



Informe Técnico sobre la idoneidad del proyecto RESTORE 20/30 como solución al problema de las Balsas de fosfoyeso y para la recuperación de las Marismas del estuario del río Tinto

Índice

Resumen ejecutivo	2
1.- Introducción	4
2.- Objeto del Informe	6
3.- Descripción de las balsas de fosfoyeso	
3.1.- Geología de subsuelo	7
3.2.- Hidrogeología y calidad del agua	11
3.3.- Evaluación radiológica	18
3.4.- Calidad del aire	20
3.5.- Impacto ecológico	22
3.6.- Impacto en la salud pública	23
4.- Análisis y revisión del proyecto de Fertiberia	
4.1.- Respecto de la geología de subsuelo	30
4.2.- Respecto de la hidrogeología y la calidad del agua	32
4.3.- Respecto de la evaluación radiológica	35
4.4.- Respecto de la calidad del aire	37
4.5.- Respecto del impacto ecológico	39
4.6.- Respecto del impacto en la salud pública	40
5.- Conclusiones y recomendaciones	43
6.- Anexos y referencias	48

El presente informe se nutre de los resultados de las investigaciones desarrolladas por seis grupos de trabajo diferentes en la última década, cada uno de ellos dedicado a uno de los 6 aspectos técnicos desde los que se ha abordado el análisis y escrutinio del problema. La responsabilidad científica de los resultados y conclusiones técnicas de cada uno de los apartados corresponde a dichos equipos. La redacción de este informe ha sido coordinada por el Prof. José Rodríguez Quintero, en calidad de Vicerrector de Investigación y Transferencia de la Universidad de Huelva y, a la sazón, Presidente del Comité de expertos para el diagnóstico ambiental de la balsa de fosfoyesos constituido en la Universidad; y ha contado con el asesoramiento de la Dra. María del Carmen Nuñez Lozano, en su calidad de jurista (Derecho Administrativo). Los equipos de investigadores referidos, que forman o han formado parte del Comité a lo largo de la última década, son los siguientes: Dr. José Miguel Azañón Hernández, Dr. José Borrego Flores, Dra. Berta María Carro Flores, (geología de subsuelo); Dr. José Miguel Nieto Liñán, Dr. Manuel Olías Álvarez, Dr. Rafael Pérez López, Dr. Enric Vázquez Suñé (hidrogeología y calidad del agua); Dr. Juan Pedro Bolívar Raya (evaluación radiológica); Dr. Xavier Querol Carceller, Dr. Jesús de la Rosa Díaz, Dra. Ana María Sánchez de la Campa Verdone (calidad del aire); Dr. Jesús Manuel Castillo Segura, Dr. Manuel Contreras Llanes (impacto ecológico); Dra. Piedad Martín-Olmedo, Dr. Roberto Lorenzo Rodríguez-Pacheco, Dr. José Andrés Domínguez Gómez, Dra. Liudmila Liutsko, Dra Roser Sala, Dr. Juan Alguacil Ojeda (impacto en la salud pública).

Resumen ejecutivo

La primera reflexión, previa a cualquier análisis más detallado, nos lleva a constatar la necesidad, derivada del riesgo inherente al apilamiento de residuos de fosfoyeso, de una intervención en el plazo más inmediato posible en las balsas de fosfoyeso que son objeto del presente informe. En ese sentido, se entiende que esa y no otra es la finalidad del proyecto de Fertiberia RESTORE 20/30. Por tanto, debe valorarse positivamente el esfuerzo de la empresa por asumir y abordar el problema, cristalizando este esfuerzo en el mencionado proyecto que constituye una mejora sustancial respecto de la situación actual, pero que en ningún caso puede ser aceptada como una solución definitiva para la restauración y recuperación de la Marisma afectada. Por lo tanto, garantizada esta intervención, las administraciones competentes, y aquellos que mantengan la responsabilidad legal sobre el vertido deben comprometerse, en lo que concierne estrictamente a las balsas y sin perjuicio de otras medidas, a (i) monitorizar la evolución de las balsas de fosfoyeso intervenidas; y (ii) buscar una solución viable que reduzca al mínimo posible el riesgo futuro derivado de las mismas, como podría ser la valorización del fosfoyeso almacenado en diferentes aplicaciones.

Apuntado todo lo anterior, el presente informe se centra en el análisis y revisión del proyecto RESTORE 20/30, partiendo de la descripción de la situación actual de las balsas, con objeto de poner de manifiesto las debilidades detectadas, descontando la necesidad, oportunidad y virtudes del mismo. A tal efecto, debe señalarse que los objetivos de todo proyecto de ingeniería para el cierre de un depósito de residuos peligrosos como las presas o balsas de fosfoyesos que nos ocupan son:

1. Garantizar la estabilidad física (geotecnia): resistencia;
2. Garantizar la sellado de la estructura para evitar el flujo de contaminantes al medioambiente y a la población; y
3. La obra debe conseguir que las deformaciones sean aceptables, sin que se rompa la estructura.

Considerando estos tres objetivos se puede plantear que el proyecto de Fertiberia RESTORE 20/30 no da respuesta adecuada a los mismos debido a que parte de un modelo conceptual de funcionamiento hidromecánico de las balsas de fosfoyeso que es incompleto por las siguientes razones (puntos 1, 2, 3, 4, ver mayor detalles en los anexos):

1. La caracterización geológica de los materiales de la cimentación y base de las balsas presentadas por Fertiberia es incompleta.
2. El modelo de funcionamiento hidrogeológico del sistema presentado por Fertiberia es incompleto, pues no establece con claridad la relación entre las aguas subterráneas, superficiales y la balsa de fosfoyesos. Además no quedan bien definidas las unidades hidrogeológicas (Figura 3.8).
3. Con el proyecto de cierre presentado por Fertiberia no se evita el flujo y transporte de contaminantes hacia el medio ambiente, debido a la existencia de una conexión hidráulica entre las balsas, las corrientes de aguas superficiales y las aguas subterráneas como lo demuestran los diferentes estudios realizados (Anexos 6.2).
4. Si el cálculo de estabilidad geotécnica presentado por Fertiberia en su proyecto no considera: a) una correcta caracterización de los materiales de la cimentación, b) un modelo hidrogeológico correcto, c) la magnitud de las deformaciones y d) un estudio sísmico propio para el sitio que permita determinar los valores correctos de la aceleración de la gravedad, entonces hay que revisar estos cálculos considerando el nuevo escenario para las condiciones normales, accidentales y extremas establecidas en el *Real Decreto 264/2021 sobre Normas Técnicas de*

Seguridad para las Presas y sus Embalses . Aunque este Real Decreto es posterior al proyecto recoge la esencia de los anteriores y suple las carencias del factor de seguridad que no están definidas en el Real Decreto 975/2009 de los residuos de la industria extractiva.

5. El proyecto presentado por Fertiberia no considera los escenarios del cambio climático en las diferentes hipótesis de cálculo de los factores de seguridad.
6. El proyecto presentado por Fertiberia no establece medidas compensatorias a las zonas afectadas y la creación de nuevas marismas.
7. El proyecto presentado por Fertiberia no evalúa el impacto de la bioacumulación de tóxicos en la población, ni sus posibles consecuencias en base a un estudio de dispersión específico para los tóxicos más relevantes para la salud humana.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se considera que entre el conjunto de actuaciones que se deben desarrollar de inmediato se encuentran:

1. Eliminar las salidas de borde con el objetivo de evitar el vertido de sustancias contaminantes al medio ambiente, y verificar estas con el modelo hidrogeológico. Aunque el proyecto considera un muro lateral de un metro este no es suficiente en aquellos casos donde los canales mareales tengan mayor profundidad, osea este se debe desarrollar según las características de cada una de las salidas de borde conocidas y las que aparecerán cuando se comience la obra.
2. Estabilizar geotécnicamente las balsas para verificar si el proceso de consolidación de las mismas se ralentiza o detiene pues en el proyecto no queda determinada la causa de las mismas. Hay que señalar que estas balsas o mejor dicho presas de fosfoyesos no presentan diques o muros de contención que encierren la masa de fosfoyesos. Estas están construidas por los propios fosfoyesos los cuales según los datos obtenidos presentan enormes deformaciones, tasas de consolidación que no muestran signos de estabilización, estructuras de disolución, etc (Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6).
3. La estabilización geotécnica debe realizarse primeramente en todo el perímetro de las balsas antes de realizar alguna actuación sobre la superficie de las mismas.
4. Mantener el monitoreo espacio-temporal de la consolidación y las salidas de borde.
5. Mientras tanto trabajar en la búsqueda de una solución alternativa al proyecto de Fertiberia que proporcione una recuperación real de las zonas afectadas.
6. Reducir las inquietudes y preocupación de la población con una comunicación transparente y permanente sobre la situación actual y futura de las balsas de fosfoyeso. Esto incluye permitir a la ciudadanía participar en la toma de decisiones relevantes del proyecto. Tener acceso a los estudios de evidencia. Así como, mejorar la comunicación de riesgos y medidas de prevención a la población.

1. Introducción

Dentro del complejo de industrias químicas y petroquímicas, instaladas a finales de los años 60 en el entorno geográfico del sistema estuarino constituido por la confluencia de los ríos Tinto y Odiel (Fig. 1.1), varias centraron su actividad en la producción de ácido fosfórico para fertilizantes. El proceso industrial para la obtención de estos fertilizantes generaba un residuo denominado *fosfoyeso*, que se compone principalmente de yeso (95%) suplementado por una fracción residual de ácidos libres: fosfórico y, en menor medida, sulfúrico y fluorhídrico. Dichas fracciones existentes en el fosfoyeso, hacen de él un agente ácido; siendo además especialmente relevante la presencia en el fosfórico de elevadas concentraciones de contaminantes móviles procedentes de la roca fosfatada original.



