

> Ascensión Bernal**,
 Juan Carlos Lentijo*,
 Gonzalo López-Abente**,
 Marina Pollán**,
 Lucila María Ramos*,
 Manuel Rodríguez*,
 Odorina Tello**,
 Inés Urbano*

Efecto de las radiaciones derivadas del funcionamiento de las instalaciones nucleares y del ciclo españolas sobre la salud de la población

1. Introducción

Durante muchos años ha persistido la controversia sobre si la exposición a radiaciones ionizantes, derivada de las emisiones de efluentes durante la operación rutinaria de las instalaciones nucleares o radiactivas, podría incrementar el riesgo de incidencia de tumores malignos en la población residente en su entorno.

Varios informes sobre leucemias en niños en Inglaterra (Cook-Mozaffari *et al.*, 1989)¹ y en Alemania (Michaelis *et al.*, 1992)² y otros publicados recientemente (Hoffmann *et al.*, 2007)³ (Kaatsch *et al.*, 2008)⁴ han mostrando un incremento de riesgo, estadísticamente significativo, en residentes muy próximos a las instalaciones. Los autores apuntan que este exceso de riesgo no es el esperado según los conocimientos actuales en radiobiología, dados los bajos niveles de exposición a radiación artificial procedente de las instalaciones. Estos estudios han sido replicados posteriormente en Reino Unido (Bithell *et al.*, 2008)⁵ y en Francia (Laurier *et al.*, 2008)⁶ con resultados negativos indicando que no existe este exceso de riesgo.

La exposición debida a los efluentes radiactivos de las instalaciones actuales están varios órdenes de magnitud por debajo de los valores límite autorizados en los permisos de operación de las mismas (0,1 mSv/año en las centrales nucleares y de 0,3 mSv/año en el resto de instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo).

Haciéndose eco de una demanda social sobre el impacto de esas instalaciones 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 por la que instaba al Gobierno a realizar un estudio epidemiológico, 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 Consejo de Seguridad Nuclear (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 los resultados.

Con objeto de cumplir este cometido, el Instituto de Salud Carlos III (ISCIII) 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 pro-

* Consejo de Seguridad Nuclear

** Instituto de Salud Carlos III

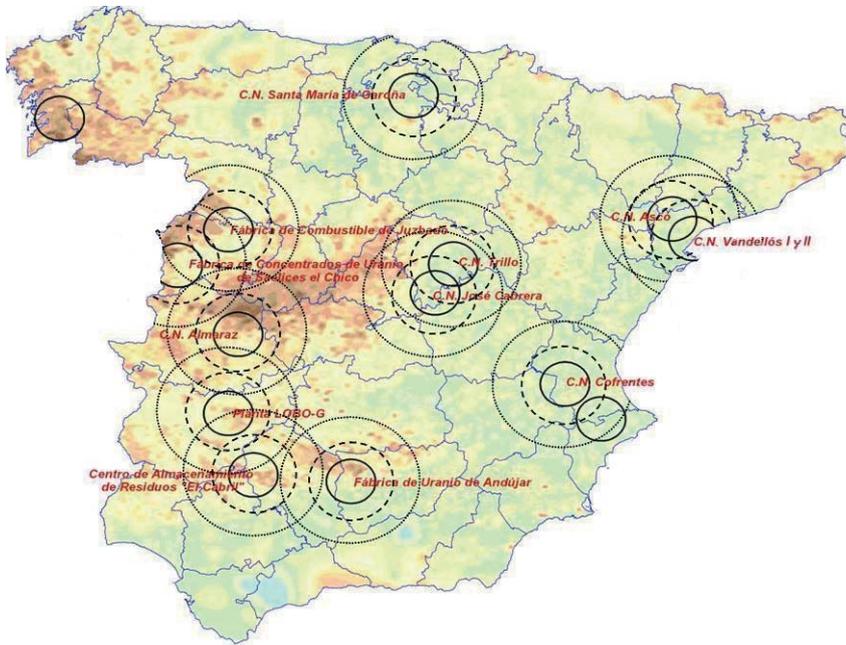


Figura 1. Instalaciones y zonas incluidas en el estudio epidemiológico. Los círculos en negro delimitan los entornos de radio 30, 50 y 100 km alrededor de las instalaciones, así como las zonas de control en Galicia y en la Comunidad Valenciana.

pietarias 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.

