

Evaluación radiológica del apilamiento de fosfoyesos de las marismas del río Tinto (Huelva)

› **Juan Pedro Bolivar**

Departamento de Física Aplicada, Universidad de Huelva

› **Rafael García-Tenorio**

Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla

› **José Luis M. Matarranz**

Subdirección de Protección Radiológica Ambiental, CSN

El complejo químico de Huelva alberga el mayor conjunto de producción de ácido fosfórico de Europa. La producción de este material, del que se derivan fertilizantes y otros productos de amplio uso, deja como residuo unos compuestos denominados fosfoyesos, que contienen radiactividad de origen natural, de los cuales se han acumulado ya más de 80 millones de toneladas desde el inicio de la actividad, en 1968.

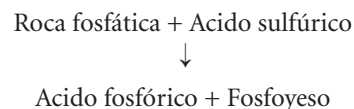
Para conocer el posible impacto que los apilamientos de estos fosfoyesos podrían estar produciendo sobre los trabajadores, el público y el medio ambiente, el CSN encargó al Ciemat dos estudios sobre la situación radiológica de las balsas que los contienen, y que ocupan unas 1.200 hectáreas, que fueron realizados en 1989 y 1998.

A partir de los resultados de estos estudios, investigadores de las universidades de Huelva y Sevilla, han llevado a cabo un proyecto de I+D (2004-2007), financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear, en el marco de su plan de acción sobre el control de la exposición debida a la radiación natural. El objetivo fundamental ha sido realizar una evaluación del posible incremento de la exposición recibida por los trabajadores o el público en relación con la producción de ácido fosfórico en las plantas onubenses y la gestión de los fosfoyesos almacenados en sus alrededores.

Desde hace aproximadamente 40 años, en las proximidades de la ciudad de Huelva y más concretamente en los márgenes de la ría formada en la confluencia de las desembocaduras de los ríos Tinto y Odiel, se localiza un gran complejo de industria química básica que incluye, entre otras, diversas plantas dedicadas a la producción de ácido fosfórico a partir del tratamiento de roca fosfática importada. El ácido fosfórico producido es fundamentalmente utilizado para la posterior fabricación de fertilizantes fosfatados, polifosfatos sódicos para detergentes y otras aplicaciones.

El proceso de producción de ácido fosfórico en dichas plantas se basa en el ataque de la roca fosfática con ácido sul-

fúrico al 70%, reacción que origina ácido fosfórico, y como sub-producto, un sólido denominado fosfoyeso (FY), compuesto mayoritariamente por sulfato cálcico dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). De forma muy simplificada, la reacción química producida es:



Las mencionadas plantas son actualmente las mayores productoras de ácido fosfórico en el ámbito de la Unión Europea. En ellas se procesan anualmente aproximadamente unos dos millones de toneladas de roca fosfática para la producción

de un millón de toneladas de ácido fosfórico y la generación de unos tres millones de toneladas de fosfoyeso

Las industrias de producción de ácido fosfórico, son un ejemplo típico de industrias denominadas NORM (siglas de Naturally Occurring Radioactive Material). Las industrias NORM se caracterizan por, o bien utilizar materia prima que presenta la particularidad de contener concentraciones elevadas de radionucleidos naturales o bien, debido a las características de su proceso de producción, por generar productos comerciales, subproductos o residuos enriquecidos en los mencionados radionucleidos. En ellas, y atendiendo al Real Decreto 783/2001 sobre Protección Sanitaria contra la Radiaciones Ionizantes actualmente vigente en nuestro país (Título VII), se deben realizar los estudios necesarios a fin de determinar si existe un incremento significativo de la exposición, recibida por los trabajadores o los miembros del público, que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica. A la vista de los resultados obtenidos en dichos estudios, el Consejo de Seguridad Nuclear identificará las actividades laborales que deben ser objeto de especial atención y estar sujetas a control, y definirá, en consonancia, aquellas actividades laborales que deban poseer dispositivos adecuados de vigilancia de las exposiciones y, cuando sea necesario, establecerá la aplicación de acciones correctoras destinadas a reducir las exposiciones y la aplicación de medidas de protección radiológica.