Figura 1.1.- Localización geográfica de la balsa de fosfoyesos.

El fosfoyeso producido en Huelva se ha ido almacenando en enormes balsas que, actualmente, acumulan unos 100 millones de toneladas y ocupan una extensión de 1200 ha, dispuestas sobre las marismas del margen derecho del Río Tinto, a menos de 300 m de la ciudad de Huelva (Fig. 1). Las balsas se encuentran apoyadas directamente sobre suelo desnudo de marisma, sin ningún tipo de aislamiento, existiendo salidas de aguas ácidas que descargan directamente en el entorno estuarino.

Las balsas contienen además otros residuos industriales, entre los que cabe destacar: fosfoyesos negros, ilmenita inatacada, cenizas de tostación de pirita, yesos rojos, polvos de electrofiltros industriales, material residual contaminado con el isótopo radiactivo Cesio-137 y residuos industriales procedentes de una planta de inertización. Las balsas han provocado un notable deterioro ambiental en esta zona de marismas. Al mismo tiempo y a pesar de ello, marismas similares aunque asociadas al estuario del río Odiel fueron declaradas Reserva de la Biosfera por la UNESCO en 1983, siendo catalogadas como humedal de alto valor ecológico en el convenio RAMSAR-NATURA en 1989. La Audiencia Nacional acordó el cese definitivo de los vertidos a 31 de diciembre de 2010.

Desde el comienzo de la actividad industrial en 1968 hasta su cese en 2010, aproximadamente se han producido 2.5 millones de toneladas de fosfoyeso cada año. Hasta 1997, el residuo era transportado y depositado en la zona de acopio usando agua de mar en un sistema abierto. El sobrenadante de la decantación junto con un 20% del fosfoyeso se vertía directamente sin control ni tratamiento al estuario. Las descargas directas de fosfoyeso o de agua relacionada con

el proceso industrial al Estuario de Huelva afectan gravemente a la calidad del agua y de los sedimentos. La autorización de vertido otorgada a Fertiberia por resolución de la Dirección General de Protección Ambiental de la Consejería de Medio Ambiente, de 12 de diciembre de 1995, contempló la realización del vertido con arreglo al “Proyecto de Reordenación de Vertidos de Yeso en la Marisma del Rincón (Huelva)”, presentado por Fertiberia S.L. y Foret S.A. en febrero de 1995. . Ese proyecto, aprobado a finales de 1996, incluía dos mejoras para minimizar los impactos sobre el estuario; por un lado, el apilamiento concentrado en una gran pila piramidal de fosfoyesos sobre una única parcela ya utilizada previamente (zona 2) y, por otro lado, la utilización de un sistema cerrado de agua dulce, en lugar de agua salada, para el transporte y decantación del fosfoyeso. El sistema cerrado de circulación de aguas, conocidas como *aguas de proceso*, incluye embalses centrales sobre las pilas para almacenar el agua de proceso y una serie de canales perimetrales para recoger todos los lixiviados procedentes de las pilas e incorporarlos al circuito cerrado.

La balsa de fosfoyesos se divide en cuatro zonas (Fig. 1.2). Las zonas 1 y 4 se encuentran recubiertas por una capa de suelo natural sobre el fosfoyeso; mientras que las zonas 2 y 3 se hallan sin restaurar, permaneciendo el fosfoyeso desnudo y expuesto a procesos de meteorización. La zona 2 corresponde a una gran pila piramidal de fosfoyeso, de hasta 30 m, generada a partir de 1997 como consecuencia del referido proyecto. En ella, se observa un embalse central con agua de proceso y un conjunto de canales perimetrales para recoger los lixiviados ácidos. La zona 3 es un sector donde el depósito del fosfoyeso tuvo lugar con anterioridad al Proyecto de Reordenación de Vertidos.. Posteriormente, esta zona fue utilizada para embalsar agua de proceso en otro embalse central.

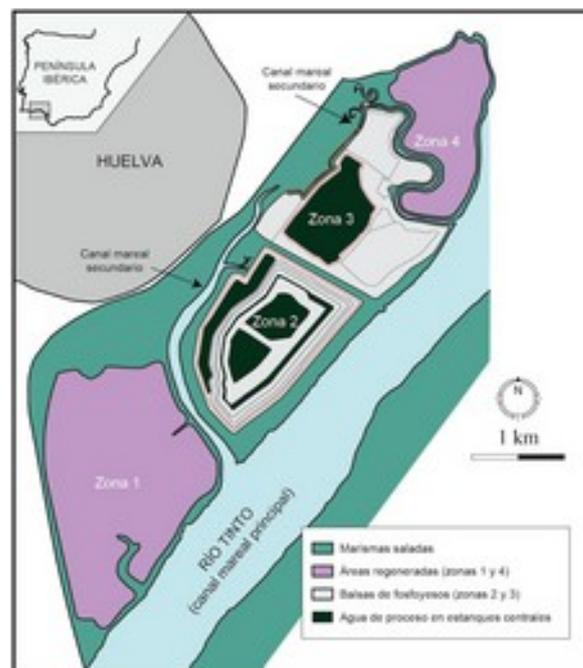


Figura 1.2.- Mapa de la situación de la balsa y su división en zonas de vertido (a partir del año 2010 se secaron los estanques centrales de la zona 2).

En un informe técnico de la Junta de Andalucía en 2009 se indican algunas directrices para la futura recuperación de las zonas 2 y 3. Estas actuaciones incluían las siguientes acciones prioritarias: (i) Eliminar urgentemente el agua de proceso tanto de los embalses centrales como de los canales perimetrales, (ii) Bombear y eliminar el agua de poro para prevenir las salidas de borde que alcanzan el medio ambiente estuarino, (iii) Tratar ex situ el agua en un sistema de tratamiento, y (iv) Cubrir la superficie del fosfoyeso mediante el uso de suelos naturales con sistemas de drenajes para facilitar la evacuación del agua de lluvia. El mencionado informe

técnico indicaba que el agua de proceso es la principal vía de dispersión de contaminantes al medio ambiente ya que su infiltración desde la superficie al agua subterránea es la causa directa de las salidas de borde que llegan al estuario. Así, en los planes futuros de restauración, las zonas 1 y 4 se consideraban ya restauradas ya que tienen una cubierta de tierra vegetal sobre el fosfoyeso y no presentan agua de proceso ni en embalses superficiales ni en canales perimetrales. Sin embargo, como se comenta en el apartado 3.2 en estas zonas se siguen generando salidas de aguas contaminantes que alcanzan el estuario.

2.- Objeto del informe

El objeto de este informe es la revisión y análisis del Proyecto de Fertiberia S.A. «Clausura de las balsas de fosfoyesos en el término municipal de Huelva». El Proyecto que se informa trae causa de la declaración de caducidad efectuada por Orden del Ministerio de Medio Ambiente de 27 de noviembre de 2003, atinente a la concesión C-785 (expediente unificado de las concesiones C-469 y C-470) otorgada a Fertiberia S.A. para depósitos de decantación para el vertido de yesos. La declaración de caducidad de la concesión vino motivada por diversos incumplimientos de Fertiberia, S.A., entre ellos la superación de los espesores máximos de yeso depositados, la falta de cumplimentación de los planes quinquenales de relleno previstos en el título concesional, la inejecución del tratamiento superficial de acabado previsto y la falta de reversión al Estado de las superficies ya tratadas. Recurrida la declaración de caducidad, la sentencia de la Audiencia Nacional de 27 junio de 2007 desestimó el recurso y confirmó la validez de la Orden ministerial.

La declaración de caducidad de la concesión comporta la obligación de proceder a la regeneración ambiental de los terrenos. Para el cumplimiento de la obligación referida, Fertiberia ha elaborado el Proyecto que es objeto de este informe. Dadas las características de las actuaciones pretendidas, su efectiva ejecución precisa contar, entre otros pronunciamientos, con autorización ambiental integrada, de competencia de la Junta de Andalucía. En el momento en que se emite este informe, la solicitud de autorización ambiental integrada presentada por Fertiberia no ha sido aún resuelta.

El presente informe describe brevemente, en primer lugar, la naturaleza y estado presente de la balsa de fosfoyesos cuya regeneración ambiental es abordada por el Proyecto de Fertiberia. Y lo hará desde el análisis de cinco aspectos fundamentales, como son la *Geología de Subsuelo*, la *Hidrogeología y Calidad del Agua*, la *Evaluación Radiológica*, la *Calidad del Aire* y el *Impacto Ecológico*, que resultan de importancia capital por las consecuencias y el *Impacto sobre la Salud Pública* en el ámbito geográfico local que de ellos se derivan. El estudio de este impacto sobre la salud pública constituirá un último apartado de esta breve descripción. Sobre la base de esta descripción, se revisará el Proyecto de Fertiberia, incidiendo sobre los principales aspectos del mismo en cada uno de los apartados anteriormente indicados, señalando las principales debilidades encontradas en el mismo, de las que se derivarán las conclusiones y recomendaciones que son el objeto último del informe.

3.- Descripción de las balsas de fosfoyeso

3.1.- Geología de subsuelo

3.1.1.- Marco Geológico.