El objetivo general del estudio, cuyos informes ya han sido remitidos al Congreso de los Diputados, era analizar la mortalidad por cáncer en los municipios situados en la proximidad de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo del combustible nuclear españolas en función de la historia de exposición a las emisiones derivadas de su funcionamiento, comparando con otros municipios españoles de similares características sociodemográficas no situados en el entorno de estas instalaciones.

El estudio incluye todas las centrales nucleares y el resto de instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear, 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, comparándolos con los municipios de una zona de control, con características sociodemográficas 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 magnitud de radiaciones de origen natural y no afectadas por la influencia de ninguna de estas instalaciones. En concreto se seleccionaron los municipios en dos áreas circulares de 30 km de radio, una en Galicia, con altos índices de exposición a radiación natural, y otra en la Comunidad Valenciana, con baja exposición a radiación natural.

En conjunto se han incluido en el estudio las poblaciones de 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. En el mapa de la figura 1 se representan las instalaciones y las áreas objeto del estudio.

2. Materiales y métodos

El diseño de este estudio se corresponde con un estudio ecológico de cohortes retrospectivas, en el que se contrasta la mortalidad registrada por diferentes tipos de cáncer en los residentes en todos los municipios situados en el entorno de las instalaciones españolas (30 km), clasificados de acuerdo con su exposición a la radiación artificial, con la encontrada en los municipios utilizados como referencia (50 a 100 km) y por tanto no expuestos. El periodo 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 acumulada, estimada para cada grupo de población formado por los residentes de cada municipio, y se asigna a los individuos de dicho grupo teniendo en cuenta su incorporación a cada cohorte de nacimiento, dado que no es posible realizar un estudio individualizado de dosis en cada persona.

2.1. Indicador de la exposición:

La dosis efectiva y su estimación
Los vertidos radiactivos líquidos y gaseosos, emitidos de forma controlada durante el funcionamiento normal de las instalaciones, sufren un proceso de dilución y dispersión en el medio ambiente dando lugar a concentraciones de los radionucleidos en el entorno físico de las instalaciones (aire, agua, suelo),

pudiendo llegar hasta los individuos de la población por diferentes vías. Las concentraciones de los diferentes radionucleidos, determinados en los programas de vigilancia radiológica ambiental, serían la base para determinar la exposición del público, pero los niveles de radiactividad que se obtienen en estos programas son muy bajos, en general inferiores a los niveles de detección. Por tanto, para valorar la exposición debida a las instalaciones se utilizan metodologías de estimación partiendo de los vertidos, cuya finalidad es proporcionar una serie de valores que, bajo ciertas hipótesis, puedan considerarse representativos de la magnitud del impacto radiológico al público en términos de dosis. Los resultados, así obtenidos, no representan en realidad la dosis verdadera que los individuos reciben, sino que constituyen un valor aproximado de la misma, orientado hacia un objetivo, de tipo regulador en la mayoría de los casos.

Por ello, en el estudio se ha realizado una estimación retrospectiva de las dosis efectivas a la población de cada municipio del entorno debida 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 rea-

lizado, en el que se pretenden 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.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, en sus siglas en inglés) 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 de estas características. Ésta le 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 “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, participaron los agentes interesados a través del Comité Consultivo establecido para realizar el seguimiento del estudio.

Los modelos de cálculo 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) en su *Safety Report Series nº 19* (SRS-19) (OIEA, 2001)⁷. 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 (ver figura 2), 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 ha considerado la exposición externa a