La roca fosfática utilizada como materia prima en las plantas de producción de ácido fosfórico de Huelva proviene fundamentalmente de Marruecos y contiene concentraciones de actividad en torno a $1,5 \times 10^3$ Bq/kg de ^{238}U en equilibrio secular con todos sus descendientes [1]. La presencia de estos radionucleidos naturales en los materiales utilizados en esta indus-

tria hace que le sea de aplicación el Título VII del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.

Por otra parte, en el proceso de producción utilizado en las plantas onubenses, el contenido radiactivo originalmente presente en la roca fosfática experimenta un fraccionamiento selectivo. En este sentido, la gran mayoría de los isótopos de uranio experimentan su disolución en el proceso, acompañando por tanto al ácido fosfórico producido, mientras que por el contrario el 90% o más del ^{226}Ra , ^{210}Pb y ^{210}Po (presentes originalmente en la roca fosfática en equilibrio secular con su progenitor, el ^{238}U) terminan asociados al fosfoyeso [1], [2]. En los fosfoyesos generados se encuentran concentraciones de ^{226}Ra , ^{210}Pb y ^{210}Po en torno a los 7×10^2 Bq/kg [3].

Los grupos de investigación “Física de las Radiaciones y Medio Ambiente” (Universidad de Huelva) y “Física Nuclear Aplicada” (Universidad de Sevilla), han llevado a cabo conjuntamente durante el periodo 2004-2007 un proyecto de I+D financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear, en el marco de su plan de acción sobre el control de la exposición debida a la radiación natural titulado “Estudio y evaluación del impacto radiológico producido por diversas industrias no nucleares del sur de España”, cuyo objetivo central ha sido realizar una evaluación detallada del posible incremento de la exposición recibida por los trabajadores o los miembros del público en relación con la producción de ácido fosfórico en las plantas onubenses y la gestión de las grandes cantidades de fosfoyeso almacenadas en sus alrededores

En este artículo se detallan los principales resultados y conclusiones obtenidos en la evaluación radiológica que se ha realizado en relación con la gestión de los fosfoyesos generados, los que se encuentran mayoritariamente apilados en grandes balsas en las inmediaciones de las plan-

tas de producción y a menos de un kilómetro de la ciudad de Huelva (150.000 habitantes).

Evolución histórica de la política de gestión de los fosfoyesos generados. Situación actual de la zona de apilamiento

La producción de ácido fosfórico en las plantas de producción de Huelva comenzó hace 40 años, en 1968, alcanzándose muy rápidamente una generación de prácticamente 3 millones de toneladas de fosfoyeso anuales. Desde los comienzos de su producción y hasta el año 1997, el 20% del fosfoyeso generado era directamente vertido en la desembocadura del río Odiel, mientras que el 80% restante era apilado en grandes balsas, hasta una altura de unos cinco metros, situadas en las marismas cercanas de la desembocadura del río Tinto. A dichas balsas el fosfoyeso era transportado, mediante bombeo, en suspensión al 20% con agua de mar.

En los años 1989 y 1998, a solicitud de la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, el CSN encargó al Ciemat los primeros estudios sobre la situación radiológica derivada del funcionamiento de esta industria.

Como consecuencia del estudio de 1989, el CSN transmitió a la Junta de Andalucía una serie de sugerencias relativas a la gestión de los residuos y a la restauración de las balsas de fosfoyesos, entre las que se encontraba la de atenuación de las emisiones del gas radón (descendiente del ^{226}Ra) mediante un recubrimiento adecuado de los depósitos de fosfoyeso, incluida una posible cubierta superior vegetal y consiguiente repoblación de la zona.

En el estudio realizado posteriormente, en el año 1998, se constató que la restauración de unas 400 Ha de balsas, realizada por la Agencia de Medio Ambiente en el periodo 1991-1993, y la reordenación de vertidos de fosfoyeso iniciada en el año 1997, que implica la anulación de verti-



Figura 1. Fotografía aérea de la zona de las marismas del río Tinto utilizada desde 1968 para el apilamiento de fosfatos.

dos a la ría, había supuesto para la zona una situación radiológica claramente más favorable.