Las balsas y apilamientos de fosfoyesos se localizan en las denominadas marismas del Rincón, que forman parte de los sistemas sedimentarios intermareales de la margen derecha del Estuario del Río Tinto. Constituido por un conjunto de unidades sedimentarias cuaternarias de origen estuarino y depositadas en los últimos 9000 años durante el final de la denominada Transgresión Flandriense. Los materiales que forman el relleno sedimentario estuarino están compuestos por un conjunto alternante de capas de arcillas fangosas, fangos arenosos y cuerpos arenosos en forma canalizada y en todos los casos sobresaturados de agua; e inclinadas en dirección este. Estas unidades se disponen sobre un sustrato de edad Neógena y de composición margosa (Figura 3.1).

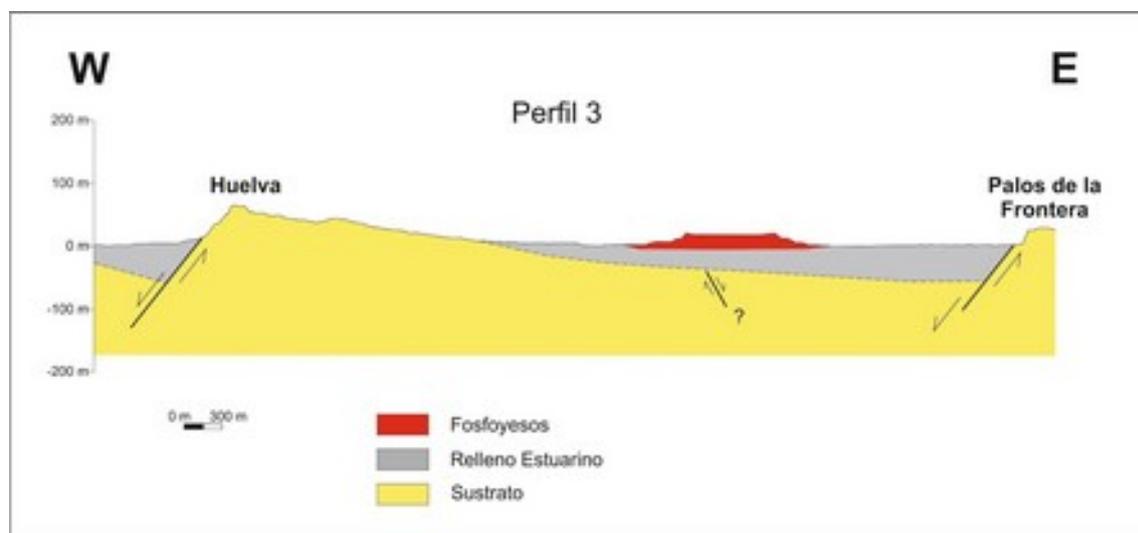


Figura 3.1.- Esquema Geológico simplificado de la posición que ocupan las Balsas.

Los apilamientos alcanzan en algunas zonas espesores superiores a los 25 metros, originando sobrepresiones de más de 40 Tm/m^2 . Esta sobrepresión origina un enorme desequilibrio en la velocidad de acomodación del sustrato por presión litostática. Estas condiciones de apilamiento originan numerosos efectos negativos sobre el sustrato que los soporta y su entornó perimetral.

3.1.2.- Deformaciones del Sustrato Sedimentario.

A partir del estudio de los registros sísmicos del área perimetral de la zona 2 se identificaron estructuras de deformación en las que se diferencian dos tipos principalmente: *escapes de fangos* y *domos*. Los primeros representan deformaciones de menor escala y su presencia es más frecuente en el sector noreste del margen de la zona 2 de las balsas. Los domos son estructuras de deformación de mayor escala, que pueden alcanzar hasta los 100 m en superficie y más de 4 de espesor. Muestran una evolución en su desarrollo, desde domos profundos hasta domos con expresión en superficie que forman grandes estructuras diapíricas y que pueden superar los 300 metros de extensión. Estas estructuras se identifican como grandes abultamientos en el fondo del canal, concentrándose en el sector apical de la zona 2 de los apilamientos y representa el mayor grado de evolución de deformación. La principal consecuencia de la presencia y

disposición de estas estructuras, tal y como se ha determinado en estudios previos, es el proceso de erosión diferencial en el entorno de la balsa. Este proceso es más intenso en aquellos sectores donde los procesos de elevación por sobrepresión son de mayor intensidad, es decir, donde aparecen estructuras de mayor grado evolutivo (Figura 3.2). Estas estructuras de deformación formadas por sobrepresión se identifican y clasifican en los informes I y II presentados por el comité de Expertos (Anexo I y II).

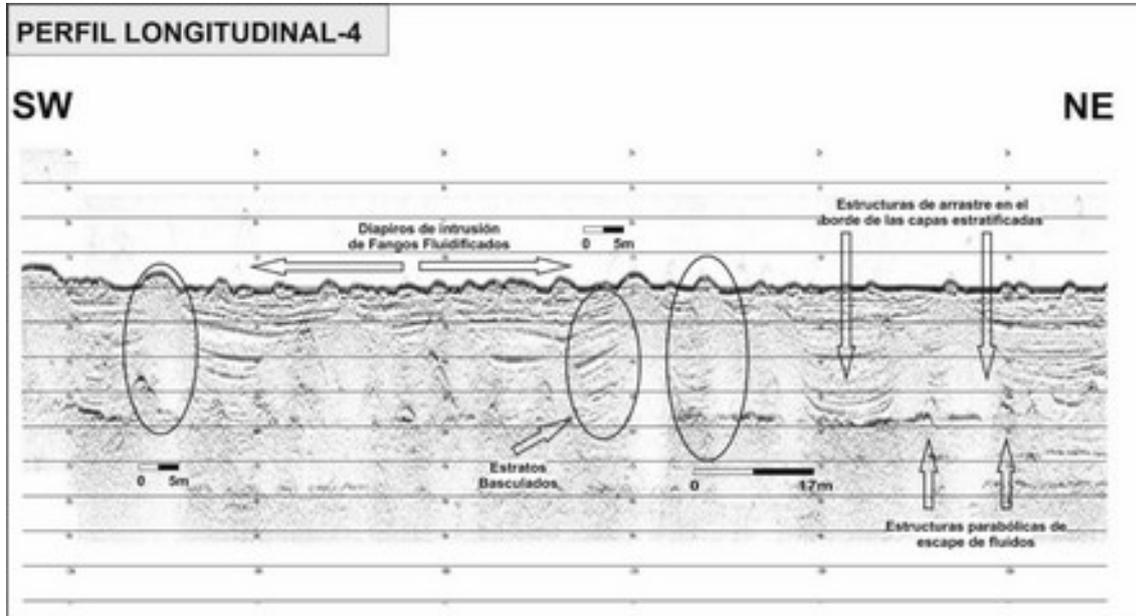


Figura 3.2.- Diversas estructuras de deformación del soporte fango-limo-arenoso en la zona perimetral del apilamiento de la Zona 2.

3.1.3.- Subsistencia y Hundimiento del apilamiento de la Zona 2.

El análisis del hundimiento de la Zona de apilamiento 2 se ha realizado mediante la descarga de 247 imágenes Sentinel-1 cubriendo el periodo temporal 09/03/2015- 08/10/2020. Las imágenes utilizadas para este estudio son imágenes SAR tipo “Single Look Complex” adquiridas en trayectoria descendente. La resolución es de unos 4 metros en la dirección perpendicular a la órbita del satélite (principalmente E-O) y de unos 14 metros en la dirección paralela (principalmente N-S).

A partir de los datos obtenidos se han diferenciado tres Zonas con tasas de hundimiento diferentes: Zona A.- 8,9 cm año, Zona B.- 12,7 cm año y Zona C.- 5,4 cm año.

La Figura 3.3 muestra las series de deformación promedio en las áreas A, B y C. En ella se puede observar: (i) que los tres sectores tenían un comportamiento muy similar hasta diciembre de 2015. (ii) una aceleración de los sectores B y C hasta Febrero de 2017 y (iii) una ligera desaceleración el sector A con una velocidad menor al sector B hasta octubre de 2020.



Figura 3.3.- Series temporales de hundimiento promedio de las zonas A, B y C en el sector del apilamiento 2.

La zona de mayor hundimiento coincide con el sector apical de la zona de apilamiento 2, donde se han encontrado las mayores deformaciones del sustrato fangoso (sedimentos no consolidados de arena, limo y arcillas). Estas tasas de hundimiento son las más altas detectadas en España y de las mayores conocidas a nivel mundial.

Hay que señalar que en el proyecto de Fertiberia en ningún momento se diferencia si la tasa de asentamiento corresponden a la consolidación de los fosfoyesos, a la consolidación de los sedimentos y materiales geológicos de la cimentación o son producto de la disolución de los fosfoyesos como muestran los datos y la evidencias de estructuras de disolución, etc. La existencia de asentamientos diferenciales tan pronunciados puede generar problemas en la estructura durante el tráfico de maquinaria o la colocación de elementos estructurales durante la ejecución de las obras.

