### **Alcance**

*El estudio incluye todas las centrales nucleares y el resto de instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear del país, con independencia de que estén en operación, en fase de parada definitiva o en desmantelamiento y clausura.*

*El área de estudio incluye todos los municipios situados en un radio de 30 km alrededor de las instalaciones, cuya situación se compara con los municipios de una zona de control, con características socio demográficas similares pero no afectados por la operación de las instalaciones.*

*Adicionalmente, se ha estudiado la mortalidad por cáncer en los municipios situados en dos áreas geográficas caracterizadas por diferente índice de exposición a radiaciones de origen natural y no afectadas por la influencia de ninguna instalación nuclear o radiactiva del ciclo de combustible. En concreto se seleccionaron los municipios en dos áreas circulares de 30 km de radio, una en la comunidad autónoma de Galicia, con altos índices de exposición a radiación natural, y otra en la comunidad autónoma de Valencia, sometida a baja exposición a radiación natural.*

*En total se han estudiado más de 1.000 municipios, de los cuales cerca de 500 se sitúan en las áreas de influencia de las instalaciones. El resto corresponde a municipios de las zonas de control y de las dos áreas geográficas con alto y bajo índice de exposición a radiación natural.*

## **Metodología**

*La metodología del estudio es la definida por el ISC-III, de acuerdo con las prácticas actuales consideradas “estado del arte” en la materia. Se trata de un estudio ecológico de cohortes retrospectivas, en el que se contrasta la mortalidad por diferentes tipos de cáncer y leucemia de los residentes en todos los municipios situados en el entorno de las instalaciones españolas (30km) con la encontrada en los municipios utilizados como referencia (50 a 100 km). El periodo de estudio incluye los años 1975-2003.*

*El estudio es de tipo ecológico debido a que la variable central de análisis, la exposición a la radiación, es evaluada mediante un indicador, la dosis efectiva, estimado para cada grupo de población formado por los residentes de cada municipio, y se asigna a los individuos de dicho grupo (no se realiza un estudio individualizado de dosis en cada persona).*

*El indicador de exposición utilizado es la “dosis efectiva” debido a que este parámetro aporta claros beneficios, especialmente significativos en un estudio de amplio alcance y espectro, como el presente. Se han tenido en cuenta las limitaciones propias del uso de la dosis efectiva como indicador de exposición en estudios epidemiológicos. Esta aproximación ha sido avalada explícitamente por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) ante una consulta planteada por el CSN.*

*La reconstrucción histórica de la exposición de la población de cada municipio, se ha realizado mediante una metodología reconocida a nivel internacional, basada en la estimación de la dosis a la población debida a los efluentes líquidos y gaseosos de las instalaciones. Se han utilizado modelos teóricos de estimación, con parámetros ajustados a las características específicas de cada área geográfica en la que se sitúa cada instalación y representativos de un “individuo medio”.*

*Por lo que se refiere a la exposición a la radiación natural, se ha estimado la dosis anual que recibe un habitante tipo en cada uno de los municipios: los sometidos a estudio, los de las áreas de control y los de las dos áreas geográficas de Galicia y Valencia fuera del ámbito de influencia de las instalaciones.*

*Otras características importantes del estudio:*

- *Para todos los cánceres estudiados, con la excepción de las leucemias, se ha considerado un período (inducción) de diez años como el mínimo necesario que tiene que transcurrir desde que un individuo recibe una exposición a radiaciones hasta que desarrolla la enfermedad. Ese periodo se ha considerado de un año para leucemias.*
- *Se han considerado las variables que pueden actuar como factores de confusión, es decir que pueden alterar los resultados del estudio. Entre ellas, la exposición a radiaciones ionizantes de origen natural y diversos factores socio-demográficos.*
- *No se han tenido en cuenta otras exposiciones a las radiaciones ionizantes de origen artificial, como las de tipo laboral o las de tratamiento y diagnóstico médico.*

*Se ha analizado la mortalidad por cáncer para el conjunto de todas las centrales nucleares y para el conjunto del resto de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo, y se ha analizado individualmente cada una de las instalaciones. Por otro lado, se ha analizado la mortalidad por cáncer en relación con las exposiciones a radiaciones de origen natural, tanto en las áreas de influencia de las instalaciones como en las dos zonas seleccionadas fuera de las mismas.*

*Considerando la población de los municipios y el periodo de estudio, en la zona del entorno de las centrales nucleares se han contabilizado más de 7,5 millones de personas-año para leucemias y más de 5 millones de personas-año para el resto de tumores. En el entorno de las instalaciones del ciclo, el estudio ha contabilizado 8,5 millones de personas-año y 6,4 millones de personas-año para leucemias y resto de cánceres, respectivamente.*

## **Resultados**

### **Instalaciones / radiación artificial**

*Las dosis acumuladas estimadas que recibiría la población por el funcionamiento de las instalaciones son muy bajas, siendo el valor máximo 350 microSievert (el límite de dosis establecido para miembros del público en la reglamentación española es de 1.000 microSievert en un año).*

*Tanto en el análisis conjunto de las zonas de influencia de las centrales nucleares, como en el correspondiente a las instalaciones del ciclo, no se observan resultados consistentes que muestren un patrón de incremento de la mortalidad por cáncer asociado con la dosis. Por otro lado, en el estudio individualizado de cada instalación, tampoco se observan resultados que indiquen incrementos de dicha mortalidad, con algunas observaciones puntuales que no han podido ser atribuidas al efecto de las dosis generadas por su funcionamiento debido a que:*

- *En general, se trata de hallazgos aislados que no se repiten en el resto de instalaciones, por lo que no son consistentes.*
- *Las dosis estimadas en el entorno debidas al funcionamiento de cada instalación son muy bajas y similares a las de otras instalaciones en las que no se observan los mismos efectos.*
- *Algunas instalaciones del ciclo presentan situaciones de exposición que tienen características comunes con las que se producen en determinadas localizaciones debido a la radiación natural (isótopos, vías de transferencia, incorporación al organismo), siendo la magnitud de exposición a radiación natural varios órdenes de magnitud superior, no observándose ningún efecto asociado con ella en los análisis realizados.*
- *Estos resultados puntuales podrían atribuirse a otras formas de exposición ambiental, debidas a diferencias en los hábitos de vida, a la presencia de otras industrias y actividades, o al propio azar, que, teniendo en cuenta el gran número de comparaciones efectuadas, podría explicar por sí mismo un cierto número de asociaciones positivas (lo que podría explicar también algunas asociaciones estadísticas negativas, es decir, con disminución de la mortalidad al aumentar la dosis de radiación que se han encontrado de forma puntual).*

### **Radiación natural**

*Los estudios de mortalidad por cáncer realizados, tanto en las zonas de las instalaciones como en las dos zonas no afectadas por las mismas situadas en dos áreas geográficas con diferente nivel de exposición a radiación natural, no han detectado aumentos de mortalidad estadísticamente significativos al aumentar las dosis recibidas*

### **Conclusiones**

- *Las dosis estimadas acumuladas que habría recibido la población de las áreas de estudio como consecuencia del funcionamiento de las instalaciones son muy reducidas, y están muy por debajo de las que con los conocimientos científicos actuales podrían relacionarse con efectos en la salud de las personas*
- *No se han detectado resultados consistentes que muestren un efecto de incremento de la mortalidad por diferentes tipos de cáncer asociados a la exposición de las personas a las radiaciones ionizantes debidas al funcionamiento de las instalaciones. Se han encontrado algunas asociaciones dosis respuesta puntuales que no han podido ser atribuidas a la exposición derivada del funcionamiento de las instalaciones.*
- *Tampoco se han detectado excesos de mortalidad por cáncer estadísticamente significativos debidos a la radiación natural*

# INFLUENCIA DE LAS INSTALACIONES NUCLEARES E INSTALACIONES RADIATIVAS DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR SOBRE LA MORTALIDAD POR CÁNCER EN LAS PERSONAS QUE HABITAN EN SU ENTORNO EN ESPAÑA

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El Pleno del Congreso de los Diputados, en su sesión de nueve de diciembre de 2005, aprobó una proposición no de ley en la que instaba al Gobierno a realizar un nuevo estudio epidemiológico en las zonas de donde existen las instalaciones nucleares, que, entre otros aspectos, debía incluir la historia de exposición a radiación de origen artificial y natural en el entorno de las instalaciones, información que proporcionaría el CSN. Para el desarrollo de este estudio se debían establecer mecanismos de información que garantizaran la independencia de la investigación y la transparencia en el desarrollo de las actividades, y la constitución de un Comité Consultivo para el seguimiento y discusión de los resultados una vez finalizado el estudio.

En España se han realizado algunos estudios sobre la salud de las poblaciones residentes en el entorno de las instalaciones nucleares e instalaciones radiactivas del ciclo del combustible nuclear. Una de las limitaciones de dichos estudios, compartida por muchos de los trabajos realizados en otros países, radica en el uso de la distancia del municipio de residencia a la instalación como medida de exposición. Esta forma de clasificar a los individuos asume una equivalencia entre dosis de radiación artificial y distancia que conlleva un sesgo de mala clasificación, reduciendo la capacidad de los trabajos para detectar un posible riesgo asociado a las exposiciones derivadas de las instalaciones estudiadas.

Este estudio epidemiológico incluye como aportación original el análisis de la mortalidad por cáncer en relación con una cuantificación de la exposición de la población a las radiaciones ionizantes como consecuencia del funcionamiento de las instalaciones y de las radiaciones de origen natural, lo que le da un valor añadido respecto de la mayoría de los estudios de este tipo que se han realizado en el resto del mundo. Son muy pocos los ejemplos de estudios epidemiológicos en los que se ha reconstruido el historial de exposición de la población, siendo en la mayoría de los casos estudios de alcance muy limitado en extensión y en efectos investigados.

Para valorar la posible influencia sobre la salud de la población residente en el entorno de las instalaciones nucleares e instalaciones radiactivas del ciclo del combustible nuclear españolas, es preciso estimar la exposición **a radiaciones** derivada del funcionamiento de las instalaciones. La historia de exposición de las poblaciones se puede reconstruir empleando información derivada del control de los efluentes radiactivos y de la vigilancia radiológica ambiental en las áreas próximas a las instalaciones.

Una fuente de exposición adicional a tener en cuenta es la radiactividad de origen natural. La exposición a radiaciones ionizantes (RI) derivadas de este origen supone la principal fuente de exposición en la población general y podría tener influencia en la mortalidad o modificar el posible efecto de la exposición derivada de los efluentes de las instalaciones, hecho que ha de ser considerado en el diseño y análisis de este tipo de estudios epidemiológicos.