A comienzos de 1998 cambió la política de gestión de los fosfoyesos generados, prohibiéndose los vertidos directos de fosfoyeso al medio marino, por lo que desde entonces el 100% del fosfoyeso generado es transportado para su apilamiento a las marismas de la desembocadura del río Tinto, pero utilizando agua dulce para su transporte en suspensión, y siguiendo esas aguas, tras la decantación del fosfoyeso en las balsas, un ciclo cerrado, retornado a las plantas de producción para su reutilización en el transporte del nuevo fosfoyeso generado. Con esta nueva política de gestión del fosfoyeso se ha minimizado su interacción con el estuario, disminuyendo muy notablemente su impacto en el ecosistema acuático que lo rodea [4]. De forma paralela al cambio en la política de gestión de residuos, desde 1990 se ha procedido a restaurar dos grandes zonas que fueron utilizadas para el apilamiento de fosfoyesos generados antes de 1998, las cuales han sido cubiertas con una capa de suelo sobre residuos inertes, para minimizar su impacto visual y, también, su posible impacto radiológico.

En la actualidad, podemos indicar que la zona de apilamiento de fosfoyesos en las marismas de la desembocadura del río Tinto cubre una extensión de unas 1.200 hectáreas y en ellas se acumulan más de 80 millones de toneladas de fosfoyeso. Algo más del 50% ha sido restaurado por las administraciones autonómicas y locales.

En la figura 1, se muestra una fotografía aérea de la zona utilizada históricamente para el apilamiento de estos fosfoyesos. En ella se han señalado un total de cuatro zonas, cuya suma ocupa las 1.200 hectáreas antes mencionadas. En la mencionada figura se ha marcado también la situación de las plantas de producción de ácido fosfórico y de la ciudad de Huelva.

El *Área 1* se corresponde con la zona más antigua de las balsas de fosfoyesos, formadas con anterioridad al cambio de la política de gestión de residuos. Esta zona ha sido restaurada mediante su recubrimiento con una capa de suelo de unos 40 cm de espesor. Es la que se encuentra más cercana al casco urbano de Huelva y se estima que en su día se ubicaron en ella unos doce millones de toneladas de fosfoyeso.

El *Área 2* es donde se realizan los vertidos desde el cambio de la política de gestión de los fosfoyesos hasta la actualidad. Es la zona que podemos denominar como activa, y está formada por dos balsas para la decantación y almacenamiento de yesos en altura, un pequeño embalse regulador (donde se enfrían las aguas utilizadas para el transporte del fosfoyeso antes de ser reenviadas de nuevo a las plantas de producción) y un canal perimetral para la recogida de filtraciones y lixiviados. Cada una de estas balsas tiene una extensión de 75 Ha y posee unos muros de cerramiento de 10 m de



El impacto radiológico en el público ocasionado por los apilamientos de fosfoyeso se puede evaluar como despreciable o nulo



cota. Se dispone de dos balsas de decantación para que mientras una de ellas se encuentre en operación, la otra permanezca en reserva y sometida a las labores de mantenimiento y ordenación de los vertidos requerida. En dicha zona se está procediendo a un apilamiento en altura de fosfoyesos, para la formación de una estructura piramidal. Actualmente, tal y como se observa en la figu-

ra 2, este apilamiento en altura se encuentra en fase bastante avanzada y de hecho está previsto que en un plazo inferior a cinco años alcance la altura máxima autorizada por la administración (unos 30 m).

El *Área 3* está situada al norte del área 2 y en ella, además de un embalse adicional de regulación de las aguas de las balsas del área 2, existe una zona de balsas desnudas de fosfoyeso donde este sub-producto se acumuló con anterioridad a 1997 hasta una altura de 5-8 metros. Estas balsas están totalmente inactivas y no existe en la actualidad ningún plan a corto plazo para su restauración

Finalmente, el *Área 4* es la zona más al norte de las plantas de producción, y en ella recientemente se han finalizado las labores de restauración, pues los terrenos inicialmente ocupados por fosfoyeso han sido cubiertos con diferentes residuos y finalmente recubiertos con una capa de suelo. Esta zona, así como la zona 1, también restaurada, han sido o están siendo revegetadas.