3.1.4.- Fallas y Actividad Sísmica

La actividad sísmica es de magnitud baja a moderada. Las fallas cercanas a los fosfoyesos e identificadas en las cartografías geológicas son activas y en ellas se localizan eventos sísmicos de baja magnitud. En un radio inferior a 20 km se han producido terremotos de intensidad moderada (VI). Eventualmente podrían registrarse intensidades superiores a las determinadas hasta ahora; es lo razonable, teniendo en cuenta el efecto sitio del emplazamiento de las balsas de fosfoyesos, dado que están situadas sobre materiales fangosos (sedimentos no consolidados tipo marismas) sin consolidar. La actividad sísmica se relaciona con la alta resistencia del basamento cortical y no se deben de descartar terremotos de elevada magnitud, aunque no se hayan registrado aún. Anisotropías mecánicas de dimensiones kilométricas (NE SO y NO-SE) situadas en la corteza superior pueden producir terremotos con intensidades elevadas. A partir de los terremotos se demuestra la dimensión fractal del proceso de fracturación en relación con la reactivación de fallas sometidas a un campo de esfuerzos regional que extiende el “forebulge” de la cuenca del Guadalquivir.

El cierre de un depósito de residuos peligrosos de estas características requiere de un estudio propio del riesgo sísmico para el lugar de emplazamiento. Este estudio permite determinar la aceleración de la gravedad considerando los métodos probabilísticos y estadísticos. El valor de la aceleración de la gravedad es necesario para el estudio de la estabilidad geotécnica en

condiciones normales, accidentales y extremas (*Real Decreto 264/2021 sobre Normas Técnicas de Seguridad para las Presas y sus Embalses*).

3.1.5.- Estructuras Deltaicas

El análisis de ortofotografías aéreas desde el año 1956-57 hasta la actualidad, ha permitido identificar la presencia de cuerpos sedimentarios deltaicos desarrollados en el borde de canal adyacente a las zonas de acumulación de fosfoyesos. Las dimensiones oscilan entre los 50 y 150 metros de longitud (Figura 3.4). Estas estructuras son reconocibles en las Zonas 1, 2, 3 y 4. En la actualidad muchas de ellas están cubiertas superficialmente por sedimentos fangosos (sedimentos no consolidados ricos en limos, arcillas, materia orgánica, etc.).

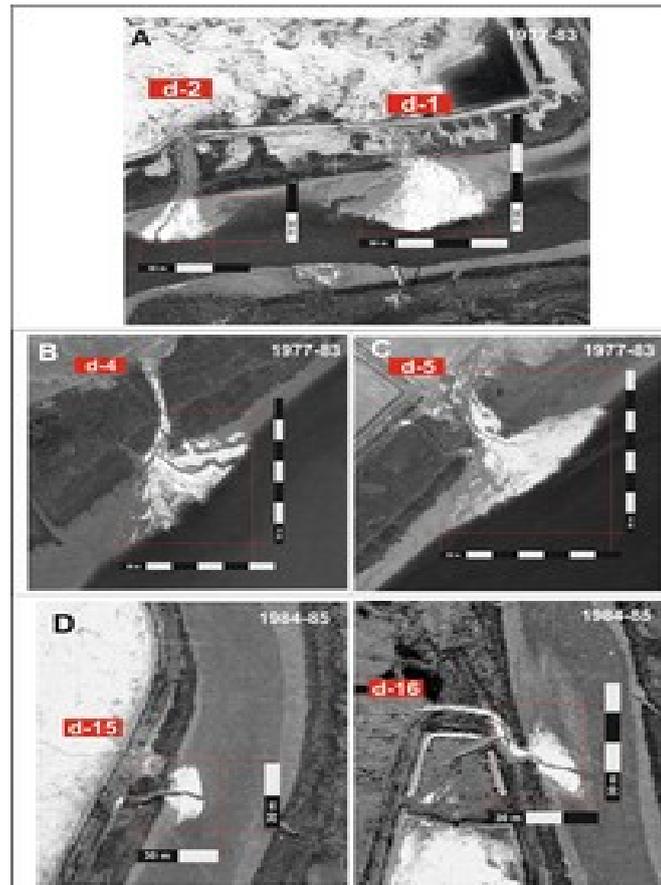


Figura 3.4.- Diversas estructuras deltaicas en la zona perimetral del apilamiento de las zonas 2 y 3.

Estos deltas de fosfoyesos se desarrollan desde los bordes de las balsas (zona deltaica apical), hasta la zona profunda del canal estuarino; presentando una estructura de las minas de acreción inclinadas hacia el canal y que en conjunto pueden superar los cuatro metros de espesor (Figura 3.5). En su superficie se observan oquedades y conjuntos de grandes grietas radiales (Figura 3.6), de origen kárstico y donde son observables surgencias y circulación de agua, que conectan los canales mareales con el interior de las balsas (Anexo II).

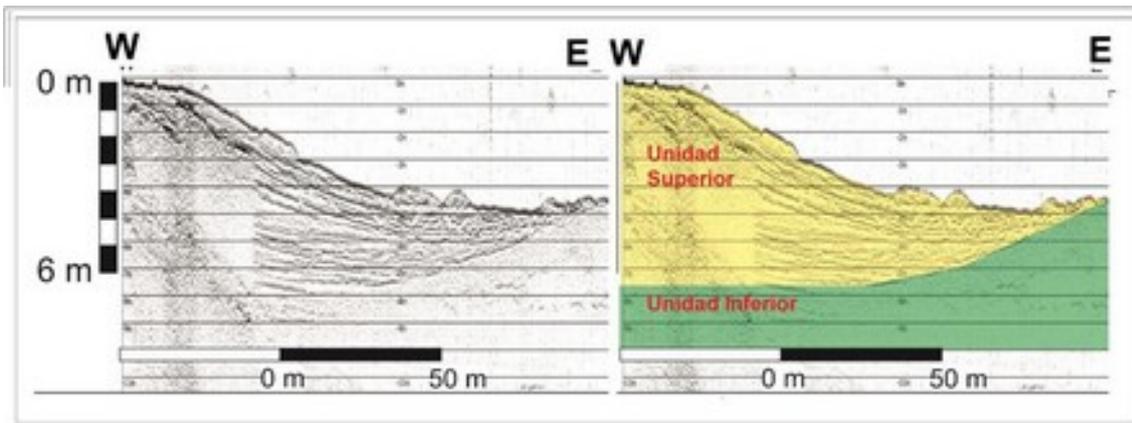


Figura 3.5.- Estructura interna de uno de los deltas de fosfoyesos identificados, donde se observan las capas de acreción y sus dimensiones.



Figura 3.6.- Diferentes estructuras de disolución y surgencias en la superficie de los deltas de fosfoyesos.

3.2.- Hidrogeología y calidad del agua

En el presente apartado se exponen los aspectos hidrogeológicos relativos a las balsas de fosfoyesos y su entorno colindante. Para ello, en primer lugar, es necesario identificar las unidades hidrogeológicas y caracterizarlas hidráulicamente, para así comprender cómo circula el agua a través de las mismas. En segundo lugar, identificar los tipos de aguas que existen en cada unidad hidrogeológica y las posibles conexiones entre ellas para, por último, comprender cómo es el funcionamiento hidrogeológico del sistema y los impactos ambientales que se producen en su entorno.

3.2.1. Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas son aquellas por donde circulan las aguas subterráneas. La circulación tiene lugar a través de los poros y/o grietas de las rocas y/o sedimentos, y depende de un parámetro llamado conductividad hidráulica saturada. Por lo tanto, una conductividad hidráulica elevada favorecerá la circulación del agua subterránea, mientras que una baja conductividad hidráulica hará que esta tenga una mayor dificultad para fluir.

Antes de describir las unidades hidrogeológicas, es de suma importancia conocer cómo era la superficie natural de las marismas previo al vertido del residuo industrial. En la Figura 3.7 puede observarse en el lado izquierdo una fotografía aérea de los años 1956-1957, donde es posible distinguir los canales mareales y la divisoria de aguas de las zonas 2 y 3. Estos canales actúan como vías de preferencia para la circulación del agua, en tanto que la divisoria establece el límite que drena las aguas hacia el río Tinto y hacia el estero del Rincón. En la imagen derecha, se observa la misma superficie de marisma, pero ocupada por los fosfoyesos y sus balsas en una fotografía más reciente de 2015. También existen fosfoyesos enterrados no visibles en dos zonas supuestamente restauradas, al sur (zona 1) y al norte (zona 4).