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) es el organismo que coordina el sistema de redes de vigilancia radiológica ambiental que existe en España. Los datos radiológicos de todas estas redes se almacenan en bases de datos de vigilancia radiológica ambiental. De este modo, se dispone de un banco actualizado de datos medioambientales capaz de suministrar en cualquier momento niveles de referencia. Estas medidas, que constituyen la mejor herramienta para poder aproximarse a los valores reales de exposición radiológica, son generalmente inferiores a los niveles de detección. Por ello, la elaboración de los estimadores de la exposición de la población a las emisiones de efluentes radiactivos de las instalaciones, punto crítico que determina la viabilidad del estudio que aquí se plantea, es realizada por el CSN mediante complejos cálculos que consideran: tipos de emisión,

difusión de contaminantes, etc. Dicha estimación, que se realiza a partir de los vertidos de las instalaciones, sirve para clasificar a los municipios según su historia dosimétrica.

El Instituto de Salud Carlos III y el Consejo de Seguridad Nuclear suscribieron un Convenio de Colaboración en abril de 2006 con objeto de realizar el estudio solicitado por el Congreso de los Diputados, de acuerdo con los siguientes **objetivos generales**:

Estudiar la mortalidad por cáncer en los municipios situados en la proximidad de las instalaciones nucleares e instalaciones radiactivas del ciclo del combustible nuclear españolas en función de la historia de exposición a las emisiones derivadas del funcionamiento de las instalaciones, comparando con otros municipios españoles, de similares características socio demográficas, no situados en el entorno de las instalaciones nucleares.

Así mismo, se contrastará la mortalidad por las mismas causas entre municipios en dos zonas seleccionadas según sus características de exposición a la radiación natural y no sometidas a la influencia de la operación de instalaciones nucleares o radiactivas del ciclo.

El estudio se ha realizado en las necesarias condiciones de rigor científico y de transparencia, destacando en este sentido la constitución de un Comité Consultivo, que ha realizado un seguimiento detallado e independiente del estudio, en particular en lo relativo a la metodología aplicada, el análisis de resultados y los aspectos de comunicación y divulgación del mismo. La composición del Comité Consultivo ha incluido un amplio espectro de representantes de organizaciones interesadas en el estudio: autoridades sanitarias de las Comunidades Autónomas afectadas teniendo en cuenta el alcance territorial del estudio, organizaciones sindicales, autoridades municipales, compañías propietarias de las instalaciones (sector eléctrico, Enresa y Enusa), organizaciones de defensa de la preservación del medio ambiente y expertos independientes, junto con los representantes del Instituto de Salud Carlos III y del CSN.

## **2. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **2.1 Diseño del estudio epidemiológico**

El estudio planteado es un **estudio ecológico de cohortes retrospectivas**, en el que se contrasta la mortalidad por diferentes tipos de cáncer de los residentes en todos los municipios situados en el entorno de las instalaciones españolas (30 km) con la encontrada en otros municipios utilizados como control. El periodo de estudio incluye los años 1975-2003. El estudio es: 1) **ecológico**, por tener como variable central de análisis la exposición a radiación estimada para grupos de población como son los residentes en los municipios y 2) **de cohortes retrospectivas** por reconstruirse la historia de exposición de las poblaciones en función de su año de nacimiento y del seguimiento de la mortalidad de estas poblaciones hasta el año de finalización del estudio. Por tanto, la base del estudio son las poblaciones de los municipios de un entorno de 30 km alrededor de las instalaciones nucleares e instalaciones radiactivas del ciclo del combustible nuclear españolas, independientemente de que se encuentren en funcionamiento o desmantelamiento (Tabla 1). Como referencia o control se han seleccionado otros municipios del mismo ámbito geográfico, de similares características socio demográficas, suficientemente alejados de las instalaciones (50 a 100 km). Se consideran, así mismo, las poblaciones de los municipios situados en dos zonas seleccionadas, de alta y baja radiación natural, no sometidas a la influencia de la operación de las instalaciones.

#### ***Selección de los municipios del entorno de las instalaciones nucleares y municipios control***

En la tabla 1 se presentan las instalaciones incluidas en el alcance de este trabajo.

**Tabla 1. Centrales nucleares e instalaciones del ciclo del combustible estudiadas**

<b>Instalación</b>	<b>Comienzo</b>	<b>Localización</b>
<b>Centrales nucleares</b>		
José Cabrera	1968	Guadalajara
Santa M <sup>a</sup> de Garoña	1971	Burgos
Vandellós I	1972	Tarragona
Almaraz, Unidad I	1981	Cáceres
Almaraz, Unidad II	1982	Cáceres
Ascó, Unidad I	1983	Tarragona
Cofrentes	1984	Valencia
Ascó, Unidad II	1985	Tarragona
Vandellós II	1987	Tarragona
Trillo, Unidad I	1988	Guadalajara
<b>Instalaciones del ciclo del combustible</b>		
Fábrica de concentrados de uranio de Andújar	1959	Andújar (Jaén)
Instalación de almacenamiento de residuos de media/baja actividad de Sierra Albarrana (El Cabril)	1993	Hornachuelos (Córdoba)
Planta Lobo-G de tratamiento de minerales de uranio	1977	La Haba (Badajoz)
Planta Elefante de fabricación de concentrados de uranio	1978	Saelices el Chico (Salamanca)
Fábrica de combustibles de óxido de uranio de Juzbado	1985	Juzbado (Salamanca)
Planta Quercus de fabricación de concentrados de uranio	1993	Saelices el Chico (Salamanca)

El estudio se centra en los municipios incluidos en el radio de 30 km. alrededor de cada instalación. Para cada municipio comprendido en el radio de 0-30 km se ha seleccionado de forma aleatoria un municipio de control entre todos los situados a 50-100 km de la instalación que cumpliera al menos 5 de las 6 condiciones de equiparamiento impuestas, basadas en: número de habitantes, porcentaje de parados, porcentaje de analfabetos, porcentaje de población ocupada o parada que había trabajado antes en la agricultura, nivel de renta y provincia.

### ***Selección de municipios de dos áreas con diferente exposición a radiación natural***

Considerando la cartografía generada en el proyecto MARNA (mapa de radiación natural) se han seleccionado dos áreas de 30 km de radio, una situada en el sur de Galicia y otra entre las provincias de Valencia y Alicante. La primera de ellas corresponde a una zona de alta radiación natural por la composición granítica de su suelo y la segunda es una zona de muy baja radiación natural.

### ***Causas a estudiar***

En la actualidad la mortalidad, por la universalidad de su registro, es el único indicador que permite monitorizar la situación de salud y estudiar la posible influencia sobre la salud a largo plazo de residir en el entorno de las instalaciones españolas en su conjunto. Aunque en España se han establecido registros de incidencia de cáncer en algunas provincias, no existe un registro que abarque todo el Estado y la cobertura de los actuales no es suficiente para la inclusión del estudio de la incidencia de cáncer en este proyecto.

Para cada municipio del entorno de las instalaciones incluido en el estudio se contabiliza el número de defunciones causadas por distintos tipos de cáncer, por grupo de edad, sexo y año para el periodo 1975-2003. Para los municipios de las zonas estudiadas en relación con la radiación natural, el periodo de estudio son los años 1994-2003 (últimos diez años del estudio). Los tumores seleccionados para su estudio son los siguientes (considerando periodos de inducción de 1 año para las leucemias y de 10 años para el resto):

**Tabla 2. Tipos de cáncer seleccionados en el estudio**

CIE-9	Localización	CIE-9	Localización
151	Estómago	189	Riñón
153-154, 159.0	Colorrectal	191	Encéfalo
162	Pulmón	192	Otros tumores del SNC
170	Huesos	193	Tiroides
171	Tejido conjuntivo	200, 202	Linfomas no Hodgkin
174	Mama (mujer)	201	Linfomas de Hodgkin
183	Ovario	203	Mieloma
186	Testículo	204-208	Leucemias
188	Vejiga		

CIE-9: Clasificación Internacional de Enfermedades, 9ª revisión

Se han incluido todos los cánceres con independencia de su radioinducibilidad.

## **2.2 Estimación de la exposición a las radiaciones ionizantes en el entorno de las instalaciones objeto del estudio**

### ***Selección de un indicador de exposición para cada municipio incluido en el alcance del estudio***

La vigilancia para la protección del público en el entorno de las instalaciones nucleares o radiactivas del ciclo del combustible se lleva a cabo valorando la estimación de las dosis que podrían recibir los individuos del entorno debido a los efluentes radiactivos vertidos por las instalaciones.

El presente estudio epidemiológico se planteó como un estudio ecológico, seleccionándose como indicador de exposición **la dosis efectiva**<sup>1</sup> tanto para las emisiones de efluentes de las instalaciones como para la exposición a la radiación natural.

Se ha realizado una estimación retrospectiva de las dosis acumuladas a la población de cada municipio del entorno debidas a los efluentes vertidos por las instalaciones desde el inicio de su funcionamiento. Adicionalmente, se han estimado las dosis debidas a la radiación natural en esos mismos municipios y en los adoptados como referencia; ésta supone aproximadamente el 87% de la exposición anual total cuando se obtienen valores medios para toda la población mundial, presentando una gran variabilidad territorial.

La magnitud **dosis efectiva** aporta beneficios en la realización del estudio en términos de simplicidad, representatividad y especificidad. Además, para su estimación se utiliza una metodología contrastada y prácticamente estandarizada a nivel internacional. Estos beneficios son especialmente significativos en un estudio de amplio espectro como el presente, en el que se pretende identificar en primera instancia posibles asociaciones aparentes entre exposición y mortalidad por cáncer. Esas potenciales asociaciones deberían ser objeto, en su caso, de estudios más detallados, previa estimación de las dosis absorbidas.

También hay que tener en cuenta que la magnitud **dosis efectiva** tiene algunas limitaciones para su uso en estudios epidemiológicos, ya que presenta una información promediada de la exposición no apta para evaluaciones cuantitativas detalladas de riesgo. Además, no proporciona información sobre la exposición de individuos específicos sino para una persona estándar de referencia en una situación de exposición a la radiación, por ello no proporciona información sobre el riesgo de cada individuo concreto sino de todos en general.

<sup>1</sup> Se ha elaborado un glosario de términos, que puede consultarse en el informe principal

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) en sus recomendaciones de 2007 (publicación ICRP 103) indica que no es apropiado utilizar la dosis efectiva en estudios epidemiológicos, en los que deben utilizarse las dosis absorbidas en órganos y tejidos individuales.

El CSN planteó una consulta a la ICRP sobre la utilización de la dosis efectiva como indicador de exposición en un estudio como el presente. La ICRP respondió que sería aceptable si las incertidumbres y limitaciones del uso de una magnitud de protección como la dosis efectiva se expusieran muy claramente y no se obtuviesen conclusiones de gran alcance sobre riesgos individuales derivadas de tal estudio. La ICRP indicó que para encontrar correlaciones aparentes que puedan ser estudiadas con mayor detalle con otra metodología, los estudios basados en las dosis efectivas pueden ser útiles.