Tras la restauración de las zonas previamente mencionadas y el cambio radical en la gestión de los fosfoyesos llevada a cabo hace 10 años, el impacto radiológico de estos apilamientos en la ría del Tinto ha disminuido muy notablemente, hasta valores prácticamente naturales. La desembocadura del río Tinto sólo se ve ahora afectada por pequeñas lixiviaciones procedentes fundamentalmente de la balsa inactiva situada en el área que hemos denominado como área 3. Valores inferiores a 100 Bq/kg de ²²⁶Ra se encuentran actualmente en sedimentos superficiales tomados en el río Tinto frente a la zona de apilamiento [5], los cuales son claramente inferiores a los que se encontraban en la misma área, antes del cambio en la política de gestión de residuos y de la restauración parcial de la zona de apilamiento [6]. Obviamente, esta clara disminución está íntimamente ligada con el hecho de que desde la balsa actualmente activa (en operación) no se



Figura 2. Fotografía aérea [realizada a finales de 2005] de la zona actual de apilamiento de fosfoyesos (área 2). En la fotografía se han marcado las dos balsas de decantación [1], el embalse regulador [2], el canal perimetral [3], la ciudad de Huelva [4] y la localización de la estación de bombeo [5], desde donde se impulsa el retorno de las aguas utilizadas en el transporte del fosfoyeso a las plantas de producción. Se observa también en la fotografía como está creciendo al apilamiento en altura, hasta la obtención de una balsa piramidal, y como los taludes se están recubriendo con una capa de suelo como paso previo de la restauración final de la zona.

estén produciendo lixiviaciones a la ría, pues el transporte del fosfoyeso siguiendo un circuito cerrado, y la existencia de un canal perimetral rodeando a la balsa activa, evitan su interacción con el medioambiente de su entorno.

Evaluación radiológica

En las 1.200 hectáreas utilizadas para el apilamiento de fosfoyesos, desarrollan su actividad laboral un conjunto de trabajadores, que se puede dividir en dos grandes grupos: el dedicado al mantenimiento y revegetación de las zonas restauradas, y el dedicado a la reordenación de los fosfoyesos que actualmente están siendo transportados a la balsa activa para su apilamiento en altura.

Pues bien, atendiendo a las actividades laborales realizadas en la zona, a las características de los apilamientos, y los ra-

dionucleidos contenidos en ellos, se han considerado tres vías posibles de impacto radiológico sobre los trabajadores que desempeñan su labor en la zona: impacto por irradiación externa, por inhalación de material particulado resuspendido desde las balsas y por inhalación del ^{222}Rn exhalado desde las balsas. Otras vías de impacto (ingestión y contaminación de la piel) no fueron analizadas al considerarse despreciables.

Los estudios dosimétricos se comenzaron mediante la realización de un conjunto de determinaciones de las tasas de dosis absorbida por irradiación externa en las áreas restauradas 1 y 4. Los resultados obtenidos indican que los valores de la componente terrestre de la tasa de dosis por irradiación externa obtenidos en las áreas restauradas no sobrepasan el valor de fondo determinado en zonas no perturbadas

y no afectadas por deposición de residuos de la zona, gracias a la eficacia del blindaje ejercido por la capa de suelo y la vegetación utilizada en la restauración.

De forma prácticamente simultánea se realizaron determinaciones de las tasas de dosis absorbida por irradiación externa en las áreas no restauradas 2 y 3 (“balsas desnudas”), donde el fosfoyeso no se encuentra recubierto o blindado por ninguna capa de suelo o residuo. En particular, en el área 2 se realizaron diversas determinaciones a lo largo del camino que rodea a las balsas de apilamiento y en diversas zonas accesibles de éstas. Los incrementos obtenidos respecto al valor de fondo ($0,10 \mu\text{Sv/h}$) fueron convertidos en dosis efectivas mediante la estimación del nivel de ocupación o número de horas anuales que dedican los trabajadores a realizar las labores de mantenimiento y conservación de las balsas (atendiendo a la información facilitada por los gestores de Fertiberia-Huelva, ese tiempo se puede estimar en unas 800 horas anuales), obteniéndose los resultados recopilados en la tabla 1. Se obtuvieron dosis efectivas anuales por irradiación externa recibidas por los trabajadores en el rango $0,08 - 0,24 \text{ mSv/año}$.