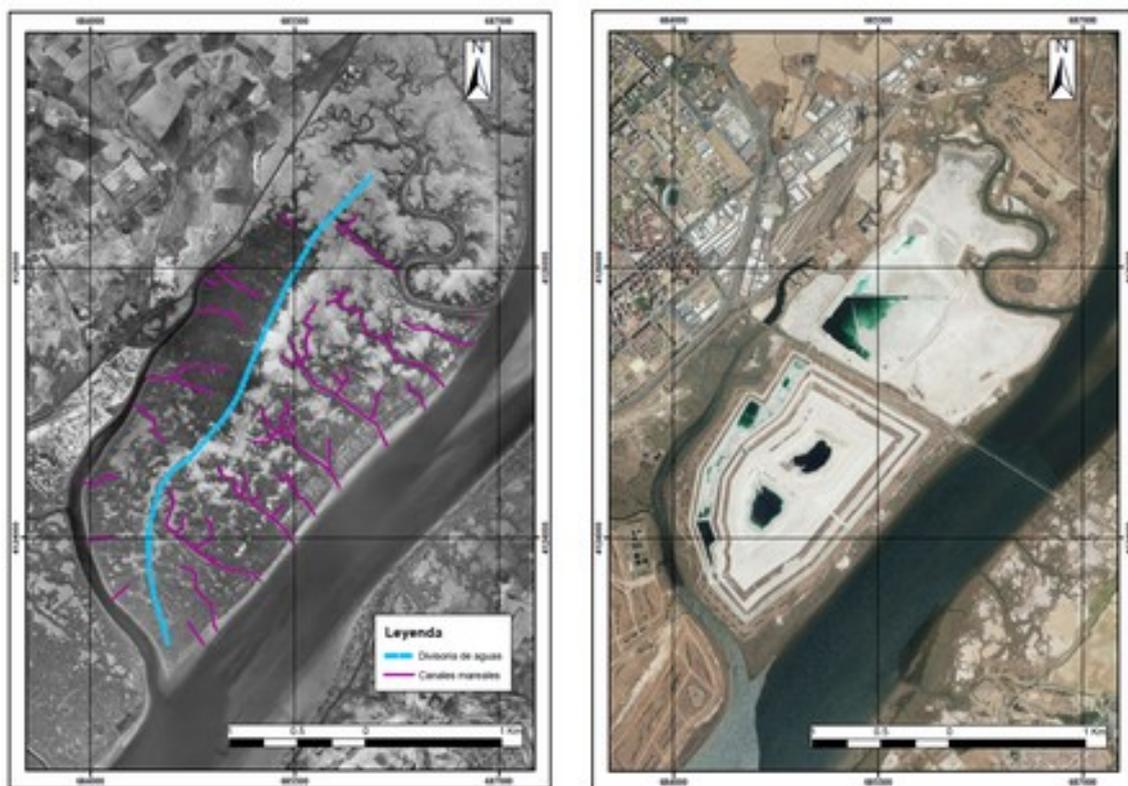


Figura 3.7. Izquierda: fotografía aérea de 1956/1957- Derecha: fotografía aérea del año 2015.

Las unidades geológicas e hidrogeológicas existentes en la zona de estudio se encuentran descritas brevemente en la Tabla 3.1. A grandes rasgos pueden diferenciarse tres grupos: la unidad correspondiente a los residuos de fosfoyesos, las unidades correspondientes a la marisma o Complejo Estuarino y, por último, la unidad de los niveles inferiores detríticos. Por debajo, aparece un potente paquete de limos y arcillas (margas azules) de muy baja conductividad hidráulica. Su disposición en profundidad se refleja en la sección vertical de la Figura 3.8.

Tabla 3.1.- Unidades hidrogeológicas.

	Unidad geológica	Litología	Unidad Hidrogeológica
Relleno antrópico	Fosfoyesos	Residuo industrial	Fosfoyesos

Complejo Estuarino Superior	E6	Fangos estuarinos	Complejo Estuarino
	E4 – E5	Limos arcillosos/arcillas limosas	
	Arenas Intermedias	E3	
Complejo Estuarino Inferior	E1-E2	Limos arcillosos, limos arenosos, arenas limosas	Niveles Inferiores Detríticos
Niveles Inferiores Detríticos	F2	Gravas fluviales	
	PT2v	Limos arenosos	
	PT2a	Gravas heterogéneas, matriz limosa	
Margas azules	Mio	Limos y arcillas	

● Unidad Fosfoyesos

Esta unidad en un sentido estricto no puede ser considerada como una unidad geológica, ya que su origen es antrópico. No obstante, este residuo industrial está formado por material con partículas de un tamaño similar al limo y/o arenas muy finas con una conductividad hidráulica relativamente elevada.

● Complejo Estuarino (marismas)

Esta unidad corresponde a los depósitos de la marisma sobre los que se apoyan los fosfoyesos. Presentan tres formaciones principales:

- Complejo Estuarino Superior: presentan materiales con un tamaño de grano bastante fino, lo que le confiere una baja a muy baja conductividad hidráulica, por lo que la circulación de agua en estas capas es muy restringida. Esto tiene un papel fundamental pues impide la filtración de las aguas de los fosfoyesos hacia las capas subyacentes.
- Arenas Intermedias: es la unidad con mayor conductividad hidráulica del Complejo Estuarino. Esta capa no tiene una continuidad lateral y se acuña hacia los extremos.
- Complejo Estuarino Inferior: estas unidades presentan valores de conductividad hidráulica muy bajos, similares a los del Complejo Estuarino Superior.

● Niveles Inferiores Detríticos

Los materiales que componen esta unidad presentan conductividades hidráulicas altas, especialmente F2 y PT2a. La unidad PT2v presenta valores menores, aunque no tiene un gran desarrollo en la zona de estudio, ya que ha sido erosionada en gran medida. Esta unidad forma parte de la Masa de Agua Subterránea Niebla (código 30593).

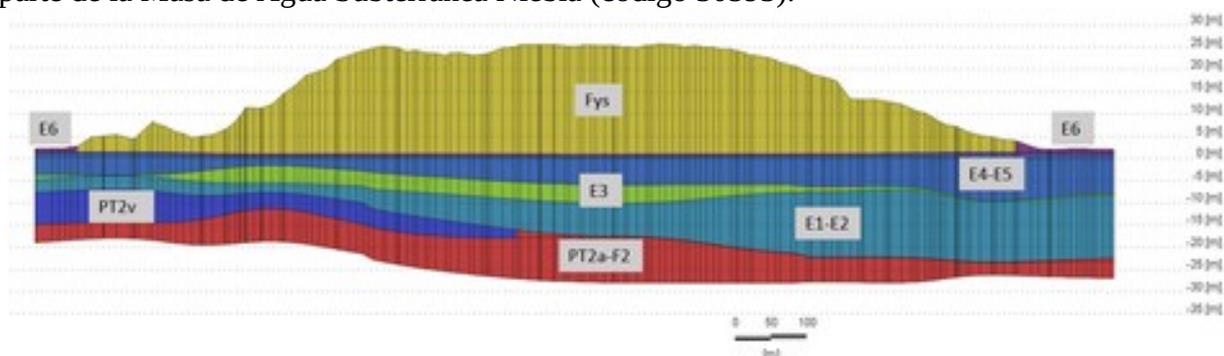


Figura 3.8.- Sección vertical de las unidades hidrogeológicas.

3.2.2. Calidad de las aguas

Se distinguen tres facies hidroquímicas principales correspondientes a las tres unidades hidrogeológicas definidas:

- Aguas de los fosfoyesos: son las aguas resultantes del proceso de producción industrial para la obtención de ácido fosfórico. Se tratan de aguas ácidas, con $\text{pH} < 2$, presentan una conductividad eléctrica elevada en torno a los 31 mS/cm, condiciones oxidantes, un elevado contenido de aniones disueltos, tales como fosfatos, sulfatos, cloruros y fluoruros. La elevada acidez de estas aguas provoca que existan elevadísimas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en disolución como: cobre, cadmio, cromo, arsénico, estroncio, vanadio, zinc, hierro, etc.
- Aguas del Complejo Estuarino o Marisma: la facie hidroquímica es clorurada sódica, correspondiente con el ambiente de formación de estos sedimentos y la actual influencia del agua de mar. Presenta un pH básico, con valores en torno a 9, condiciones reductoras y salinidades muy elevadas, con valores superiores a 40 mS/cm.
- Agua correspondiente a los Niveles Detríticos Inferiores: las aguas muestreadas en estos niveles presentan dos familias distintas: una clorurada sódica y otra del tipo clorurada cálcica. El contenido en sales varía ampliamente, la unidad F2 presenta concentraciones de iones mayoritarios y conductividad eléctrica muy elevadas, mientras que la unidad PT2a, presenta valores bajos, similares al agua dulce.

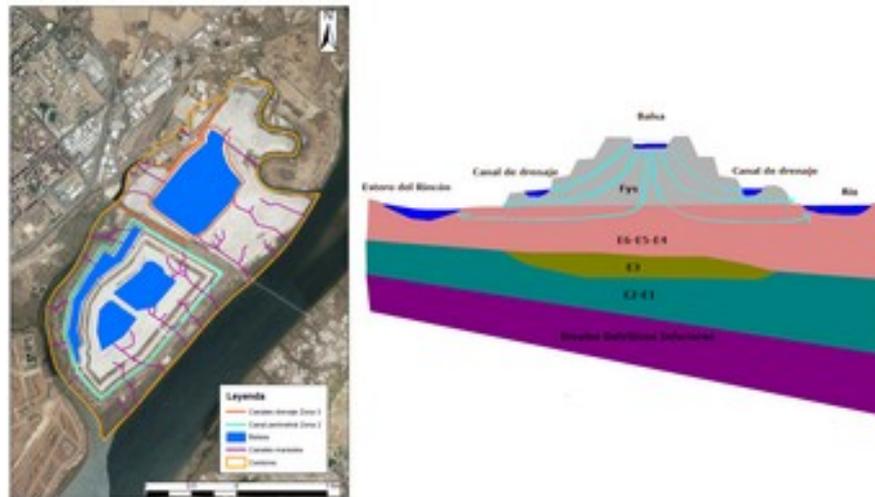


Figura 3.9. Elementos hidráulicos del sistema en las zonas 2 y 3 y esquema del funcionamiento hidrogeológico en un corte Este – Oeste.