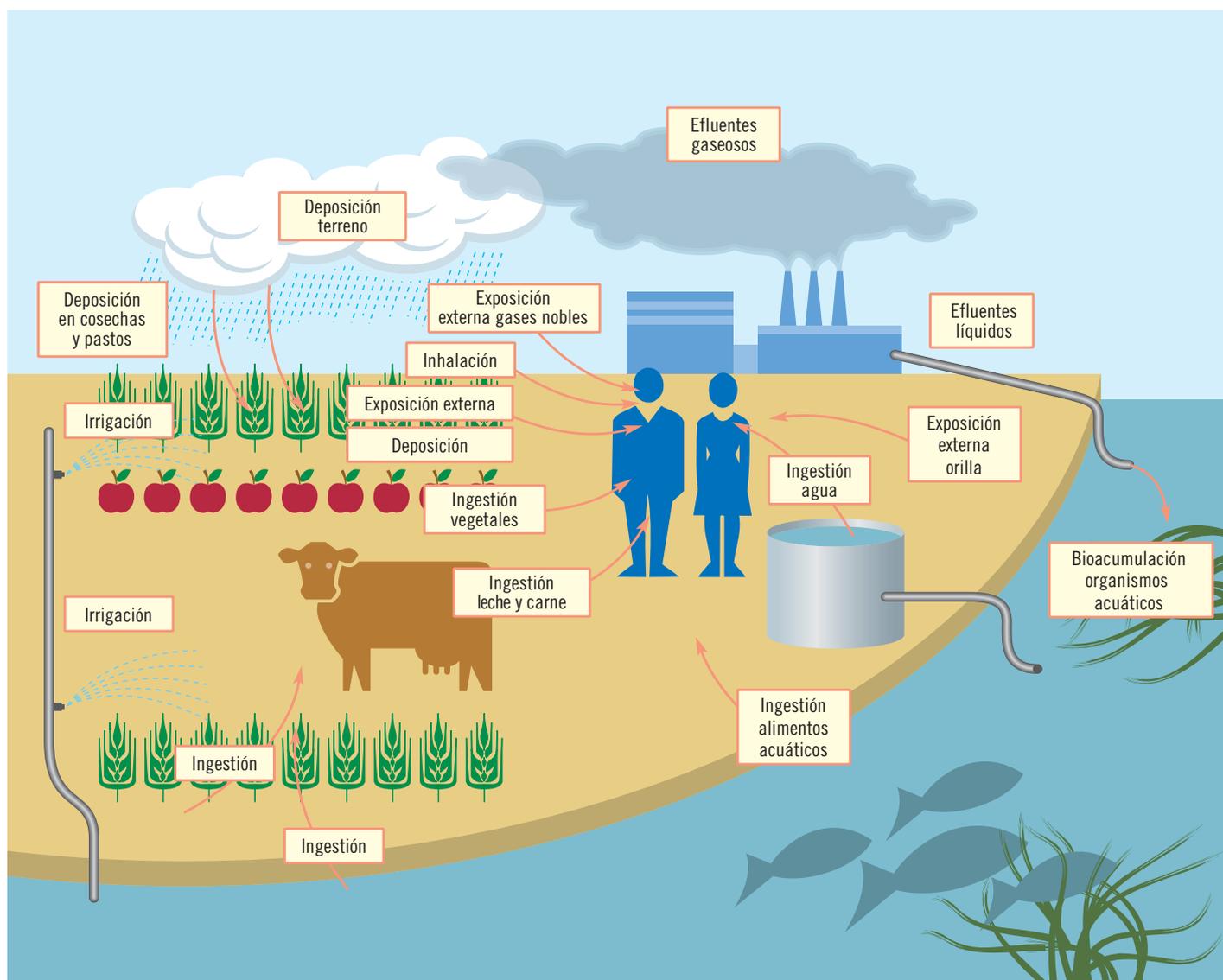


Figura 2. Vías de exposición de efluentes gaseosos y líquidos.

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.

Las dosis efectivas se han estimado año a año para la población de cada municipio del estudio y representan la dosis media anual que habría recibido una persona tipo en cada municipio.

En cuanto a las dosis por radiación natural, los cálculos han seguido la metodología del informe UNSCEAR 2000⁸ y se ha estimado un único valor para cada municipio, considerando que la ra-

diación natural no varía con el tiempo. Las vías de exposición consideradas han sido las siguientes:

- Radiación cósmica.
- Radiación gamma terrestre.
- Inhalación de radón y torón; y
- 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