Teniendo en cuenta todo lo indicado, se decidió utilizar la magnitud de dosis efectiva en el contexto concreto del estudio epidemiológico actual y con los objetivos y las limitaciones mencionados. En el análisis para decidir el indicador de exposición a utilizar en el presente estudio participaron los agentes interesados a través del Comité Consultivo establecido para realizar el seguimiento del estudio.

### ***Estimación de las dosis de radiación artificial a los miembros del público en el entorno de las centrales nucleares y de las instalaciones del ciclo y las debidas a la radiación natural***

Dado que los niveles de radiactividad que se obtienen en los programas de vigilancia ambiental son muy bajos, en general, inferiores a los niveles de detección, los organismos responsables de la protección radiológica del público y del medio ambiente, como el CSN, recurren a metodologías de estimación cuya finalidad es proporcionar una serie de valores que, bajo ciertas hipótesis, puedan considerarse representativos de la magnitud del impacto al público en términos de dosis. Ello no significa que los resultados así obtenidos representen en realidad la dosis verdadera que los individuos reciben, sino que constituyen un valor aproximativo de la misma orientado hacia un objetivo, de tipo regulador en la mayoría de los casos.

Los modelos utilizados por el CSN en el estudio se ajustan a las prácticas internacionales del cálculo de dosis sobre la población recogidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA, IAEA) en su "Safety Report Series Nº 19" (SRS-19) (IAEA, 2001). El modelo de dispersión atmosférica utilizado es de tipo gaussiano con difusión despreciable, reflexión total en el suelo y condiciones constantes de turbulencia en cada período de integración. El modelo de dispersión acuática presupone mezcla completa instantánea aguas abajo del punto de descarga, salvo en emplazamientos a la orilla del mar, donde la dilución de los radionucleidos tiene lugar en una banda de 370 m de anchura a lo largo de la costa.

Establecidas las concentraciones de los radionucleidos en el entorno físico de las instalaciones (aire, agua, suelo), deben reproducirse los procesos de llegada de dichos radionucleidos hasta los individuos de la población mediante su impacto directo y a través de la cadena trófica. Estos mecanismos constituyen las llamadas vías de exposición cuyas propiedades serán características de cada emplazamiento:

- Para los efluentes emitidos a la atmósfera (efluentes gaseosos), se han considerado la exposición externa (tanto a la nube como a los depósitos acumulados en el suelo), y la incorporación al organismo a través de la inhalación y la ingestión de alimentos contaminados, tanto vegetales (hoja ancha y patatas, cereales y otros) como animales (carne y leche).
- En cuanto a los efluentes emitidos al medio acuático (efluentes líquidos), se han considerado la exposición externa a los sedimentos sobre las orillas, la ingestión de agua potable y la de pescado (especies de río o de mar, según se trate) y marisco, y otros alimentos contaminados de origen vegetal o animal, al igual que en el caso anterior.

En cuanto a las dosis por radiación natural, los cálculos han seguido la metodología del informe UNSCEAR 2000. Las vías de exposición consideradas han sido las siguientes:

- Radiación cósmica.
- Radiación gamma terrestre.

- Inhalación de radón y torón.
- Exposición interna al resto de isótopos naturales por ingestión de agua y alimentos.

Las estimaciones se han expresado como valores medios de la dosis efectiva recibida por los habitantes de cada municipio y se han obtenido utilizando la mejor información disponible para cada uno de los parámetros implicados en el cálculo (cálculos *best estimate*) en lugar de recurrir a valores conservadores (que tienden a sobreestimar la exposición).

Los datos experimentales que intervienen en el cálculo proceden de distintos proyectos del CSN y, en algunos casos, de estudios independientes publicados por distintos grupos de investigación. Asimismo, se han realizado nuevas campañas de medida diseñadas específicamente para cubrir la información necesaria para el estudio epidemiológico. En caso de variables cuya contribución es minoritaria y para las que no existen datos locales disponibles (como por ejemplo sobre exposición a torón o radiactividad en alimentos), se han utilizado promedios nacionales o mundiales, o parametrizaciones proporcionadas por el UNSCEAR.

### ***Crterios para el establecimiento de puntos de corte***

A pesar de que las dosis acumuladas por radiación de origen artificial son extremadamente bajas, sí existe cierta variabilidad, y con el fin de no imponer ninguna asunción a la forma de la relación exposición-mortalidad, se consideró oportuno trabajar con la variable categorizada. Es decir, se definen primero los intervalos de exposición mediante la utilización de puntos de corte de la dosis estimada, y se consideran de manera conjunta aquellos grupos de población con dosis estimadas de exposición incluidas en el mismo intervalo.

La forma de categorización utilizada trata de optimizar la detección de asociaciones estadísticas de las dosis con la mortalidad disminuyendo las posibilidades de mala clasificación derivadas del establecimiento de puntos de corte en zonas continuas de la distribución de la dosis efectiva. Para ello, se ha tratado de identificar los saltos o puntos de corte naturales en la distribución de dosis evitando clasificar en categorías diferentes a estratos con dosis similares. El objetivo fue conseguir categorías heterogéneas entre sí (que las diferencias entre las dosis de distintas categorías sean mayores que las observadas dentro de una misma categoría) imponiendo restricciones que garanticen la estabilidad de los estimadores mediante una distribución de los efectivos poblacionales lo más homogénea posible. Como resultado de todo ello, se han establecido diferentes intervalos de dosis para los análisis conjuntos de centrales nucleares por un lado e instalaciones radiactivas del ciclo por otro, así como para los análisis individuales de cada instalación, dichos intervalos se muestran en las tablas 5 y 6 del apartado de resultados.

### **2.3. Análisis de la mortalidad**

Para todos los municipios incluidos en el estudio, se tabulan las defunciones por las causas estudiadas para cada periodo de estudio, grupo de edad y sexo, a partir de los registros individuales proporcionados por el INE.

Se han utilizado distintos métodos para estimar el riesgo de morir por cáncer en las áreas de estudio. Todos los métodos utilizados se basan en la asunción de que el número de defunciones por cáncer en cada estrato de edad y periodo se distribuye como una variable estadística de Poisson. La variable central del estudio es la dosis de radiación. Como medida de efecto se utilizan los riesgos relativos de mortalidad, bien sea estimados mediante razones de tasas de mortalidad (la tasa de mortalidad es el número de defunciones dividido por las personas-año en seguimiento) entre grupos de población expuestos y no expuestos o bien mediante razones de RME (Razones de Mortalidad Estandarizadas, es decir, la comparación de los casos observados con los esperados si los municipios tuviesen la misma mortalidad que la población general).

Se han evaluado especialmente los resultados que muestran de incrementos estadísticamente significativos del riesgo relativo de mortalidad por los diferentes cánceres con la mayor exposición a radiación. Esto es lo que se conoce como análisis dosis-respuesta en epidemiología. Para la

determinación de asociaciones dosis-respuesta se calculan 1) los riesgos relativos para cada nivel de exposición y 2) los riesgos relativos considerando la exposición como variable continua. Para determinar si esta asociación dosis-respuesta es estadísticamente significativa, además de comprobar que el riesgo relativo incrementa con la exposición, se aplica una prueba de tendencia de la que se extrae un valor de probabilidad (valor- $p$ ). Se considera que este valor  $p$  es significativo cuando es menor de 0,05. En el análisis con la variable de exposición como continua se aporta una razón de tasas de mortalidad **RR** (por unidad de la variable) y un intervalo de confianza al 95%. Si ese intervalo de confianza no incluye la unidad decimos que es estadísticamente significativa. En general, encontrar este efecto en ambos análisis le proporciona mayor consistencia al resultado y es importante observar la forma que adopta el incremento del riesgo con la dosis con la variable categorizada.

Las dosis efectivas estimadas (tabla 3) para la población de los municipios representan la dosis media anual que habría recibido una persona tipo, para cada municipio de estudio. Esta estimación se proporciona año a año. Se ha calculado la dosis de radiación acumulada por cohorte de nacimiento (generación) y ello permite hacer su análisis como dosis promedio acumulada.

La distribución de la mortalidad por cáncer en España es de una gran heterogeneidad según han mostrado los estudios previos. Muchos de los tipos de cáncer incluidos en este proyecto muestran marcadas desigualdades geográficas, y la simple comparación de la mortalidad entre dos provincias puede proporcionar razones de tasas superiores a 2. Por ejemplo, si comparamos la tasa ajustada (por edad) de mortalidad por cáncer de pulmón en 2004 en Cáceres con la de Guadalajara obtenemos una razón de tasas de 1,91. Las causas de esta heterogeneidad geográfica, en la mayor parte de los casos, son desconocidas. Las condiciones de comparación cambian cuando se utiliza un 'ajuste local' como el propuesto. Municipios de un área específica se comparan con municipios equiparados en términos de población y entorno de su misma área. Esta perspectiva permite un mayor control de la heterogeneidad geográfica como factor de confusión en estos modelos, comparando áreas más homogéneas.

En este proyecto, la variable de exposición en términos físicos es la misma, independientemente de la población que se estudie. Sin embargo, cada instalación tiene una historia muy específica y singular, que hace necesario su análisis por separado. El análisis conjunto de las instalaciones de un mismo tipo (centrales nucleares por un lado e instalaciones del ciclo por otro) es también posible y permite determinar si existe heterogeneidad en el efecto observado en las distintas instalaciones. En el análisis conjunto, la variable 'instalación' se tiene en cuenta incluyéndola en los modelos como término de efectos aleatorios. La heterogeneidad entre instalaciones se ha valorado por la significación estadística de la interacción entre dosis de radiación artificial acumulada e instalación, en un modelo de efectos fijos.

**Tabla 3. Rango de dosis de radiación artificial acumulada y natural anual en los municipios del entorno de cada una de ellas**

	0-30 km Nº municipios	Radiación artificial <u>acumulada</u> Rango dosis microSievert	Radiación natural <u>anual</u> Rango dosis microSievert
<b>Centrales nucleares</b>			
José Cabrera	60	0,1015159 – 267,50550000	2031-2837
Santa M <sup>a</sup> de Garona	68	6,518255 – 303,6069090	1770-2280
Vandellós (I y II)	46	0,07105639 - 203,05685500	1928-2627
Almaraz	33	0,01881667 – 27,58200000	2340-5840
Ascó (I y II)	65	0,0302446 – 5,69964000	1819-2786
Cofrentes	19	0,02841531 – 2,62450000	1695-3730
Trillo	62	0,04578781 – 10,63200000	1752-2040
TOTAL	328*	0,01881667 – 303,6069090	1695-5840
<b>Instalaciones del ciclo del combustible</b>			
Andújar	22	2,909576 – 348,47300000	1917-2470
El Cabril	9	0,00043568 – 0,00296800	2705-4198
La Haba	26	8,138715 – 138,13900000	2577-20103
Saelices El Chico	44	19,88334 - 289,12300000	3431-15413
Juzbado	76	0,00001500 – 0,05791200	2416-5112
TOTAL	177	0,00001500 – 348,47300000	1917-20103

Nota:

Vandellós y Ascó comparten 25 municipios a menos de 30 km de ambas. Por ello el total de municipios incluidos (328) no corresponde a la suma de municipios en el entorno de las centrales nucleares (353). En tablas posteriores el número total de municipios no concuerda con los mostrados en esta tabla debido a que se han tenido en cuenta las segregaciones producidas en el período de estudio que ha obligado a sumar los efectivos para poder proceder a su análisis.