3.2.3. Funcionamiento hidrogeológico

Para comprender cómo funciona el sistema hidrogeológico es necesario identificar los principales elementos hidráulicos del sistema; estos se observan en la Figura 3.9. Las entradas de agua se producen principalmente por: (a) la infiltración de las precipitaciones caídas directamente sobre los fosfoyesos en las zonas 2 y 3, y sobre los materiales que los recubre en las zonas 1 y 4 y, (b) las entradas de agua desde la Ría del Tinto y sus esteros a través de los canales mareales. Hasta el año 2010 también existían unas entradas importantes por los caudales que vertía la empresa Fertiberia. El nivel freático de un medio poroso, en este caso de la balsa de fosfoyesos, es la profundidad a partir de la cual todos los poros están completamente ocupados por agua, saturación del 100%. La respuesta del nivel freático de la balsa de fosfoyesos durante un periodo de registro continuo revela ambas entradas de agua (Fig. 4). En periodo de lluvias, la recarga de agua en la balsa de fosfoyesos (línea negra) es inmediata ante los eventos de precipitaciones (columnas naranjas; Fig. 4). Luego, esa agua se descarga a través de las salidas de borde y el nivel decrece rápidamente. En período sin lluvias, el agua de la balsa

de fosfoyesos (línea negra) oscila con las variaciones mareales (línea verde; Fig. 4), lo que demuestra la conexión hidráulica de la balsa de fosfoyesos con el estuario de Huelva.

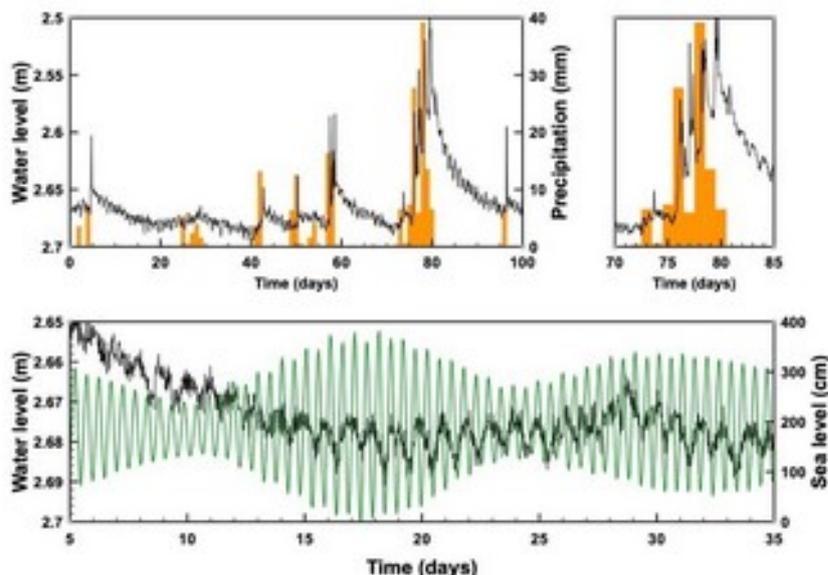


Figura 3.10.- Respuesta del nivel freático de la balsa de fosfoyesos durante eventos de lluvias (columnas naranjas), con dos zooms que muestran: la relación entre algunos episodios de lluvias y el nivel freático (superior, derecha) y la relación entre el nivel freático y las oscilaciones mareales durante un periodo sin precipitaciones (inferior).

Otro aspecto a destacar es que, debido a la elevada solubilidad de los fosfoyesos, el agua circulante los va disolviendo, generando conductos subterráneos que van ampliando su tamaño progresivamente. Este proceso, que incrementa la conductividad hidráulica de estos materiales y genera vías preferenciales de circulación, se conoce como karstificación. La existencia de esos canales kársticos causados por la disolución del yeso explicaría que, durante los eventos de lluvias, el agua de las precipitaciones entre y salga rápidamente a través del sistema (Fig. 3.10). Parte del agua de infiltración de las precipitaciones es interceptada por los canales perimetrales principales de cada zona y se vuelve a verter hacia las balsas. No obstante, estos canales no captan todo el flujo de agua subterránea ya que se encuentran algunos metros por encima del basamento de marisma y, por lo tanto, el agua que no es interceptada sigue su curso. Al llegar al contacto entre los fosfoyesos y la unidad de marisma, el flujo subterráneo no puede seguir descendiendo debido a la baja conductividad hidráulica de los materiales arcillosos de las marismas. Esto hace que el agua subterránea circule en sentido lateral a través de vías de mayor permeabilidad, que son los canales mareales o de disolución, y llegando hasta la ría del Tinto. A estas surgencias se las conoce como salidas de borde (Fig. 3.11).

En las zonas 1 y 4, donde los fosfoyesos están enterrados bajo una capa de suelo, pero sin ningún tipo de impermeabilización, el flujo del agua es similar: el agua entra en el sistema a través de las precipitaciones y de la Ría por antiguos canales mareales, contaminando al pasar a través de los fosfoyesos y llega de nuevo a la Ría a través de las salidas de borde.

Por otro lado, existen numerosas perforaciones en la zona que atraviesan los fosfoyesos y llegan hasta los niveles inferiores detríticos. Algunas de estas perforaciones han producido que se pongan en contacto las aguas ácidas y con altas concentraciones de aniones y metales de los fosfoyesos con las aguas dulces de estos niveles inferiores, produciendo una contaminación local de la Masa de Agua Subterránea Niebla.

3.2.4. Salidas de contaminantes hacia la Ría de Huelva

La evaluación del potencial de contaminación de la balsa de fosfoyesos y de las acciones preliminares de restauración se llevó a cabo precisamente con el muestreo detallado de las salidas de borde en el perímetro de las cuatro zonas de la balsa de fosfoyesos (Fig. 3.11).

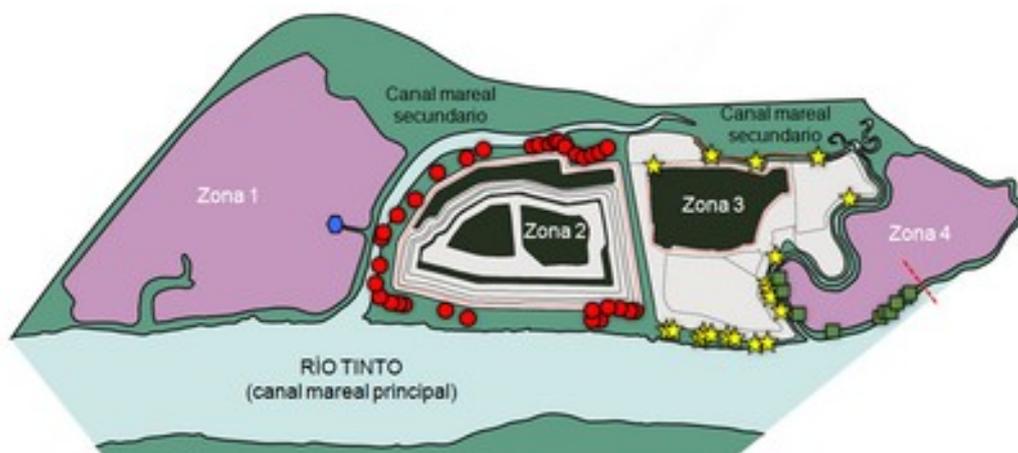


Figura 3.11.- Mapa de ubicación de las pilas de fosfoyesos sobre las marismas del Río Tinto y localización de las salidas de borde muestreadas (los colores de los círculos corresponden a las cuatro zonas de las balsas de fosfoyesos).

Las zonas 2 y 3 presentan numerosas salidas de borde alrededor. En el caso de la zona 3, la mayor parte de las salidas de borde se encuentran en el lado que está junto al estuario del río Tinto. En la parte opuesta hay un gran canal perimetral que recoge esas salidas de borde, pero dicho canal está directamente comunicado al estuario a través de un canal secundario mareal, por lo que toda el agua que recibe sale finalmente hacia la ría. Las zonas supuestamente restauradas, especialmente la zona 4, presentan tantas salidas de borde como las zonas 2 y 3. Algunos ejemplos de salidas de borde tanto en las zonas sin restaurar como en las zonas restauradas pueden observarse en la Figura 3.12.

El agua que entra en el sistema, bien a través de precipitaciones o bien a través de canales secundarios mareales, se contamina al circular a través de los fosfoyesos, por lo que estas salidas de borde tienen valores de pH ácidos y elevadas concentraciones de contaminantes (fosfatos, fluoruros, arsénico, cadmio, etc.). En todo el perímetro de la balsa de fosfoyeso, han sido identificadas unas 60 salidas de borde altamente contaminantes. Las salidas de borde presentan, en promedio, valores de pH de 1.94 y concentraciones de 6111 mg/L de P, 617 mg/L de F, 205 mg/L de NH_4^+ , 125 mg/L de Fe, 28.5 mg/L de Zn, 16.6 mg/L de As, 9.52 mg/L de U, 7.02 mg/L de Cr, 4.27 mg/L de Cu y 3.62 mg/L de Cd, entre otros (Fig. 3.13). Es importante la realización de un modelo numérico hidrogeológico adecuado para cuantificar la descarga real de contaminantes a las zonas adyacentes.

La utilización de trazadores geoquímicos como las tierras raras, la relación Cl/Br y el uso de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{34}\text{S}$) ha permitido destacar la importancia del agua del estuario en los procesos de meteorización y formación de las salidas de borde; frente a otros agentes como el agua de las precipitaciones o el agua de proceso embalsada sobre la superficie del fosfoyeso. Se trata de un sistema abierto sujeto a la acción de las mareas con un acceso continuo de agua intermareal al interior de la balsa, a través de canales de marea secundarios, como principal responsable de la meteorización de los fosfoyesos. El agua del estuario accede a la balsa de fosfoyeso en profundidad y posteriormente retorna al estuario en forma de salida de borde ácida y contaminada. Estos resultados deben considerarse tanto para la restauración futura de las zonas 2 y 3 como para la mejora de las acciones preliminares de restauración de las zonas 1 y 4 de la balsa de fosfoyeso.



Figura 3.12.- Ejemplos de salidas de borde en las diferentes zonas de la balsa de fosfoyeso.