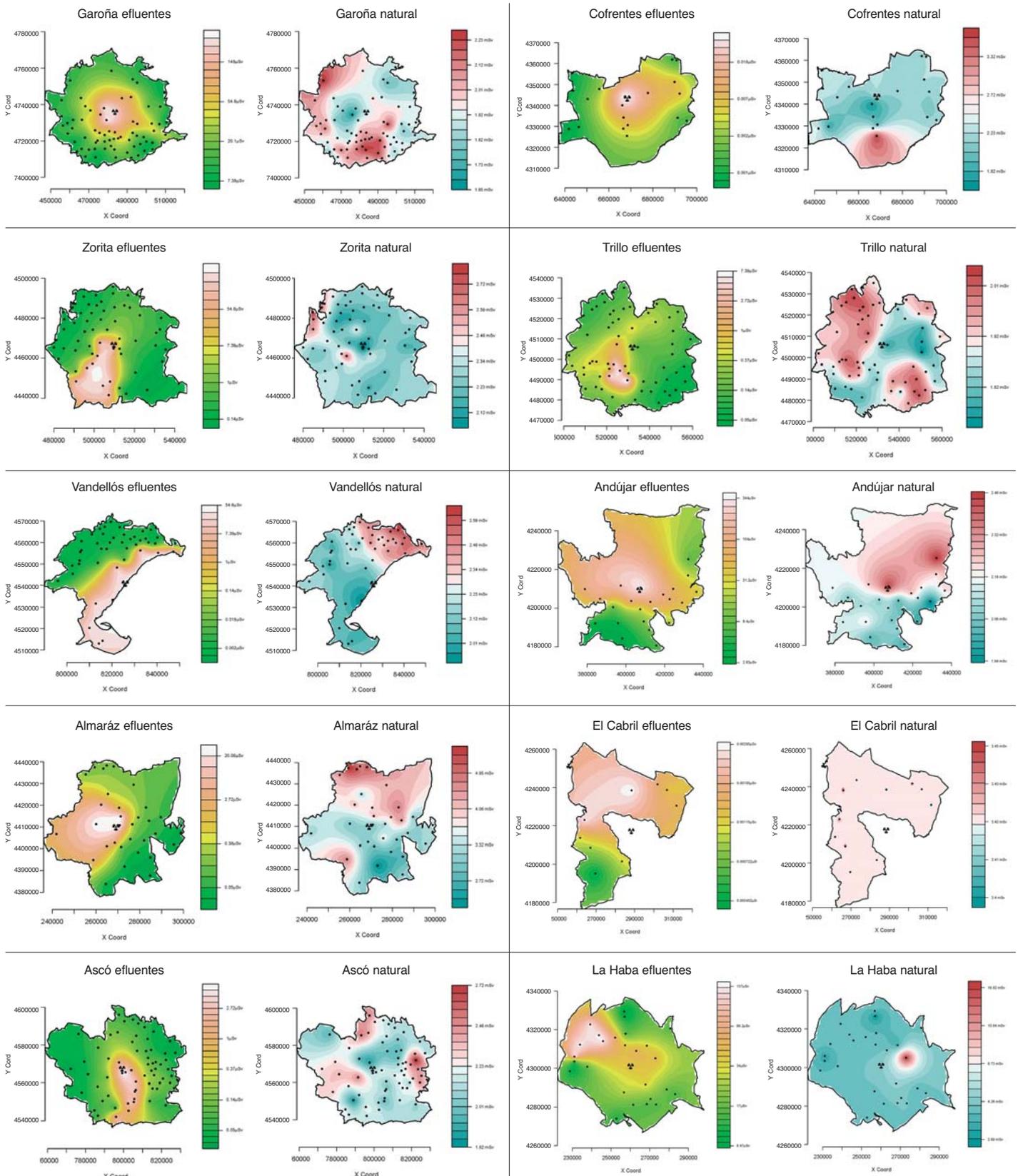


Figura 3. Distribución de la exposición en el entorno de todas las instalaciones incluidas en el estudio, representada con una escala *ad hoc* para cada una de las instalaciones. En la gráfica de la izquierda se representa, para cada instalación, la dosis acumulada debida a los vertidos y en la gráfica de la derecha la dosis anual debida a radiación natural.

Tabla 1. 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 acumulada Rango dosis microSv	Radiación natural anual Rango dosis microSv
Centrales nucleares			
José Cabrera	60	1,02 E-1 – 2,67 E+2	2,03 E+3 – 2,84 E+3
Santa Mª de Garona	68	6,52 E+0 – 3,04 E+2	1,77 E+3 – 2,28 E+3
Vandellós (I y II)	46	7,11 E-2 – 2,03 E+2	1,93 E+3 – 2,63 E+3
Almaraz	33	1,88 E-2 – 2,76 E+1	2,34 E+3 – 5,84 E+3
Ascó (I y II)	65	3,02 E-2 – 5,70 E+0	1,82 E+3 – 2,79 E+3
Cofrentes	19	2,84 E-2 – 2,62 E+0	1,69 E+3 – 3,73 E+3
Trillo	62	4,58 E-2 – 1,06 E+1	1,75 E+3 – 2,04 E+3
TOTAL	328*	1,88 E-2 – 3,04 E+2	1,69 E+3 – 5,84 E+3
Instalaciones del ciclo del combustible			
Andújar	22	2,91 E+0 – 3,48 E+2	1,92 E+3 – 2,47 E+3
El Cabril	9	4,36 E-4 – 2,97 E-3	2,71 E+3 – 4,20 E+3
La Haba	26	8,14 E+0 – 1,38 E+2	2,58 E+3 – 2,01 E+4
Saelices El Chico	44	1,99 E+1 – 2,89 E+2	3,43 E+3 – 1,54 E+4
Juzbado	76	1,50 E-5 – 5,79 E-2	2,42 E+3 – 5,11 E+3
TOTAL	177	1,50 E-5 – 3,48 E+2	1,92 E+3 – 2,01 E+4