### 3. RESULTADOS

#### Comentarios generales sobre los efectivos del estudio, características socio demográficas y categorías de dosis de radiación

En la tabla 4 se muestran las características generales de los efectivos incluidos en el estudio para cada instalación incluyendo: poblaciones según el censo de 1991, personas año contabilizadas para el período de funcionamiento de cada instalación (considerando periodos de inducción de 1 y 10 años), promedio de las características socio demográficas y promedio de habitantes por municipio en los años 1991 y 2001.

**Tabla 4. Características generales de la población estudiada en áreas adyacentes a las instalaciones**

	Población <sup>1</sup>	Menores de 25 años <sup>1</sup>	Personas/año (en miles) <sup>2</sup>	Personas/año (en miles) <sup>3</sup>	% Analfabetos	% Parados	% Agricultores	Renta	Media población 1991	Media población 2001
<b>Centrales nucleares (*)</b>										
<b>Zorita (1968)</b>										
0-30 km	25816	7305	807,1	684,0	5,6	10,4	22,7	6,2	461,0	481,4
50-100 km	29914	9293	943,7	825,8	4,5	10,9	18,8	6,5	564,4	819,7
<b>Garoña (1971)</b>										
0-30 km	57625	20236	1977,8	1549,8	1,3	13,4	12,7	6,7	992,3	974,3
50-100 km	50060	15475	1477,3	1159,8	1,1	14,7	23,4	7,0	725,7	702,6
<b>Vandellós (1972)</b>										
0-30 km	73594	26161	2705,7	1901,3	3,1	13,5	16,8	6,2	2628,4	3177,6
50-100 km	43373	14675	2814,4	2046,5	2,6	12,9	11,3	6,6	1606,4	1788,7
<b>Almaraz (1981)</b>										
0-30 km	47637	17672	1051,4	624,5	5,4	30,3	32,7	5,6	1488,7	1527,2
50-100 km	45946	16390	1019,3	597,3	5,2	27,5	31,0	5,8	1584,3	1571,8
<b>Ascó (1983)</b>										
0-30 km	49049	13410	967,4	468,0	1,9	10,7	27,1	6,5	876,7	817,9
50-100 km	61594	19275	1322,6	719,3	2,1	9,7	23,5	6,6	1162,2	1455,1
<b>Cofrentes(1984)</b>										
0-30 km	35881	11733	351,8	161,2	4,0	17,8	16,8	6,8	1888,5	980,5
50-100 km	71975	27159	1424,9	701,0	4,0	19,0	10,6	6,1	4498,4	5061,9
<b>Trillo (1988)</b>										
0-30 km	13259	3312	195,6	61,8	3,2	11,2	25,5	5,4	232,6	214,1
50-100 km	12976	3392	188,3	59,9	2,4	11,4	26,2	5,7	231,7	212,2
<b>Total</b>										
0-30 km	302861	100075	8056,8	5450,6						
50-100 km	315838	105702	9190,5	6109,6						
<b>Instalaciones del ciclo</b>										
<b>Andújar(1959)</b>										
0-30 km	126063	50411	3660,5	3660,5	8,4	22,4	30,7	5,1	6003,0	6038,3
50-100 km	152673	58224	4472,5	4472,5	8,8	21,6	31,8	5,3	7270,1	7410,5
<b>El Cabril (1961)(1993)**</b>										
0-30 km	38781	13545	441,9		9,7	34,8	25,2	5,1	4309,0	4291,9
50-100 km	44373	18114	405,1		10,2	35,6	39,0	4,5	5546,6	5637,1
<b>La Haba(1977)</b>										
0-30 km	111456	41790	2947,2	1913,1	6,2	27,5	26,5	5,5	4458,2	4426,6
50-100 km	151289	59682	3952,3	2624,3	6,0	26,5	21,0	5,6	6051,6	6146,5
<b>Saelices El Chico (Pl.Elefante 1978)</b>										
0-30 km	32276	9393	780,5	460,1	2,7	18,7	24,2	5,8	733,6	641,4
50-100 km	35848	10556	853,4	508,5	2,1	19,9	19,8	5,7	833,7	718,3
<b>Juzbado(1985)</b>										
0-30 km	32627	11151	650,3	325,5	0,8	16,2	26,9	5,6	429,2	614,8
50-100 km	36713	10832	637,5	265,4	1,2	16,6	30,1	5,8	476,8	415,1
<b>Total</b>										
0-30 km	341203	126290	8480,4	6359,3						
50-100 km	420896	157408	10320,8	7870,7						

\* Año de entrada en servicio

<sup>1</sup> Censo de 1991

<sup>2</sup> Personas-año considerando un periodo de inducción de 1 año.

<sup>3</sup> Personas-año considerando un periodo de inducción de 10 años.

La renta es un indicador sintético que va de 1 a 10.

\*\*En El Cabril se comenzaron a almacenar, a partir de 1961, residuos radiactivos producidos por la entonces Junta de Energía Nuclear (JEN). En el año 1993 comenzaron a funcionar las instalaciones que configuran el Centro actual y desde esa fecha, son los datos dosimétricos proporcionados.

Centrales: el estudio cubre 328 municipios en 0-30km y 303 en 50-100km

Instalaciones del ciclo: 177 municipios en 0-30km y 174 en 50-100km

El estudio contabiliza un total de 5 millones de personas-año en el área de exposición y otro tanto en la zona de referencia para una inducción de 10 años en el entorno de las centrales nucleares. En el entorno de las instalaciones del ciclo se contabilizan 6,4 millones y 7,9 millones de personas-año en las áreas de exposición y referencia respectivamente. Los indicadores socio demográficos son similares en ambas zonas de estudio para cada una de las instalaciones. Para la instalación de El Cabril se ha considerado 1993 como año de puesta en marcha, debido a los datos dosimétricos proporcionados.

En el caso de las centrales nucleares se han incluido en el estudio 328 municipios en situados en el radio 0-30 km y 303 municipios situados en el radio 50-100 km. Para las instalaciones del ciclo se han incluidos 177 municipios en el radio 0-30km y 174 en el radio 50-100 km.

En las tablas 5 y 6 se muestran las categorías de dosis de radiación artificial utilizadas en el análisis para cada instalación junto con la proporción de población expuesta a más de 10 microSievert, para una inducción de 10 y 1 año respectivamente.

**Tabla 5. Categorización de las dosis de radiación artificial (latencia de 10 años).**  
**a) Rangos de dosis acumuladas por categorías (microSievert)**

	Refe- rencia	d1	d2	d3	d4	%exp> 10microSv
<b>Instalaciones nucleares</b>						
José Cabrera	0	0,007-0,12666	0,12924- 0,25086	0,25699-1,8829	2,35655-265,4788	18,3
Garoña	0	0,00527-10,474	10,54109- 36,2971	37,551-45,4275	45,6033-303,55452	80,7
Vandellós	0	0,00053- 0,25523	0,26074-11,556	85,813-142,7687	166,5072-176,5683	58,7
Almaraz	0	0,00076- 0,03316	0,03796- 0,08249	0,08671-0,10207	0,10782-21,158	3,6
Ascó	0	0,00561-0,0215	0,02232-0,0858	0,09376-0,80486	0,9686-3,60264	0
Cofrentes	0	0,01178- 0,03198	0,03454- 0,07208	0,0741-0,17016	0,1877-2,2544	0
Trillo	0	0,00031- 0,03041	0,0326-0,05768	0,0605-0,2048	0,2309-3,576	0
Conjunto de instalaciones	0	0,00076-0,1800	0,18444-2,5357	2,72775-44,0380	44,80000-303,5545	45,9
<b>Instalaciones del ciclo</b>						
FUA	0	0,01435-0,9441	1,13083- 22,81907	25,85175 - 67,849	70,255 - 335,523	61,3
El Cabril						0
La Haba	0	0,14638-4,9101	5,312 - 14,8336	15,2736 – 34,599	35,991 - 114,93	67,9
Saelices el Chico	0	0,34687-2,9779	3,037 - 4,8736	4,907 - 15,7612	16,267 - 40,423	38,6
Juzbado	0	>0 – 0,00001	0,00001- 0,00002	0,00002 – 0,00005	0,00005 - 0,03991	0
Conjunto de instalaciones	0	0-2,11140	2,1870 - 17,18551	17,7625 - 50,48980	52,0290-335,52300	58,5

**Tabla 6. Categorización de las dosis de radiación artificial (latencia de 1 año). Rangos de dosis acumuladas por categorías (microSievert)**

Instalación	Referencia	d1	d2	d3	d4	% exp >10 microSv
José Cabrera	0	0,001-0,14561	0,14693-0,28233	0,28765-2,0145	2,2833-267,2675	17,7
Garoña	0	0,00106-8,5709	9,0491-35,7096	36,5959-45,7637	45,8965-303,60581	78,9
Vandellós	0	0,00038-0,23774	0,24126-2,99783	13,7207-145,2483	161,0132-201,13685	56,9
Almaraz	0	0,00057-0,06512	0,06792-0,09107	0,09375-0,16572	0,17413-27,184	4,3
Ascó	0	0,00237-0,03143	0,03264-0,0993	0,10262-0,8826	1,00024-5,58364	0
Cofrentes	0	0,00423-0,03883	0,0403-0,09804	0,1063-0,16036	0,1779-2,5822	0
Trillo	0	0,01357-0,06201	0,06328-0,10469	0,10944-0,29207	0,31301-10,119	1,1
Conjunto de centrales		0,00041-0,11156	0,11239-1,58295	1,61190-42,95300	43,97026-303,60581	39,7
FUA	0	0,01458-7,1672	7,6205-44,857	48,1775-107,3714	112,2658-347,213	69,7
El Cabril	0	0,00014-0,00039	0,00042-0,00073	0,00081-0,00096	0,00113-0,00263	0
La Haba	0	0,0382-9,1462	9,4213-15,4564	15,755-47,822	50,068-137,474	71,5
Saelices el Chico	0	0,27737-3,1833	3,279-14,787	15,1337-65,296	68,3192-274,923	60,3
Juzbado	0	>0 – 0.00002	0,00002-0,00004	0,00004-0,00007	0,00007-0,05691	0
Conjunto del ciclo		=> 2,24265	2,28520-18,24800	18,45577-57,85000	59,51200-347,21300	54,9

Los niveles de radiación artificial acumulada más elevados los presentan las poblaciones del entorno de las instalaciones de Garoña y José Cabrera, pero nunca llegan a los 350 microSievert; en cualquier caso, los niveles de exposición estimados son extremadamente bajos. Lo mismo sucede en el entorno de las instalaciones del ciclo, entre las que destacaría en términos de dosis estimadas la fábrica de uranio de Andújar, que tampoco alcanza los 350 microSievert de dosis acumulada en ningún municipio del entorno.