Cabe resaltar que la mayor parte de los contaminantes que se descargan (Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd y Sb) se comportan de forma conservativa en solución; es decir, estos elementos no precipitan durante la mezcla con el agua de mar, sino que se mantienen móviles amenazando potencialmente las condiciones ambientales del estuario y del litoral.

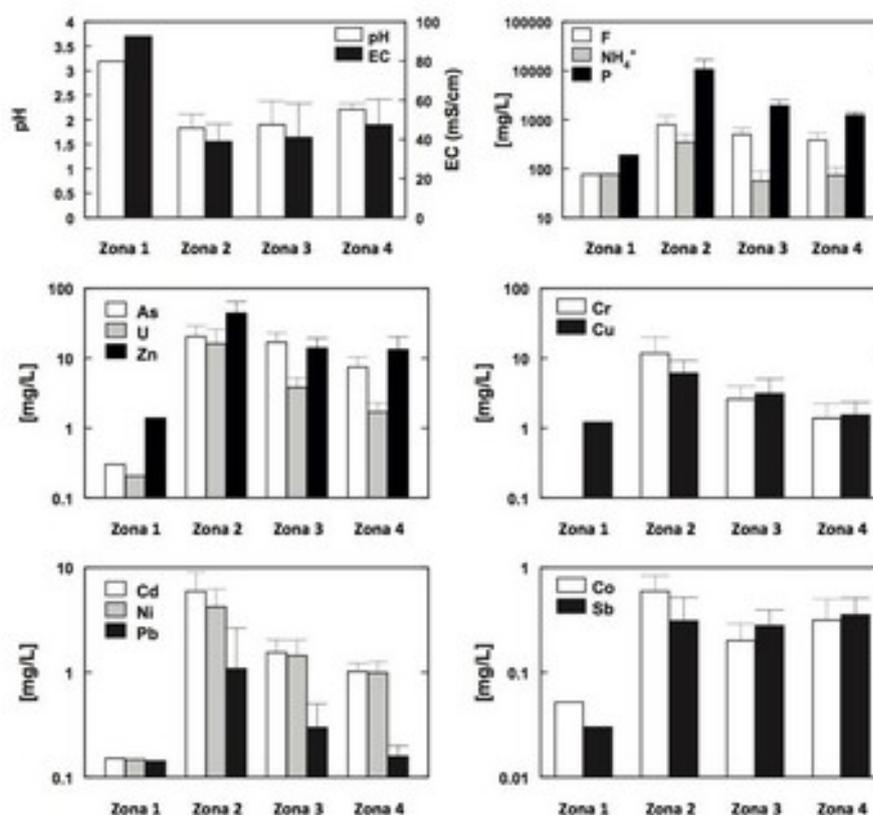


Figura 3.13.- Datos de composición química promedio para las salidas de borde de cada zona de la balsa.

3.3.- Evaluación radiológica

El fosfoyeso (FY) es un subproducto que se genera en la producción del ácido fosfórico (AF), que a su vez es la materia prima usada en la fabricación de la mayoría de los fertilizantes fosfatados, y muy especialmente los denominados “abonos complejos”. La reacción química para la formación del AF es muy simple (fosfato roca + ácido sulfúrico), y por tanto los elementos mayoritarios y trazas contenidos en la roca fosfática (materia prima) se distribuirán durante el proceso industrial entre el ácido fosfórico (matriz acuosa con aproximadamente un 25% de P_2O_5) y el fosfoyeso (sólido blanquecino, en el que más del 95% de la matriz es yeso, o sea, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

La roca fosfática sedimentaria procedente del África occidental es la usada mayoritariamente en la industria de Huelva. Este mineral presenta contenidos de metales pesados tóxicos similares a suelos agrícolas, salvo en Cd y As cuyas concentraciones son un orden de magnitud superior. Por el contrario, las concentraciones en radionucleidos naturales de la serie del ^{238}U son unas 50 veces superiores a las de suelos no perturbados; un suelo natural español no contaminado suele tener unos 30-40 Bq/kg de ^{238}U y descendientes en equilibrio secular, mientras que en la roca fosfática de Marruecos es de unos 1500 Bq/kg, lo cual ha motivado que este tipo de actividad minera e industrial esté regulada como “Actividad NORM” (Naturally Occurring Radioactive Material).

Con objeto de comparación con suelos típicos, hay que indicar que los dos elementos mayoritarios en el fosfoyeso son el Ca (22%) y el S (18%), con otros elementos minoritarios en concentraciones del orden del contenido (%): Si (2%), F (1%), y otros como el Al, Fe, Mg, Na,

K en torno al 0.2-0.5%. En relación con los elementos traza (concentraciones en torno a la ppm), la mayoría de los elementos (Pb, Co, Cu, Ni, etc.) están en concentraciones similares a suelos típicos no perturbados, salvo casos como el Cd, As o U, que están en concentraciones ~ 10 ppm. El hecho de que la concentración de U, Cd y As en el FY no sea más alta se debe a que son muy solubles y solo el 10-20% de lo contenido inicialmente en la materia prima precipita con el fosfoyeso, quedando por tanto la mayoría de estos elementos en disolución con el ácido fosfórico.

En relación con los radionucleidos naturales, hay que indicar que la mayoría de los descendientes de vida larga del ^{238}U , tales como el ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb y ^{210}Po , quedan mayoritariamente retenidos en el FY (> 95%), salvo el ^{238}U , que como se indicó anteriormente solo el 10-20% del U presente en la materia prima acompaña finalmente al FY. Las concentraciones de actividad promedias de estos radionucleidos (^{230}Th , ^{226}Ra , etc.) en el FY están en torno a 600 Bq/kg, con una horquilla de unos ± 100 Bq/kg dependiendo de cada radioelemento específico, salvo para los isótopos de $^{234,238}\text{U}$, que presentan valores medios en torno a los 100 Bq/kg.

En ciertas zonas superficiales de las balsas de fosfoyeso (zonas 2 y 3), se identificaron hace unos 10 años unas capas superficiales de hasta varios decímetros de espesor compuestas por un material gris oscuro, que se denominaron “fosfoyesos negros” (FN), que generaban tasas de dosis en superficie un orden de magnitud superiores a las existentes en la superficie de los FY blancos. Estos materiales se han caracterizado, tanto química como radiológicamente, y estos informes también han sido evaluados por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

Por otro lado, resaltar que, aunque el FY se obtiene por filtración y tres etapas de lavado a contracorriente, siempre queda un remanente de ácido fosfórico (1-1.5% de P_2O_5), que le confiere una relativa acidez (pH ~ 2), lo que conlleva a que el agua de poro que contiene (consecuencia de lluvia, actividad mareal, del original bombeo) sea ácida (similar pH) y disuelva fácilmente los contaminantes presentes en el fosfoyeso. Luego el principal problema ambiental del FY no son sus elevadas concentraciones de contaminantes, sino su alta capacidad de lixiviar dichos contaminantes hacia el agua que entre en contacto con él. Por ello, el principal objetivo del proyecto de restauración será que el agua (marina o de lluvia) no entre en contacto con el FY, y en segundo lugar que el agua de poro contaminada que contiene no se libere al medio ambiente que le rodea.

Teniendo presente la actual normativa sobre RADIACIÓN NATURAL, o actividades NORM, y en función de los datos anteriormente incluidos, se hace necesaria una EVALUACIÓN RADIOLÓGICA de las balsas de FY, tanto durante las tareas de mantenimiento, como durante la restauración de estas y 30 años después de su clausura, una vez se hayan restaurado. Esta evaluación radiológica debe contemplar dos grupos de personas:

- Público General (PG);
- Personal Profesional, o trabajadores (PP).

La evaluación radiológica se determina mediante la dosis efectiva anual recibida por las personas más expuestas, y cuyo límite es 1 mSv/año, si no son trabajadores profesionalmente expuestos.

Por otro lado, hay que distinguir entre lo que es el riesgo radiológico sobre las personas, para el cual se cuenta con una metodología estandarizada, y lo que denominamos el “Impacto Radiológico Ambiental”, IRA. Este último no trata de cuantificar el riesgo o daño sobre el medio ambiente, algo muy complejo y sujeto a debate, sino que se centra en evaluar los

incrementos de concentraciones de radionucleidos en los compartimentos ambientales potencialmente afectados por la fuente de contaminación radiactiva.

Para evaluar las dosis radiológicas efectivas recibidas por personas expuestas se analizan las diferentes vías de exposición, de forma similar a la evaluación de riesgos químicos, y se calculan los incrementos de dosis radiológicas efectivas recibidas por los grupos críticos, ya sean de PG o de PP.

Las vías de exposición a radiaciones ionizantes en cualquier problema son:

- Inhalación.
 - Gases (radón y torón)
 - Material particulado (resuspensión)
- Irradiación externa (gamma y beta desde la superficie de los FY)
- Ingestión
 - Agua
 - Alimentos
- Incorporación a través de la piel

3.4.- Calidad del aire

El 31 de diciembre de 1998 se produjo la rotura de un dique de contención de las balsas de fosfoyesos de Huelva. A continuación, el Parlamento de Andalucía y a través de una demanda del Colectivo Ciudadano para la Descontaminación de Huelva, solicita al CSIC un estudio sobre la situación medioambiental de Huelva y su entorno. Desde julio de 1999 se inicia el muestreo partículas totales en aire ambiente (TSP) en la antigua estación Manuel Lois de la Red de Calidad del Aire de Andalucía por parte de la Unidad Asociada al CSIC-UHU “Contaminación Atmosférica”, liderada por Xavier Querol, Andrés Alastuey y Jesús de la Rosa. Los resultados de niveles y composición química de TSP demostraron la existencia de altas concentraciones de Cu, Ti y Zn (210, 155 y 112 ng/m³) y un exceso de especies ácidas en el aire de Huelva (*Querol et al. 2002; Atm Env 36: 3113-3125*). Entre los años 2001 y 2002 se muestrea PM10 y PM2.5 en la misma estación, cuantificándose la contribución de la fuente industrial al PM10 en 32% (*Alastuey et al. 2006; JAWM 56: 993-1006*).