Por otra parte, las dosis efectivas anuales por irradiación externa determinadas en el área 3 (balsa desnuda e inactiva de fosfoyeso) fueron similares a las determinadas en la zona 2. Si bien los valores de las tasas de dosis absorbidas por irradiación externa en el área 3 fueron algo superiores a los determinados en el área 2 (debido fundamentalmente a la acción de blindaje que en las balsas actualmente activas ejerce el agua utilizada para el transporte del fosfoyeso desde la fábrica a la zona de apilamiento), se ven contrarrestadas con unos factores de ocupación claramente inferiores.

Es de mencionar que para la determinación de las tasas de dosis efectivas por irradiación externa, las cuatro áreas en estudio fueron divididas en cuadrículas y se realizaron más de un centenar de

medidas experimentales *in situ*, distribuidas de forma aleatoria. Por otra parte, los resultados experimentales en las cuatro áreas ratifican un modelo dosimétrico de cálculo realizado por el grupo de Física de las Radiaciones de la Universidad de Huelva, el que ha sido validado por diversos caminos [2], [7].

Para la aplicación de dicho modelo dosimétrico se determinó el contenido en radionucleidos naturales en más de un centenar de muestras de fosfoyesos colectadas de forma aleatoria en las cuatro áreas y en unas treinta muestras de los suelos o material de relleno que cubren los fosfoyesos en las zonas restauradas: para su medida, se utilizaron técnicas radiométricas que permitieran la determinación de los radionucleidos de la serie del uranio con la mayor sensibilidad posible; las espectrometrías alfa y gamma, principalmente. Simplemente como valores informativos, en la tabla 2 recopilamos los valores medios obtenidos para las concentraciones de actividad de diversos radionucleidos de interés (^{226}Ra , isótopos de uranio y ^{210}Po) en muestras superficiales de fosfoyeso analizadas del área 3.

De forma independiente, y para evaluar el posible impacto asociado a la inhalación de ^{222}Rn (elemento radiactivo gaseoso descendiente del ^{226}Ra) exhalado desde las balsas, se procedió a la determinación de las concentraciones de este radionucleido sobre el área 2 (balsas actualmente activas), mediante medidas continuadas en el tiempo, que se extendieron durante más de seis meses, para poder evaluar las posibles fluctuaciones tanto diarias como estacionales que se pudieran producir. Los valores obtenidos nos indican que las concentraciones de ^{222}Rn sobre las balsas “desnudas” son indiscernibles de los valores de fondo esperables en la zona; se obtuvo un valor medio sobre las balsas no cubiertas de 15 Bq/m^3 , con un rango de valores medios mensuales $8\text{-}20 \text{ Bq/m}^3$, mientras que el va-

Tabla 1. Incremento de la dosis efectiva anual por irradiación externa en diversas localizaciones del área dedicada al apilamiento actual de los fosfoyesos (área 2)

Punto de muestreo	Incremento tasa de dosis efectiva (mSv/año) sobre fondo	Punto de muestreo	Incremento tasa de dosis efectiva (mSv/año) sobre fondo
1	0,24	10	0,11
2	0,11	11	0,11
3	0,10	12	0,10
4	0,19	13	0,13
5	0,12	14	0,13
6	0,12	15	0,12
7	0,15	16	0,14
8	0,10	17	0,11
9	0,14	18	0,08

lor de fondo a unos 30 km de las balsas y en la costa fue de 13 Bq/m^3 .