En la tabla 7 se muestran las dosis de radiación natural anual categorizadas por cuartiles para cada instalación.

**Tabla 7. Categorías de dosis anual de radiación natural por instalaciones en microSievert (cuartiles)**

	C1	C2	C3	C4
José Cabrera	2030 - 2250	2260 - 2410	2420 - 2680	2700 - 4250
Garoña	1670 - 1910	1920 - 2050	2060 - 2160	2190 - 3230
Vandellós	1930 - 2160	2170 - 2260	2270 - 2410	2420 - 2850
Almaraz	2340 - 2970	2980 - 3150	3180 - 3870	3970 - 5840
Ascó	1780 - 2020	2030 - 2170	2180 - 2260	2270 - 2790
Cofrentes	1480 - 1650	1680 - 1940	2100 - 2180	2210 - 3730
Trillo	1750-1940	1950-2030	2040-2630	2650-3620
FUA	1480 - 2020	2050 - 2100	2110 - 2200	2210 - 3840
El Cabril	1600 - 1960	2020 - 3200	3270 - 3350	3400 - 4180
La Haba	1830 - 2120	2130 - 2490	2580 - 3770	3780 - 20100
Saelices el Chico	2570 - 3800	3830 - 4040	4050 - 4420	4430 - 15410
Juzbado	1740 - 2980	3000 - 3650	3670 - 4230	4240 - 5400

## **Comentarios sobre la magnitud de las dosis de radiación artificial y su distribución por centrales e instalaciones del ciclo**

El rango de las dosis anuales estimadas debidas a los efluentes de las centrales nucleares para la población de los 328 municipios próximos a las centrales nucleares es desde 0,000017 microSievert/año hasta 73,4 microSievert/año, con una media aritmética y desviación típica de 0,64 y 3,8 microSievert/año respectivamente. En el entorno de las del ciclo el rango es de 0 a 72,4 microSievert/año con una media aritmética y desviación típica de 1,39 y 3,52 microSievert/año respectivamente.

Debido a las diferencias en el orden de magnitud entre las dosis de radiación natural y la producida por cada central, se ha llevado a cabo un análisis comparativo entre ambas. La conclusión del mismo es que, en ningún caso, la proporción de dosis efectiva anual debida a los efluentes supera el 0,15% de la dosis efectiva total (suma de la dosis debida a la radiación de origen natural y de la debida a los efluentes).

Las dosis efectivas acumuladas por radiación artificial son extremadamente bajas, aunque en el entorno de algunas instalaciones son superiores a otras, no llegando a existir solapamiento entre ellas. La diferencia entre los municipios con menor y mayor dosis efectiva acumulada es de 5 órdenes de magnitud y la distribución de las mismas no resulta similar entre las distintas instalaciones. Esto es debido a las emisiones más elevadas de los primeros años de operación de las tres centrales más antiguas, Vandellós I, José Cabrera y Garoña. Por ello, las dosis acumuladas en los municipios de estas instalaciones se sitúan en la parte más alta del rango; los municipios en el entorno de las centrales de Almaraz, Ascó y Trillo se ubican en la mitad del rango (de 0,01 a 10 microSievert), y las estimaciones para Cofrentes en la franja más baja. Es de destacar que las dosis estimadas para los municipios del entorno de Vandellós se deben a los vertidos de Vandellós I y Vandellós II, lo que explica que sea esta zona en la que el mayor número de municipios presenta valores de dosis situados en los extremos inferior y superior del rango. En cuanto a las instalaciones de ciclo, los municipios en torno a Juzbado presentan dosis menores y no solapadas con los del resto de instalaciones.

La distribución espacial de la radiación artificial en el entorno de las instalaciones no es uniforme (isotrópica) y está muy condicionada por los accidentes geográficos y sobre todo por los ríos y la costa en el caso de Vandellós.

En el conjunto de las instalaciones del ciclo del combustible los entornos de las instalaciones de Andújar, La Haba y Saelices El Chico son las zonas donde las estimaciones de dosis de radiación derivadas de las emisiones de efluentes dan valores más elevados, aunque las dosis acumuladas estimadas no han sobrepasado los 350 microSievert, es decir, que han sido dosis irrelevantes. En el entorno de El Cabril y Juzbado apenas ha habido exposición.

## **Resultados del análisis conjunto de las centrales nucleares**

Antes de analizar la posible relación de la mortalidad por cáncer con las dosis estimadas, se ha efectuado un análisis de la mortalidad antes y después de la puesta en funcionamiento de cada central nuclear en el área de 0-30 km (resultados no mostrados en este resumen). Las únicas diferencias estadísticamente significativas de un incremento diferencial de la razón de mortalidad estandarizada en el área de exposición y el área de referencia (50-100 km) se producen para el cáncer de mama en mujeres en el entorno de Vandellós y para el cáncer colorrectal en el de Almaraz. Ambos son tumores que guardan una estrecha relación con el desarrollo socioeconómico, dieta y hábitos de vida. Al tratarse de un análisis descriptivo general que considera únicamente la fecha de puesta en marcha de las instalaciones, no se puede afirmar que tengan relación con el funcionamiento de las centrales nucleares citadas.

En la tabla 8 se muestran los resultados del análisis conjunto para las centrales nucleares, relacionando la mortalidad por los diferentes cánceres y las dosis estimadas de radiación artificial acumulada.

La tabla muestra el número de defunciones incluidas en cada categoría de exposición y las razones de tasas de mortalidad para cada categoría comparada con la de la zona de referencia, además de dos pruebas estadísticas de tendencia. En el análisis para ambos sexos de los tumores estudiados, no se observa ningún incremento de las razones de tasas de mortalidad con la dosis, tanto en el análisis de la dosis categorizada como en el de la dosis como variable continua, ya que todos los intervalos de confianza incluyen la unidad. Hay una excepción que es el cáncer de riñón. La prueba de tendencia es estadísticamente significativa, pero la forma en la que varía la razón de tasas de mortalidad (**RR**) con la categoría de dosis no es coherente. Lo que sí se observa es que en la categoría de mayor exposición, la **RR** es más elevada. Todas las estimaciones están ajustadas por edad, radiación natural categorizada en cuartiles y variables socio demográficas.

Los resultados del análisis de mortalidad para cada instalación tampoco muestran incrementos de las razones de tasa de mortalidad con la dosis, con algunas observaciones particulares que se indican a continuación. En el área de José Cabrera no se detecta ninguna asociación con significación estadística, aunque en el caso del mieloma múltiple todas las **RR** están por encima de la unidad y en la 2ª y 3ª categoría hay un exceso de mortalidad estadísticamente significativo. Sin embargo, en la categoría de mayor exposición a radiación artificial hay una disminución del riesgo respecto a las dos anteriores, lo que resta credibilidad a la asociación.

En el área de Garoña no se detecta ningún incremento del riesgo con la dosis estadísticamente significativo. Hay una excepción que es el cáncer de riñón cuando se analiza como variable continua. Sin embargo, en el análisis con la variable dosis categorizada, el patrón que muestran los estimadores por categorías no refleja un efecto de incremento con la dosis.

En Vandellós, se observa un incremento de la mortalidad por cáncer de pulmón estadísticamente significativo asociado con las dosis. Las poblaciones encuadradas en la categoría de mayor exposición presentan una mortalidad superior a la del área de referencia; este resultado explica el resultado obtenido en el análisis conjunto de las centrales para el parámetro valor-p, indicador de la existencia de heterogeneidad entre los resultados de las distintas centrales para este cáncer.

En el entorno de Ascó, se observa una mayor mortalidad por linfomas no hodgkinianos, con un test de tendencia estadísticamente significativo, siendo la mortalidad en la categoría de mayor exposición la más elevada, sin embargo es necesario tener en cuenta que se trata de un cáncer raramente asociado con la radiación.

En Almaraz, Cofrentes y en Trillo no hay ningún resultado que merezca comentarios detallados. En el caso de las dos últimas centrales se registra un bajo número de defunciones, por ser las dos instalaciones con menor número de personas-año de seguimiento.

La significación de estas particularidades se analiza en el apartado 4, siendo necesario tener en cuenta las consideraciones allí indicadas para extraer conclusiones respecto a todos estos aspectos

### Tabla 8. Análisis conjunto de todas las centrales nucleares

Resultados del análisis:

- a) número de defunciones por categorías de exposición (dosis estimadas de radiación artificial acumuladas);
- b) razones de tasas (RR) por categorías de dosis de radiación artificial acumuladas y prueba de tendencia;
- c) RR para la dosis acumulada por cada 10 microSievert) tomada como variable continua, intervalo de confianza al 95%;
- d) prueba de homogeneidad de riesgo relativo por instalaciones.

RR por dosis siendo la referencia la población de los municipios del área de 50 a 100km.

La radiación natural se ha incluido categorizada y como factor por no mostrar un efecto lineal. Estimaciones obtenidas de un modelo de regresión mixto que incluye las centrales como término de efectos aleatorios. Estimaciones ajustadas por radiación natural, edad, variables socio demográficas y restringido al periodo de funcionamiento.