*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).

o mundiales, o parametrizaciones proporcionadas por el UNSCEAR.

Los resultados de las estimaciones realizadas se resumen en la tabla 1, que recoge los rangos de dosis de radiación artificial acumulada y natural anual en los municipios del entorno de cada instalación.

En la figura 3 se representa la distribución espacial de las dosis en las localidades situadas en el entorno de 30 km de cada instalación, en una escala *ad hoc* para cada una de las instalaciones. En la columna de la izquierda se representan las dosis acumuladas en el periodo de estudio debidas a los vertidos y en la derecha las dosis anuales debidas a la radiación natural. En este caso no se utiliza una estimación de exposición acumulada por ser la variable de exposición una constante.

2.2. Análisis de la mortalidad

A pesar de que las dosis acumuladas por radiación de origen artificial son ex-

tremadamente 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 dife-

rentes a estratos con dosis similares. El objetivo es 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 y resto de instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo por otro, así como para los análisis individuales de cada instalación.

Para todos los municipios incluidos en el estudio se han tabulado 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 Instituto Nacional de Estadística (INE).

Tabla 2. Análisis conjunto de todas las centrales nucleares

Categoría dosis	Defunciones					RR	RR	RR	RR
	d0	d1	d2	d3	d4	d1	d2	d3	d4
microSv	ref					0,00076–0,18	0,18444–2,5357	2,72775- 44,038	44,80–303,5545
Cáncer de pulmón	2.022	569	448	300	631	0,900	0,910	0,800	0,970
Cáncer de huesos	56	19	11	10	20	1,250	0,700	0,540	0,960
Cáncer de SNC	311	69	85	63	89	0,770	1,100	0,830	0,840
Cáncer de tiroides	36	5	7	1	11	0,440	0,830	0,140	1,250
LNH	217	61	63	22	77	1,010	1,170	0,520	1,070
Hodgkin	27	5	11	5	11	0,560	1,460	0,800	1,110
Mieloma	150	44	42	22	50	1,020	0,950	0,940	0,980
Cáncer de vejiga	485	138	133	81	188	1,060	1,060	0,710	1,030
Conjuntivo	39	14	17	4	12	1,350	1,890	0,460	0,870
Cáncer de riñón	204	59	49	36	83	0,890	1,040	0,880	1,390
Cáncer de estómago	1.092	264	218	316	348	0,850	0,870	0,970	1,010
Cáncer colorrectal	1.369	434	388	231	414	1,070	1,100	0,880	0,950
Cáncer de testículo	7	1	1	0	1	0,320	0,630	0,000	1,060
Cáncer de mama	690	176	194	140	249	0,920	1,070	1,050	1,070
Cáncer de ovario	166	62	52	30	46	1,270	1,230	1,060	0,810
Categoría dosis						0,00041–	0,11239–1,58295	1,61190–42,953	43,97026–
microSv						0,11156			303,60581
Leucemias*	502	121	159	78	132	0,960	0,970	0,910	0,930

Resultados del análisis:

- a) Número de defunciones por categorías de exposición (dosis estimadas de radiación artificial acumuladas).
- b) Razones de tasas de mortalidad (RR) por categorías de dosis de radiación artificial acumuladas y prueba de tendencia.
- c) RR para la dosis acumulada (por cada 10 microSv) tomada como variable continua e intervalo de confianza (IC) al 95%. RR por dosis, siendo la referencia la población de los municipios del área de 50 a 100 km. La radiación natural se ha incluido categorizada. Estimaciones obtenidas de un modelo de regresión mixto que incluye las centrales como término de efectos aleatorios. Estimaciones ajustadas por radiación natural, edad, variables sociodemográficas y restringido al periodo de funcionamiento.