Estas bajas concentraciones de ^{222}Rn no deben considerarse como sorprendentes, y pueden explicarse por el fuerte efecto de dilución del radón exhalado desde las balsas en las masas de aire, así como por el régimen de brisas que domina la zona costera donde se encuentran ubicadas. Ello hace despreciable su posible impacto radiológico sobre los trabajadores que realizan su labor en el entorno de las balsas y sobre el público que vive en sus cercanías.

Finalmente indicaremos que para evaluar la vía de impacto por inhalación de material particulado resuspendido desde las balsas, se procedió a la determinación del contenido de radionucleidos naturales en muestras de aerosoles colectadas durante más de seis meses en la balsa activa (área 2), utilizando para ello sistemas de alto flujo de filtración de aire. A partir del análisis y determinación del contenido isotópico radiactivo de estos aerosoles, ha sido posible evaluar que la dosis que pueden recibir los trabajadores por la vía inhalación de material particulado procedente de las balsas no sobrepasa los $10 \mu\text{Sv/año}$ [8]. Esta evaluación es, por otra parte, concordante con la realizada mediante modelización por el

OIEA, la cual utiliza balsas de fosfoyesos desnudas con concentraciones de radionucleidos naturales muy similares a las presentes en las balsas onubenses [9].

En este sentido, es necesario remarcar las muy bajas concentraciones máxicas de material resuspendido desde las balsas desnudas (áreas 2 y 3). En el caso de la balsa activa (área 2), se debe fundamentalmente a que la gran mayoría del yeso apilado está cubierto por agua, lo que inhibe totalmente su resuspensión, mientras que en el caso del área 3, esta resuspensión se ve grandemente inhibida por la formación durante el secado de las balsas de una costra superficial dura y compacta que adicionalmente inhibe parcialmente la exhalación de radón.

El impacto radiológico en el público, ocasionado por los apilamientos de fosfoyeso se puede evaluar también como despreciable o nulo. Los valores de las tasas de dosis por irradiación externa en la ciudad de Huelva se corresponden con valores de fondo y los valores de ^{222}Rn en la ciudad no se ven obviamente afectados por las emanaciones desde las balsas, a la vista de los resultados obtenidos sobre ellas. El acceso además a las balsas desnudas está restringido, y el nivel de ocupación por el

Tabla 2. Valores medios de las concentraciones de ^{234}U , ^{238}U , ^{210}Po y ^{226}Ra y del cociente de actividades $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ en la balsa de fosfoyeso inactiva (área3)

^{234}U (Bq/Kg)	^{238}U (Bq/Kg)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	^{210}Po (Bq/Kg)	^{226}Ra (Bq/Kg)
$\approx 170 \pm 110$	170 ± 110	$0,97 \pm 0,03$	660 ± 110	720 ± 200

público de las zonas restauradas es prácticamente nulo. Podría finalmente pensarse en vías de impacto indirectas (como ingestión de pescado y/o marisco colectado en la ría), pero los incrementos de dosis susceptibles de ser recibidos a través de ellas también serían despreciables. Basta para ello tener en cuenta que mediante esta vía indirecta de ingestión, antes del cambio en la política de gestión de residuos, y cuando la ría presentaba una clara contaminación radiactiva por los vertidos directos y las lixiviaciones de las balsas, se evaluó de una forma muy conservativa que la dosis por ingestión susceptible de ser recibida por el grupo crítico de consumidores era inferior a $60 \mu\text{Sv/año}$ [10].

Conclusiones


En función de los resultados obtenidos en la evaluación radiológica realizada, y resu-

lida en los párrafos anteriores, se puede concluir lo siguiente:

—El impacto radiológico ocupacional asociado a las actividades laborales llevadas a cabo en relación con la gestión, almacenamiento en balsas y mantenimiento del fosfoyeso generado en las fábricas de producción de ácido fosfórico (balsas desnudas, áreas 2 y 3), es muy limitado, encontrándose el incremento de las dosis efectivas susceptibles de ser recibidas por los trabajadores considerando todas las vías de exposición por debajo de 1 mSv/año , límite de dosis para los miembros del público. En este sentido los incrementos en las dosis efectivas susceptibles de ser recibidas por los trabajadores vía irradiación externa, no superan los $0,30 \text{ mSv/año}$; incluso bajo hipótesis conservadoras, el incremento de las dosis efectivas por inhalación de material particulado, susceptibles de ser recibidas por

estos trabajadores, no sobrepasa los $10 \mu\text{Sv/año}$, y las concentraciones de ^{222}Rn sobre las balsas de fosfoyeso y en su entorno son bastante bajas e indiscernibles de los valores de fondo obtenidos en ambientes costeros ($15\text{-}30 \text{ Bq/m}^3$).