Categoría dosis microSievert	Defunciones					RR d1	RR d2	RR d3	RR d4	Tenden valor-p	RR dosis	IC	95%	Homogeneidad valor-p
	d0 ref	d1	d2	d3	d4									
						0,00076-0,18	0,18444- 2,5357	2,72775- 44,038	44,80-303,5545					
Cáncer de pulmón	2022	569	448	300	631	0,900	0,910	0,800	0,970	0,525	1,001	0,994	1,009	0,009565
Cáncer de huesos	56	19	11	10	20	1,250	0,700	0,540	0,960	0,694	0,995	0,954	1,038	0,126
Cáncer de SNC	311	69	85	63	89	0,770	1,100	0,830	0,840	0,268	0,991	0,973	1,008	0,3165
Cáncer de tiroides	36	5	7	1	11	0,440	0,830	0,140	1,250	0,232	1,003	0,947	1,063	0,07199
LNH	217	61	63	22	77	1,010	1,170	0,520	1,070	0,306	1,012	0,994	1,031	0,04603
Hodgkin	27	5	11	5	11	0,560	1,460	0,800	1,110	0,776	0,988	0,936	1,044	0,369
Mieloma	150	44	42	22	50	1,020	0,950	0,940	0,980	0,993	1,007	0,985	1,029	0,8593
Cáncer de vejiga	485	138	133	81	188	1,060	1,060	0,710	1,030	0,394	0,999	0,986	1,013	0,07386
Conjuntivo	39	14	17	4	12	1,350	1,890	0,460	0,870	0,618	0,973	0,922	1,027	0,763
Cáncer de riñón	204	59	49	36	83	0,890	1,040	0,880	1,390	0,009	1,019	1,000	1,038	0,1561
Cáncer de estómago	1092	264	218	316	348	0,850	0,870	0,970	1,010	0,555	1,000	0,990	1,010	0,00213
Cáncer colorrectal	1369	434	388	231	414	1,070	1,100	0,880	0,950	0,380	0,995	0,986	1,003	0,416
Cáncer de testículo	7	1	1	0	1	0,320	0,630	0,000	1,060	0,822	1,028	0,903	1,169	0,5252
Cáncer de mama	690	176	194	140	249	0,920	1,070	1,050	1,070	0,621	1,005	0,993	1,016	0,09429
Cáncer de ovario	166	62	52	30	46	1,270	1,230	1,060	0,810	0,129	0,980	0,956	1,005	0,515
Categoría dosis microSievert						0,00041- 0,11156	0,11239-1,58295	1,61190-42,953	43,97026- 303,60581					
Leucemias*	502	121	159	78	132	0,960	0,970	0,910	0,930	0,620	0,999	0,985	1,013	0,2756

\*Las categorías de dosis para las leucemias son diferentes por el periodo de inducción de 1 año

## Resultados para las instalaciones del ciclo del combustible

En la tabla 9 se muestran los resultados del análisis conjunto para las instalaciones del ciclo del combustible nuclear, relacionando la mortalidad por los diferentes cánceres y las dosis de radiación artificial acumulada estimada. Como en el caso de las centrales nucleares, la tabla muestra, además del número de defunciones incluidas en cada categoría de exposición, las razones de tasas de mortalidad para cada categoría comparada con la de la zona de referencia. En estos datos se observa un incremento de la mortalidad con la dosis de radiación estimada para los siguientes tumores: cáncer de pulmón y cáncer de huesos. Además, en estos casos y en el caso de las leucemias, el análisis de la exposición como variable continua también es estadísticamente significativo. En cáncer de pulmón y huesos las razones de tasas (estimador puntual) para todos los intervalos de dosis son superiores a la unidad en el análisis conjunto para ambos sexos y en el análisis sólo para hombres, en el caso de las leucemias se da esa circunstancia en el análisis solo para mujeres. El test de heterogeneidad es estadísticamente significativo en el cáncer de pulmón y en el cáncer colorrectal.

La asociación estadística entre dosis y mortalidad en el caso del cáncer de pulmón parece verse en hombres y en mujeres, mientras que para el cáncer de huesos y las leucemias esta asociación sólo adquiere significación estadística en mujeres.

Los resultados del análisis conjunto parecen estar condicionados por los resultados del entorno de la fábrica de uranio de Andújar. En el análisis por instalaciones se observan para esta instalación excesos de mortalidad para los cánceres de pulmón, colorrectal y leucemias (éste último en el límite de la significación estadística) cuando se analiza la variable categorizada. Sin embargo, cuando se trata esta variable como continua, de los tumores anteriores sólo el cáncer colorrectal presenta significación estadística, al que hay que añadir el cáncer de huesos. En este caso es conveniente observar el patrón de cambio de las razones de tasas en el área de exposición, ya que, si bien en el cáncer colorrectal se ve un incremento de la mortalidad con la dosis, en los cánceres de pulmón y huesos, aunque la mortalidad en todas las categorías de exposición son superiores a la de la zona de referencia, no se aprecia en el estimador puntual de riesgo, un efecto dosis respuesta con la exposición.

En el entorno de la instalación de Andújar se ha analizado en detalle la mortalidad por sexos debido a la existencia de un estudio de cohortes previo, que puso de manifiesto la existencia de riesgo asociado con la exposición ocupacional a radiaciones de los trabajadores de la Junta de Energía Nuclear encargados del procesamiento del uranio. La incidencia de esas dosis ocupacionales sobre los resultados del presente estudio se considera que es muy reducida por el pequeño número de personas que fueron trabajadores de la FUA. Además, en este tipo de situaciones, y sobre todo para el cáncer de pulmón, observar lo que sucede en las mujeres es muy indicativo de si podría tratarse de un efecto asociado a exposición ambiental, por la escasa prevalencia de mujeres fumadoras en las generaciones anteriores a 1940 en España. El exceso de mortalidad en cáncer de pulmón no se observa en mujeres, sin embargo el exceso de mortalidad por cáncer de huesos únicamente se observa en mujeres. También el patrón de mortalidad por leucemias es más claro en mujeres aunque no es estadísticamente significativo.

Al igual que se ha indicado para el análisis conjunto de las centrales nucleares, la significación de estas particularidades se analiza en el apartado 4, siendo necesario tener en cuenta las consideraciones allí indicadas para extraer conclusiones respecto a todos estos aspectos.

**Tabla 9. Análisis conjunto de las Instalaciones del ciclo del combustible**

Resultados del análisis:

a) número de defunciones por categorías de exposición (dosis de radiación artificial acumuladas);

b) razones de tasas (RR) por categorías de dosis de radiación artificial acumuladas y prueba de tendencia;

c) RR para la dosis acumulada (por cada 10 microSievert) tomada como variable continua, intervalo de confianza al 95%; d) prueba de homogeneidad de riesgo relativo por instalaciones.

RR por dosis siendo la referencia la población de los municipios del área de 50 a 100km. Estimaciones obtenidas de un modelo de regresión mixto que incluye las centrales como término de efectos aleatorios. Estimaciones ajustadas por radiación natural, edad, variables socio demográficas y restringido al periodo de funcionamiento. Ambos sexos

Categoría dosis MicroSievert	Defunciones					RR d1	RR d2	RR d3	RR d4	Tenden valor-p	RR dosis	IC	95%	Homoge valor- p
	d0 ref	d1	D2	d3	d4	<=2,1114	2,187 -17,18551	17,7625 – 50,4898	52,029- 335,523					
Cáncer de pulmón	2812	477	789	522	725	1,190	1,250	1,310	1,340	0,000	1,008	1,001	1,014	0,01046
Cáncer de huesos	81	25	17	15	27	1,610	1,120	1,290	1,860	0,049	1,041	1,005	1,078	0,3301
Cáncer de SNC	322	46	90	59	66	0,760	1,320	1,140	1,030	0,704	0,993	0,973	1,013	0,09253
Cáncer de tiroides	34	5	13	10	5	0,830	1,290	1,880	0,840	0,993	0,990	0,919	1,066	0,377
LNH	235	39	71	34	45	0,960	1,310	1,050	1,070	0,179	0,998	0,973	1,024	0,9098
Hodgkin	61	8	13	12	11	0,620	1,210	1,180	1,140	0,602	1,044	0,998	1,091	0,407
Mieloma	181	40	43	32	35	1,360	0,790	1,080	0,770	0,206	0,998	0,974	1,022	0,348
Cáncer de vejiga	633	92	160	84	133	0,930	1,100	0,960	1,020	0,926	1,001	0,987	1,014	0,4293
Conjuntivo	67	7	18	7	11	1,050	1,490	0,850	1,030	0,828	0,995	0,943	1,049	0,1102
Cáncer de riñón	264	66	73	46	60	1,500	1,010	1,060	1,110	0,789	0,994	0,971	1,018	0,4594
Cáncer de estómago	1427	293	313	206	248	0,850	0,810	0,850	0,970	0,777	1,003	0,992	1,015	0,05479
Cáncer colorrectal	1568	282	504	259	373	1,030	1,230	1,030	1,110	0,407	1,004	0,996	1,012	0,01977
Cáncer de testículo	10	0	8	2	1	0,000	2,640	1,120	0,520	0,671	1,070	0,947	1,210	0,9293
Cáncer de mama (mujeres)	887	150	231	141	198	1,050	1,200	1,140	1,230	0,087	1,001	0,989	1,014	0,02319
Cáncer de ovario	203	36	65	38	48	1,320	1,360	1,260	1,080	0,921	0,996	0,974	1,019	0,2235
Categoría dosis microSievert						<=2,24265	2,2852 – 18,248	18,45577 – 57,85	59,512 – 347,213					
Leucemias*	636	105	156	116	155	0,980	1,060	1,220	1,130	0,144	1,012	1,001	1,022	0,2614

## **Estudio del posible efecto de la radiación natural en el entorno de las instalaciones**

La radiación natural se ha categorizado en cuartiles y se han calculado las razones de tasas de cada cuartil comparada con la de menor exposición (primer cuartil). Las estimaciones están ajustadas por edad y variables socio-demográficas.

En este análisis no es posible utilizar una estimación de exposición acumulada por ser la variable de exposición una constante. La exposición acumulada es la dosis anual multiplicada por la edad y la categorización de la variable acumulada nos mostrará simplemente el efecto de la edad ya que compararía los sujetos de más edad con los más jóvenes. La edad es el marcador de riesgo más importante para el cáncer, ya que su incidencia aumenta exponencialmente con la edad. Teniendo en cuenta esta dependencia entre dosis acumulada y edad, la forma más lógica de análisis es la comparación de las tasas de mortalidad en zonas con mayor radiación natural anual con la observada en las zonas de menor radiación natural anual.

No se han encontrado asociaciones estadísticas de interés en ninguno de los análisis realizados, ni con la variable categorizada, ni asumiendo un efecto lineal (variable continua). Los resultados son negativos cuando se considera el periodo de funcionamiento de las instalaciones y también al considerar todo el período de estudio.

## **Estudio del posible efecto de la radiación natural en zonas de alta y baja exposición alejadas de las instalaciones**

El estudio incluye un análisis comparativo de la mortalidad por cáncer en dos zonas de alta y baja radiación natural. La zona de alta radiación natural está ubicada en el sur de Galicia y la de baja incluye municipios de las provincias de Valencia y Alicante.

Ese análisis comprende un período de 10 años (1994-2003), al ser la variable de exposición una constante en el tiempo para cada municipio, no hay que tener en cuenta periodo de inducción.

Se ha comparado la mortalidad entre las dos áreas (Alta radiación natural frente a Baja radiación natural) para los diferentes tumores de estudio, estimación ajustada por edad, periodo y variables socio demográficas. En este análisis, se observa una mayor mortalidad en el área de Galicia (área de mayor exposición) que en el área de Valencia (menor exposición), tanto en hombres como en mujeres, para el cáncer de pulmón y el cáncer de estómago. En hombres, Galicia presenta también un exceso de mortalidad para los linfomas no hodgkinianos y el cáncer colorrectal. No obstante, hay que tener en cuenta que ambas zonas geográficas son muy diferentes entre sí, no sólo en cuanto a la magnitud de la radiación natural, sino también en lo referente a otros factores de riesgo ligados al estilo de vida, como la dieta, consumo de tabaco y alcohol y presencia de otras exposiciones ambientales y/o laborales.