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 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 epidemiolo-

gía. Para la determinación de asociaciones dosis-respuesta se calculan:

- 1) Los riesgos relativos para cada intervalo de exposición.
- 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 se 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 varia-

Tendencia	RR	IC	95%
valor-p	dosis		
0,525	1,001	0,994	1,009
0,694	0,995	0,954	1,038
0,268	0,991	0,973	1,008
0,232	1,003	0,947	1,063
0,306	1,012	0,994	1,031
0,776	0,988	0,936	1,044
0,993	1,007	0,985	1,029
0,394	0,999	0,986	1,013
0,618	0,973	0,922	1,027
0,009	1,019	1,000	1,038
0,555	1,000	0,990	1,010
0,380	0,995	0,986	1,003
0,822	1,028	0,903	1,169
0,621	1,005	0,993	1,016
0,129	0,980	0,956	1,005
0,620	0,999	0,985	1,013

ble 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 se considera 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.

A partir de las dosis efectivas anuales estimadas, 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 estudio, 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.

Otras características importantes del estudio que conviene resaltar son:

—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 podido tener en cuenta otras exposiciones a las radiaciones ionizantes de origen artificial, como las de tipo laboral o las de tratamiento y diagnóstico médico.

3. Resultados

Se ha analizado la mortalidad por cada 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. La distribución

Tabla 3. Análisis conjunto de las instalaciones del ciclo del combustible

	Defunciones					RR	RR	RR	RR
	d0	d1	d2	d3	d4	d1	d2	d3	d4
Categoría dosis microSv	ref					<=2,1114	2,187–17,18551	17,7625–50,4898	52,029–335,523
Cáncer de pulmón	2.812	477	789	522	725	1,190	1,250	1,310	1,340
Cáncer de huesos	81	25	17	15	27	1,610	1,120	1,290	1,860
Cáncer de SNC	322	46	90	59	66	0,760	1,320	1,140	1,030
Cáncer de tiroides	34	5	13	10	5	0,830	1,290	1,880	0,840
LNH	235	39	71	34	45	0,960	1,310	1,050	1,070
Hodgkin	61	8	13	12	11	0,620	1,210	1,180	1,140
Mieloma	181	40	43	32	35	1,360	0,790	1,080	0,770
Cáncer de vejiga	633	92	160	84	133	0,930	1,100	0,960	1,020
Conjuntivo	67	7	18	7	11	1,050	1,490	0,850	1,030
Cáncer de riñón	264	66	73	46	60	1,500	1,010	1,060	1,110
Cáncer de estómago	1.427	293	313	206	248	0,850	0,810	0,850	0,970
Cáncer colorrectal	1.568	282	504	259	373	1,030	1,230	1,030	1,110
Cáncer de testículo	10	0	8	2	1	0,000	2,640	1,120	0,520
Cáncer de mama	887	150	231	141	198	1,050	1,200	1,140	1,230
Cáncer de ovario	203	36	65	38	48	1,320	1,360	1,260	1,080
Categoría dosis microSv						<=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

Resultados del análisis:

a) Número de defunciones por categorías de exposición [dosis de radiación artificial acumuladas].

b) Razones de tasas (RR) de mortalidad por categorías de dosis de radiación artificial acumuladas y prueba de tendencia.

c) RR para la dosis acumulada (en unidades de 10 microSv) tomada como variable continua, intervalo de confianza al 95%. Riesgos relativos por dosis siendo la referencia la población de los municipios del área de 50 a 100 km. Estimaciones obtenidas de un modelo de regresión mixto que incluye las centrales como término de efectos aleatorios. Estimaciones ajustadas por radiación natural, edad, variables sociodemográficas y restringido al periodo de funcionamiento.

de la exposición en el entorno de las instalaciones incluidas en el estudio se ha representado en la figura 3.