—El impacto radiológico ocupacional asociado a las actividades laborales llevadas a cabo en relación con el mantenimiento de las balsas restauradas (áreas 1 y 4) se puede estimar prácticamente como nulo. A la vista de los resultados obtenidos en la evaluación realizada en las balsas desnudas, la única posible vía de impacto que necesitaría ser evaluada es la vía por irradiación externa. Las medidas experimentales realizadas indican que las cubiertas de suelo y/o residuos inertes ejercen de perfecto blindaje de la radiación emitida por los fosfoyesos, obteniéndose valores indiscernibles de los valores de fondo para la tasa de dosis por irradiación externa.

—El impacto radiológico en el público, ocasionado por los apilamientos de fosfoyeso se puede evaluar también como despreciable o nulo. Los valores de las tasas de dosis por irradiación externa así como las concentraciones de ^{222}Rn en la ciudad de Huelva se corresponden con valores de fondo. 

Referencias

- [1] J. P. Bolívar, R. García-Tenorio y M. García-León. "On the fractionation of natural radioactivity in the production of phosphoric acid by the wet acid method". *Journal of Radioanal. and Nucl. Chem. Letters* 214 (1996) 77-88
- [2] J. P. Bolívar, R. García-Tenorio y J. L. Mas. "Radioactivity of phosphogypsum in the South-West of Spain". *Radiation Protection Dosimetry* 76 (1998) 185-189
- [3] J. L. Más, E. G. San Miguel, J. P. Bolívar, F. Vaca y J. P. Pérez. "An assay on the effect of preliminary restoration tasks applied to a large TENORM wastes disposal in the south-west of Spain". *Science of the total Environment* 364 (2006) 55-66.
- [4] M. Villa, A. Absi, G. Manjón, H. P. Moreno, R. García-Tenorio y R. Periañez. "Natural restoration of a spanish estuary affected by anthropogenic input of NORM". En el libro: *Natural Occurring Radioactive Materials (NORM IV)* IAEA-TECDOC 1472, IAEA, Viena.
- [5] J. Mantero, A. Calleja J. L. Más, S. Hurtado, G. Manjón, R. García-Tenorio y M. García-León. "Natural Radioactivity and Trace Elements in the Huelva estuary". Contribución al *Vth International Workshop on Natural Radiation and Environment*, Valladolid, July 2006.
- [6] M. García-León, A. Martínez-Aguirre, R. Periañez, J. P. Bolívar y R. García-Tenorio. "Levels and behaviour of natural radioactivity in the vicinity of phosphate fertilizers industries". *J. Radioanal and Nucl. Chem.* 197 (1995) 174-184.
- [7] J. L. Más, J. P. Bolívar, R. García-Tenorio, J. L. Aguado, E. G. San Miguel and J. González. "A dosimetric model for determining the effectiveness of soil covers for phosphogypsum waste piles". *Health Physics* 80 (2001) 34-40.
- [8] E. Borrego, J. L. Más, J. E. Martín, J. P. Bolívar y F. Vaca. "Radioactivity levels in aerosols particles surrounding a large TENORM waste repository after application of preliminary restoration tasks". *Science of the Total Environment* 377 (2007) 27-35.
- [9] "Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials". *IAEA Safety Reports Series* No 49, 2007, IAEA, Viena.
- [10] D. Cancio, J. Gutierrez, J. C. Saez y J. Palomares. *Revisión de la situación radiológica en la zona de vertidos de la industria de fosfatos en Huelva*. Informe del Ciemat para el CSN, 1998.