El análisis se ha realizado también en este caso con la dosis anual debida a radiación natural categorizada por cuartiles en ambas zonas. La radiación natural en ambas zonas no se solapa pues el rango en la zona de alta radiación natural es de 4270 a 5850 microSievert mientras que en la de baja es 1250 a 2230 microSievert. No se ha encontrado ninguna asociación entre la mortalidad por los distintos tumores analizados y la dosis estimada de radiación natural.

Los resultados referentes a la radiación natural valorados en su conjunto son negativos. No se observa un patrón de cambio de las tasas de mortalidad por cáncer en relación con la radiación natural en ninguno de los análisis realizados, ni en el entorno de las centrales e instalaciones del ciclo, ni en el estudio específico de las zonas de alta y baja radiación natural.

#### 4. DISCUSIÓN

Se comentan a continuación algunos aspectos relevantes de los resultados obtenidos en el estudio.

En términos generales, los resultados de los análisis conjuntos de todas las instalaciones para determinar la posible relación entre la mortalidad por cáncer y la exposición a la radiación artificial derivada de las emisiones de estas instalaciones son negativos, algo esperable teniendo en cuenta los bajos niveles de exposición acumulada obtenidos en este estudio, que en ningún caso superan los 350 microSievert. A dosis tan bajas, no es esperable observar efecto alguno a la luz de los conocimientos actuales. Efectivamente, no se observa un patrón consistente de incremento de la mortalidad por cáncer que acompañe a una mayor exposición derivada del funcionamiento normal de las instalaciones. Si bien se detectan puntualmente algunos posibles incrementos de la mortalidad en relación con la mayor dosis de radiación, estos incrementos no se repiten en diferentes instalaciones, lo cual resta consistencia a la posible existencia de una relación con las dosis de exposición.

A la hora de explicar estas asociaciones estadísticas hay que tener en cuenta que la información disponible no permite considerar en el análisis otros factores de riesgo relevantes en la génesis del cáncer. Antes de concluir que los excesos puntuales de mortalidad observados son directamente atribuibles a la radiación artificial sería necesario tener en cuenta estos otros factores.

Los estudios epidemiológicos siempre están sujetos a posibles fuentes de sesgos. Clásicamente estos sesgos se clasifican en sesgos de selección, información (valoración y clasificación de la exposición), confusión (influencia de otros factores no considerados) y análisis que han de ser discutidos en este estudio.

Respecto a la selección, la identificación de la base del estudio ha venido determinada por la decisión de incluir todos los municipios en un radio de 30 km de cada instalación. Este radio es el utilizado en los planes de vigilancia ambiental del entorno de las centrales nucleares. Como municipios de referencia se incluyeron una serie de municipios equiparados con los municipios 'expuestos' por una serie de variables socio demográficas (número de habitantes, porcentaje de parados, porcentaje de analfabetos, de agricultores, nivel de renta y provincia) y suficientemente alejados de cada instalación nuclear. Aunque la equiparación utilizada en la selección del área de referencia trata de que sean lo más parecidas posibles para reducir los posibles efectos de confusión, el estudio no ha tenido en cuenta aspectos importantes de exposiciones individuales de las poblaciones comparadas (hábitos, exposiciones ocupacionales o ambientales derivadas del entorno).

En la discusión de los resultados del estudio tiene un papel central la validez de las estimaciones de dosis realizadas por el CSN, ya que se trata de la principal aportación original del estudio.

Para la estimación de las dosis efectivas se han seleccionado valores conservadores, que sobrevaloran la exposición, para los parámetros utilizados cuando no se disponía de valores más ajustados a las condiciones reales. En el caso de las estimaciones de dosis por ingestión se ha utilizado una aproximación más realista, seleccionando valores medios para los consumos de los diferentes alimentos. De forma global la metodología utilizada resulta conservadora para la estimación de la dosis efectiva del conjunto de la población de cada municipio.

Además de las incertidumbres inherentes a las propias metodologías de estimación de dosis, merecen una mención particular las relativas a la determinación del término fuente en las instalaciones del ciclo de combustible para las que no se ha dispuesto, en algunos

casos, de información periódica específica sobre actividad e isótopos vertidos. En ellas se ha asumido una sobrevaloración del término fuente de acuerdo con los valores nominales de diseño de sistemas de proceso y de seguridad (es decir, capacidades máximas, caso de la FUA), o a la contabilización de mineral removido y procesado en función de su ley (planta Lobo-G). Obviamente, en estas situaciones las hipótesis de cálculo necesarias vienen afectadas de conservadurismos adicionales.

Finalmente, una gran fuente de incertidumbre, posiblemente la más importante por ser la que establece de forma directa una relación causa-efecto, tiene que ver con la cuantificación del efecto que la radiación ionizante tiene sobre la salud de las personas, es decir, los factores de conversión a dosis. Se han utilizado los valores admitidos por la comunidad internacional y recogidos en la legislación nacional (RPSRI, 2001), salvo los correspondientes a dosis por exposición externa por depósitos sobre el suelo, en que ha sido necesario acudir a otras fuentes (EPA, 2002). En el caso del radón (principal contribuyente a la dosis por radiación natural y por inhalación en las instalaciones de minería de uranio), por ejemplo, la incertidumbre asociada al factor de conversión a dosis es de un 100% de acuerdo a la ICRP (ICRP, 1993).

La distribución espacial de los datos clasificados por categorías según dosis difiere del patrón radial producido por las distancias, que se utilizó en estudios precedentes, debido a que se han considerado las características propias de cada emplazamiento y los usos de la tierra y el agua en la zona. Los errores de clasificación variarán según la instalación. Si bien para algunas instalaciones, por el patrón de distribución de las estimaciones de las dosis, la distancia podría ser una buena aproximación (Vg.: Garoña), para otras no. Las pruebas de concordancia entre las clasificaciones, en alguna de las instalaciones indican que la probabilidad de clasificar mal cada uno de los municipios es superior al 50% cuando se utiliza la distancia como indicador de exposición. Un ejemplo de las consecuencias de estos errores de clasificación podrían ser los resultados de mortalidad por mieloma múltiple en el entorno de la central José Cabrera en la que, en el anterior estudio utilizando como indicador la distancia, se observaba un exceso de mortalidad por este cáncer en el área de estudio (0-30 km). Sin embargo, este exceso no se asocia a la distribución de las dosis de radiación artificial estimadas, encontrándose las tasas más altas en municipios situados en las categorías de menor exposición.

El análisis se ha basado en la comparación de las tasas de mortalidad en diferentes categorías de exposición a radiación con la categoría de referencia. Se ha tenido en cuenta el año de incorporación a cada cohorte de la población en cada municipio para estimar sus dosis acumuladas. En el caso de la radiación artificial, se asume que los municipios ubicados a más de 50 km de cada instalación su dosis es nula. En el caso de la radiación natural se han utilizado cuartiles en su categorización. Todos los estimadores de riesgo se han ajustado por edad, periodo, variables socio demográficas incluidas por diseño y por radiación natural. Las pruebas de dosis-respuesta en el análisis por categorías se han aplicado utilizando el punto medio de dosis estimada de cada intervalo, ya que es lo recomendado en esta forma de análisis. Todos los modelos que presentaban dispersión extra-poisson se han corregido para adecuar la amplitud de los intervalos de confianza a la distribución real de los datos. En el análisis conjunto de instalaciones se han empleado modelos mixtos en los que la variable instalación considerada como término de efectos aleatorios constituye una forma de estratificación que, además de proporcionar robustez a los estimadores de efecto, tiene en cuenta la heterogeneidad geográfica de la mortalidad por cáncer presente en España.

La utilización de dosis estimadas incluye un componente de incertidumbre en la exposición adicional a la asignación ecológica. Aunque se recomienda tener en cuenta esta incertidumbre en el análisis, en términos prácticos es bastante difícil, dada la necesidad de contar con información sobre la propia distribución de la incertidumbre para las dosis entre los diferentes grupos de población.

Otras formas de exposición a radiaciones ionizantes como la ocupacional o la derivada de pruebas médicas diagnósticas (la mayor fuente antropogénica de exposición a radiaciones ionizantes), no se pueden tener en cuenta en este tipo de estudios, ya que sólo se dispone de información sobre las mismas a nivel individual o promediada a nivel nacional.

Respecto a la valoración de los resultados encontrados en los municipios cercanos a algunas instalaciones, puede tener interés la presencia de otro tipo de industrias contaminantes en el entorno de cada una de las instalaciones. Esta información ha sido obtenida del registro EPER (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes).

La central de Ascó está muy cerca de la planta electroquímica Ercros ubicada en Flix. En este municipio se han realizado diferentes estudios y está documentada la exposición de la población a hexaclorobenceno y otros compuestos organoclorados que pueden estar asociados con los LNH.

En el entorno de Garoña están registradas cinco industrias en el EPER. Dos de ellas del sector químico, una de producción de papel, una central térmica y un vertedero de residuos peligrosos. Cuatro de ellas están en Miranda del Ebro, a 26 km de la central.

En el entorno de las instalaciones de producción de concentrados de uranio se mezclan tres tipos de exposición. La exposición laboral, que si bien se da en todas las instalaciones, en las actividades de minería la protección personal de los trabajadores era menor en los años 60 y 70. La exposición de la población en general, derivada de las emisiones, en la que pesaría más su componente de toxicidad química que la radiológica. Por último, los depósitos de residuos (estériles-*tailings*) que también son tóxicos. La exposición ambiental a radiaciones ionizantes en este tipo de instalaciones posee características similares a las de la radiación natural (isótopos, vías de transferencia, incorporación al organismo), el hecho de que no se encuentren resultados estadísticamente significativos asociados con dosis muy superiores debidas la radiación natural resta credibilidad a los hallazgos puntuales asociados con la dosis debida a la radiación artificial para estas instalaciones.

En el entorno de la fábrica de Andújar se localizan 11 industrias contaminantes. En su mayor parte (8) pertenecen al sector de la industria mineral (fabricación de cerámica y ladrillos), dos vertederos y una papelera. La industria de cerámica y fabricación de ladrillos se caracteriza por sus fuertes emisiones de SO<sub>2</sub>, flúor y partículas (PM10). Este tipo de emisiones podría sumarse a la exposición derivada del procesamiento del uranio y podría en parte explicar la mayor mortalidad por cáncer de pulmón, aunque no se ha descrito que se asocien a una mayor mortalidad por cáncer de huesos y leucemias. El exceso de mortalidad en cáncer de pulmón no se observa en mujeres, por lo que podría tratarse de un efecto relacionado con exposiciones ocupacionales y/o a hábitos diferenciales (consumo de tabaco). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el número de trabajadores de la FUA ha sido muy reducido en relación al total de la población residente en la zona, por lo que es difícil atribuir los resultados a la influencia de la exposición ocupacional en dicha instalación. El exceso de mortalidad por cáncer de huesos únicamente se observa en mujeres en las que todos los estimadores están por encima de la unidad. Algunos radionucleidos como el bario, estroncio, radio y transuránicos son osteotróficos. Por otro lado, hay que tener en cuenta que la precisión de la certificación del cáncer de huesos mejoró a mediados de los años 80, cuando la codificación de los certificados se transfirió a las comunidades autónomas, sin que conozcamos la posible influencia de esta mejora de la certificación en los resultados obtenidos.