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

Las dosis anuales estimadas debidas a los efluentes de las centrales nucleares para la población de los 328 municipios próximos a las centrales nucleares están en el rango de 0,000017 microSv/año a

73,4 microSv/año con una media aritmética y desviación típica de 0,64 y 3,8 microSv/año respectivamente. En el entorno de las del ciclo el rango es de 0 a 72,4 microSv/año con una media aritmética y desviación típica de 1,39 y 3,52 microSv/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 que las emisiones más elevadas se produjeron en los pri-

Tendencia valor-p	RR dosis	IC	95%
<0,001	1,008	1,001	1,014
0,049	1,041	1,005	1,078
0,704	0,993	0,973	1,013
0,993	0,990	0,919	1,066
0,179	0,998	0,973	1,024
0,602	1,044	0,998	1,091
0,206	0,998	0,974	1,022
0,926	1,001	0,987	1,014
0,828	0,995	0,943	1,049
0,789	0,994	0,971	1,018
0,777	1,003	0,992	1,015
0,407	1,004	0,996	1,012
0,671	1,070	0,947	1,210
0,087	1,001	0,989	1,014
0,921	0,996	0,974	1,019
0,144	1,012	1,001	1,022

meros 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 microSv), 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 la que muestra mayor heterogeneidad de dosis entre los municipios más y menos expuestos. En cuanto a las instalaciones del 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, sobre todo por los ríos y también 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 Saélices 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 microSv, es decir, que han sido dosis irrelevantes. En el entorno de El Cabril y Juzbado apenas ha habido exposición.

En las tablas 2 y 3 se muestran los resultados para el análisis conjunto de las centrales nucleares e instalaciones del ciclo del combustible nuclear respectivamente. En estas tablas se relaciona la mortalidad por diferentes cánceres con las dosis estimadas de radiación artificial acumulada.

Las tablas muestran 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 la tabla 2 (centrales nucleares), 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 con lo que cabría esperar de una relación dosis-respuesta. Lo que sí se observa es que en la catego-

ría de mayor exposición, la RR es más elevada. Todas las estimaciones están ajustadas por edad, radiación natural categorizada en cuartiles y variables socio demográficas.

En la tabla 3 (instalaciones del ciclo) se observa un incremento aparente de la mortalidad con la dosis de radiación estimada para los siguientes tumores: cáncer de pulmón y cáncer de huesos. Además, en estos tumores 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 sólo para mujeres. 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 fundamentalmente por los resultados del entorno de la fábrica de uranio de Andújar.

4. Discusión

Los resultados, tanto en el análisis conjunto de las zonas de influencia de las centrales nucleares como en el correspondiente a las instalaciones del ciclo, no muestran una consistencia que permita detectar 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 el funcionamiento de estas instalaciones 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, la observación de una disminución de la mortalidad al aumentar la dosis de radiación, hallazgo que se ha encontrado de manera puntual).

Conclusiones

El estudio epidemiológico realizado en los entornos de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear españolas ha analizado la mortalidad por cáncer y su posible relación con las dosis efectivas estimadas en la población, derivadas del funcionamiento de las instalaciones. También se ha estudiado la posible influencia de las dosis debidas a radiaciones de origen natural.

Como resultados más significativos se han encontrado:

1. El 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.

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.

3. 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.

Agradecimiento

Nuestro agradecimiento a todos los expertos del ISCIII y del CSN sin cuyas aportaciones científicas no habría sido posible la realización del Estudio Epidemiológico, y a todos los miembros del Comité Consultivo por sus valiosos comentarios y orientaciones.

Bibliografía

- [1] Cook-Mozaffari, P. *et al.*, 1989. “Geographical variation in mortality from leukaemia and other cancers in England and Wales in relation to proximity to nuclear installations, 1969-78”. *Br J Cancer*, 59(3), 476-485.
- [2] Michaelis, J. *et al.*, 1992. “Incidence of childhood malignancies in the vicinity of west German nuclear power plants”. *Cancer Causes Control*, 3(3), 255-263.
- [3] Hoffmann, W., Terschueren, C. & Richardson, D., 2007. “Childhood leukemia in the vicinity of the Geesthacht nuclear establishments near Hamburg, Germany”. *Environ Health Perspect*, 115(6), 947-952.
- [4] Kaatsch, P. *et al.*, 2008. “Leukaemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants”. *Int J Cancer*, 122(4), 721-726.
- [5] Bithell, J. *et al.*, 2008. “Childhood leukaemia near British nuclear installations: methodological issues and recent results”. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 132(2), 191-197.
- [6] Laurier, D., Hemon, D. & Clavel, J., 2008. “Childhood leukaemia incidence below the age of 5 years near French nuclear power plants”. *J Radiol. Prot.*, 28(3), 401-403.
- [7] OIEA (2001). “Generic Models for Using in Assessing the Impact of Radioactive Substances to the Environment”. *Safety Report Series n° 19*, IAEA, Vienna 2001.
- [8] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, New York. 