El impacto de estas industrias contaminantes en la mortalidad por cáncer en las zonas estudiadas es muy difícil de valorar y más complicado aún es individualizar los riesgos derivados de cada una.

Estos tres aspectos, además de otros que se mencionan posteriormente, podrían explicar los resultados relacionados con las instalaciones de producción de concentrados de uranio, sobre todo en el entorno de Andújar.

Aunque el estudio no ha mostrado resultados significativos respecto a la radiación natural, entendida como la suma de la radiación gamma terrestre, radiación cósmica, la dieta y la procedente del radón y torón (exterior e interior de edificios), hace años se describió el papel etiológico del radón en el cáncer de pulmón en mineros y, más recientemente, el posible incremento del riesgo de la exposición a muy bajos niveles de dosis en las casas, a pesar de que la exposición en el hogar representa menos de la mitad de toda la exposición recibida por la población general. Las estimaciones del CSN para la población española de exposición a fuentes naturales de población son: radiación gamma terrestre (30%), radiación cósmica (18%) y la procedente del radón y torón (34%) (exterior e interior de edificios) e ingesta (18%).

La opinión más aceptada actualmente es que la asociación dosis-respuesta negativa procedente de los estudios ecológicos está en contradicción con los resultados de los estudios analíticos y, por tanto, ha de ser rechazada. En España, los mapas de alta resolución espacial de mortalidad por tumores muestran un patrón en mujeres que señala con una mayor mortalidad por cáncer de pulmón en zonas del sur de Galicia con alta radiación natural, donde la composición del suelo es granítica y el propio granito es empleado como material de construcción preferente. Este patrón en mujeres también se observa en zonas costeras de A Coruña y Lugo, con lo que la exposición al radón sería una explicación plausible de este resultado. Sin embargo, en el análisis del estudio restringido a la zona de alta radiación natural de la provincia de Pontevedra, los resultados no apoyan la posible existencia de una relación entre la estimación de la exposición radiación natural y la mortalidad por los tumores estudiados.

El estudio recogido en este informe contiene varias fortalezas que conviene recordar. La principal, y uno de los elementos originales del estudio, es la realización de un estudio epidemiológico que incluye la reconstrucción de la historia dosimétrica de las poblaciones. Este trabajo había sido sugerido en varias ocasiones, pero, hasta donde sabemos, no ha sido abordado anteriormente en otros países en estudios con el alcance del presente. Estas determinaciones de dosis de radiación muestran la anisotropía de la exposición y posibilitan superar las limitaciones de los modelos que utilizan la distancia al foco como medida de exposición.

Pese a las aproximaciones asociadas con la utilización en algún caso de datos genéricos y a las incertidumbres metodológicas mencionadas, las estimaciones de dosis realizadas son probadamente fiables, ya que se han realizado utilizando una metodología internacionalmente aceptada, acorde con el estado del arte en la materia, y los resultados son coherentes con los obtenidos para este tipo de instalaciones en todo el mundo. Las estimaciones de dosis consideradas en este estudio constituyen un límite superior para las exposiciones realmente recibidas por la población, tanto debidas al funcionamiento de las instalaciones como a la radiación de origen natural.

El estudio contiene una importante cantidad de personas-año en el período de funcionamiento de las instalaciones, lo que incrementa la posibilidad de detectar asociaciones si las hubiere (potencia estadística). El estudio ha sido concebido como un estudio ecológico retrospectivo de cohortes dinámicas en las que se ha tenido en cuenta las dosis desde la incorporación de la población hasta su abandono o muerte. Ello ha permitido analizar las dosis acumuladas de radiación artificial teniendo en cuenta las generaciones.

Otra fortaleza del estudio es la utilización de unas categorías de exposición que reconocen la distribución natural de las dosis maximizando los 'saltos' entre categorías. Dada la baja magnitud de las dosis, su asignación a grupos de población y la incertidumbre presente en

las estimaciones, la categorización es el procedimiento más adecuado para su análisis. El análisis ha empleado métodos robustos en las estimaciones de los intervalos de confianza de los efectos, lo que podría ser considerado como un procedimiento conservador, aunque, por otro lado, no se han efectuado correcciones de los valores-p para tener en cuenta el elevado número de test de hipótesis llevados a cabo (corrección por comparaciones múltiples). En el caso de ausencia de asociación entre dosis estimada y mortalidad por cualquier tipo de cáncer, todavía es posible encontrar un cierto porcentaje de asociaciones estadísticamente significativas debidas únicamente al azar. El porcentaje de asociaciones positivas espurias esperables con los límites de significación utilizados es de un 2,5%.

Otra fortaleza de gran interés de este estudio ha sido su ejecución en condiciones de transparencia, a lo que ha contribuido el Comité Consultivo constituido para su seguimiento, en el que se han discutido todos los factores del diseño del estudio y de su ejecución, así como los aspectos de comunicación y divulgación pública.

Entre las debilidades del estudio se podría volver a citar que se trata de un estudio de mortalidad y que para patologías como las leucemias sería más adecuado utilizar la información sobre la incidencia, información no disponible en la mayoría de los ámbitos de análisis. Sin embargo, en los resultados referidos a las centrales nucleares no se observan indicios que apunten a excesos de mortalidad por estas patologías.

A la hora de interpretar los resultados, es necesario tener en cuenta que la radiosensibilidad de los tejidos humanos para la inducción de un cáncer es variable (UNSCEAR 2000). Los cánceres que se asocian con frecuencia en la literatura científica con las radiaciones, con estimaciones de riesgo consistentes, son: las leucemias, los derivados del tejido mamario cuando la exposición se produce antes de la menopausia y el de la glándula tiroidea en jóvenes. Los tejidos que parecen ser menos susceptibles o en los que los cánceres son inducidos a relativamente altas dosis incluyen: pulmón, estómago, colon, esófago, vejiga, ovario, cerebro y sistema nervioso e hígado. Los cánceres raramente asociados con la radiación y con estimaciones de riesgo inciertas son: riñón, glándulas salivares, linfoma no-Hodgkin, mieloma, piel, recto, útero, hueso y tejido conjuntivo. Los que no han mostrado asociación nunca o esporádicamente son la leucemia linfática crónica, páncreas, linfoma de Hodgkin, próstata, testículo, cérvix y ciertos cánceres infantiles. Este tipo de clasificación se revisa periódicamente dependiendo de la publicación de resultados de investigación. En este trabajo se han incluido localizaciones de todas las categorías descritas. Sin embargo, los resultados positivos de nuestro estudio no se observan en los tumores más radiosensibles. Es decir, las escasas asociaciones encontradas entre la dosis estimada y la mortalidad por un determinado tipo de cáncer no afectan de forma consistente a los tejidos más susceptibles.

En el análisis, la forma de control de los posibles factores de confusión está muy limitada por la disponibilidad de la información siendo el más evidente el caso del consumo de tabaco, ya que está asociado a muchos de los tumores estudiados. El estudio tiene carácter ecológico por lo que los indicadores de exposición municipal se aplican a toda la población y ello hace que el sesgo ecológico pueda estar presente.

Otra limitación de interés es la imposibilidad de encontrar formas de validación de las dosis estimadas, tanto en el ámbito ambiental como en el biológico, lo que contribuiría teóricamente a estar más seguros de la valoración de los resultados. Ha de tenerse en cuenta que las mediciones ambientales, por lo general, son inferiores a los límites de detección, lo que permite asegurar que los valores reales son nulos o insignificantes, dada la altísima sensibilidad de este tipo de medidas. Por tanto, si no se detecta radiactividad en las vías de transferencia, carece de sentido realizar controles específicos individuales para conocer las dosis recibidas por la población. Estos controles requerirían portar dosímetros y estar sometidos a controles periódicos de excretas y radiactividad corporal, lo que

además no estaría justificado en ningún caso por la extremadamente baja magnitud de dichas dosis.

El estudio, por su diseño y disponibilidad de información, no ha podido tener en cuenta los fenómenos demográficos como son las migraciones, asumiendo estabilidad de las poblaciones en sus municipios a la hora de la asignación de las dosis.

En términos epidemiológicos, el problema de la toxicidad química de los radionucleidos artificiales está muy poco estudiado en poblaciones humanas y podría ser una vía a considerar en la explicación de fenómenos que no encajan en los conocimientos radiobiológicos actuales.

A continuación se exponen las principales conclusiones del estudio epidemiológico, realizado en los entornos de influencia de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear españolas y en dos zonas no afectadas por dichas instalaciones y sometidas a diferentes niveles de exposición a radiaciones ionizantes de origen natural. El estudio se ha realizado con una metodología científica contrastada internacionalmente y en condiciones de transparencia, contando con la supervisión de un Comité Consultivo de carácter independiente.

## **5. CONCLUSIONES**

1. Este estudio muestra que, empleando métodos de estimación realistas, las dosis de radiación artificial acumulada en todo el periodo de estudio, que habría recibido la población como consecuencia del funcionamiento de las instalaciones, son muy reducidas. Los conocimientos actuales en radiobiología y en epidemiología no sugieren que esta exposición pueda relacionarse con una mayor mortalidad por cáncer en las poblaciones de su entorno.
2. En términos generales, el estudio de mortalidad por cáncer en el entorno de las centrales nucleares y de las instalaciones de ciclo del combustible nuclear no ha detectado resultados consistentes que muestren un efecto de incremento de la mortalidad por diferentes tipos de cáncer asociados con la dosis de radiación artificial recibida. Estos resultados son independientes de la radiación natural y de otras variables socio-demográficas controladas en el análisis.
3. En el estudio se han encontrado algunas relaciones dosis respuesta, limitadas a algún tipo de cáncer y en alguna de las instalaciones individuales. Estos resultados no parecen deberse a la exposición derivada del funcionamiento de las instalaciones, ya que dichos hallazgos no se reproducen en otras instalaciones del mismo tipo y con características de exposición similares. Teniendo en cuenta, además, las bajas dosis de radiación estimadas, su explicación habría que buscarla en otras posibles fuentes o formas adicionales de exposición ambiental o en el propio azar.
4. Los resultados referentes a la radiación natural valorados en su conjunto no muestran ninguna aportación relevante. No se observa un patrón de cambio de las tasas de mortalidad por cáncer en relación con la radiación natural en ninguno de los análisis realizados, ni en el entorno de las centrales e instalaciones del ciclo, ni en el estudio específico de las zonas de alta y baja radiación natural.