En relación con las balsas de fosfoyesos y su impacto en la calidad del aire, en julio de 2001 se realizó una campaña de muestreo de niveles y composición química de PM10 y PM2.5 de los focos de emisión industriales (Fig. 3.14). Los resultados obtenidos en la balsa 2 mostraron la existencia de picos minutales de hasta 100 µgPM10/m³ y 50 µgPM2.5/m³, destacando altas concentraciones de sulfato (10 µg/m³) y fosfato (8 µg/m³). La concentración de U fue inferior a 0.1 ng/m³. La granulometría de las partículas fugitivas se considera gruesa, siendo el tiempo de residencia de bajo. Por lo tanto, se consideró poco probable que ocurriera en ese momento un impacto importante de estas partículas sobre la ciudad de Huelva.

Todos los trabajos realizados se encuentran descritos en la Tesis Doctoral de Ana M Sánchez de la Campa (2003 *Geoquímica del Material Particulado Atmosférico de Huelva, Suroeste de España*, <https://bit.ly/3bU0syF>) y las consideraciones sobre el análisis de las emisiones atmosféricas procedentes de las balsas de fosfoyesos fueron publicadas en el Informe sobre la documentación presentada por FERTIBERIA S.A. en relación con el Proyecto de Revegetación de las Zonas de Fosfoyesos, emitido por miembros de la Comisión de Expertos de la Consejería de Medio Ambiente y el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino para la evaluación del Plan de restauración de las Balsas de Fosfoyesos en el año 2009, y liderado por el Prof Juan Luis Ramos Martín (<https://bit.ly/3As7XHh>).

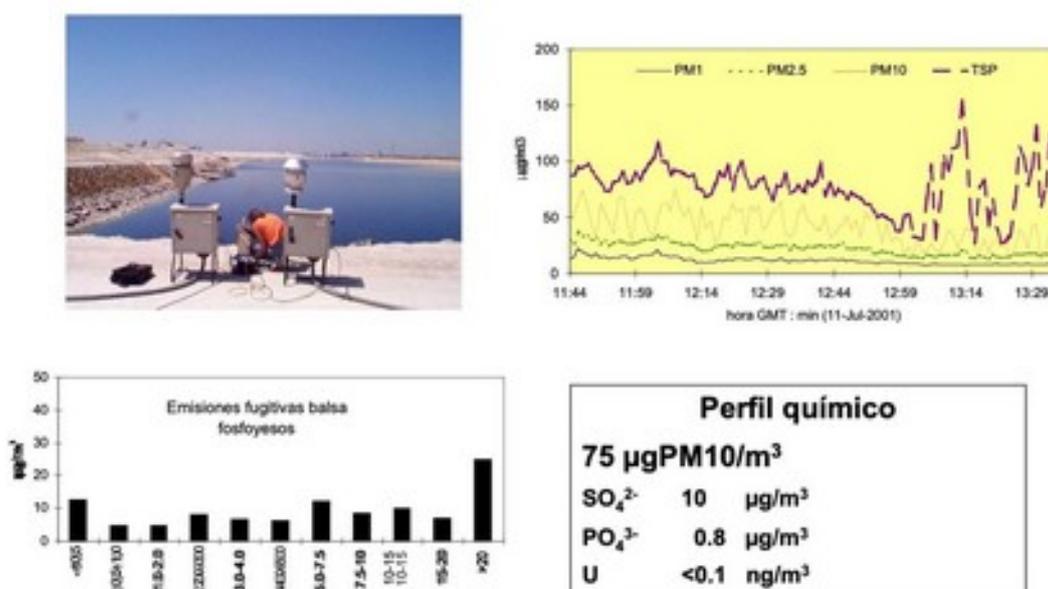


Figura 3.14.- Muestreo de partículas fugitivas PM10 y PM2.5 en la balsa 2 durante el 11 de julio de 2001.

El domingo 12 enero de 2014 y bajo la influencia de una masa de aire norteafricano, el servicio de Emergencias 112 Andalucía recibió un centenar de llamadas telefónicas de ciudadanos con molestias en mucosas nasales y ojos. El origen de este evento se relacionó con la evaporación de los lixiviados existentes en la balsa 3 y su llegada a Huelva bajo vientos de componente Sur y altura de capa límite baja.

En el mismo año se propone y obtiene el Proyecto de Investigación CGL2014-54637-P “Evaluación del impacto a la atmósfera e implicaciones en la calidad del aire de lixiviados ácidos en depósitos de fosfoyesos” financiado por la Agencia Estatal de Investigación, el cual permitió evaluar la resuspensión e impacto de las partículas fugitivas de fosfoyesos en Huelva capital, además de confirmar la emisión de HF y su impacto en la calidad del aire de Huelva. Se puso en marcha una puesta a punto metodológica y un control de contaminantes no convencionales relacionados con los fosfoyesos y la calidad del aire.

Semanalmente y entre los años 2014 a 2017 se realizó el muestreo de lixiviados en la balsa 3, principal zona de estudio del proyecto. Además de los fosfoyesos, presentes sobre todo en la balsa 2, en la balsa 3 (zona de seguridad y evaporación) existen lixiviados ácidos (hasta 10 Mm³) y sales bandeadas de F, S y P. La importancia geoquímica de estos elementos sobre la calidad del aire no se había tenido en cuenta hasta entonces, determinándose como un factor nuevo a tener en cuenta. Los lixiviados ácidos son recogidos mediante canales perimetrales y trasvasados desde la balsa 2 a la balsa 3. De esta forma se evita una sobrecarga en la balsa 2, y al mismo tiempo se controlan para evitar su vertido a la ría del Tinto. Los lixiviados son de coloración verde y concentra elementos móviles de los fosfoyesos (U, Cd, As, Cu, entre otros), considerándose la balsa 3 como una “trampa química” de las anomalías geoquímicas principales de los fosfoyesos, lo que puede ser una ventaja a la hora de su eliminación.

La evaporación de los lixiviados ocurre sobre todo en verano, pero al tratarse un lixiviado altamente acidificado (cerca de pH 1), y contener HF, se hizo necesario su medida primero mediante captadores pasivos y luego a través de la instalación de un equipo LGR de cavitación LASER para su medida cada 100 segundos. El equipo fue instalado en 2016 en el Campus El Carmen y luego en Los Rosales, ambas estaciones pertenecientes a la Red de Calidad del Aire de la Junta de Andalucía. La evaporación de los lixiviados no es inocua, contribuyendo al

exceso de acidez detectado en el aire ambiente de Huelva, juntamente con las emisiones canalizadas de la industria situada en el entorno de la Ría de Huelva.

Todas las conclusiones se encuentran resumidas en la Tesis Doctoral de Raquel Torres-Sánchez, defendida en marzo de 2020 titulada “Evaluación del impacto a la atmósfera e implicaciones en la calidad del aire de lixiviados ácidos en depósitos de fosfoyesos” <https://bit.ly/3urteNc>. Se destacan las siguientes aportaciones:

- Composición química de PSD (partículas de deposición) [Torres-Sánchez et al. 2019 Atmospheric Research 230 104650](#).
- Niveles de HF (vapor) en baja y alta resolución temporal, y pronóstico de la dispersión en alta resolución espacial mediante el modelo CALPUFF. [Torres-Sánchez et al. 2020, STOTEN 136891](#).
- Evolución geoquímica de lixiviados de fosfoyesos desde un punto de vista estacional y su relación con la calidad del aire. [Torres Sánchez et al. 2020, Journal of Environmental Management 254, 109832](#).
- Propuesta de modelo de restauración alternativo. [Lieberman et al. 2017 STOTEN 700, 134444](#).
- Creación de geopolímeros mediante residuos de fosfoyesos. [Lieberman et al. 2018 Journal of Cleaner Production 185: 870-881](#)
- **Caracterización de polvo doméstico en la ciudad de Huelva; [Torres-Sánchez et al. 2017, STOTEN 587-588: 476-481](#)**

3.5.- Impacto ecológico

Los estuarios son zonas afectadas habitualmente por contaminación de diferentes orígenes. El estuario conjunto de los ríos Tinto y Odiel ha recibido contaminación desde actividades mineras, industriales, urbanas y agrícolas. Entre las actividades industriales destaca la contaminación recibida desde las balsas de fosfoyesos acumulados en las marismas del Río Tinto.

Este texto es un informe inicial de un trabajo más amplio que aún estamos realizando. En este estudio nos planteamos identificar la huella contaminante en forma de metales y metaloides de las balsas de fosfoyesos para poderla diferenciar de la de otras fuentes de contaminación. Nuestros resultados muestran claramente que las balsas de fosfoyesos son una fuente de elementos contaminantes que se acumulan en los sedimentos estuarinos.

La huella de contaminación que caracteriza a los sedimentos adyacentes a las balsas de fosfoyesos frente a otras zonas estuarinas se conforma de concentraciones relativamente elevadas de 16 elementos químicos: cobre, magnesio, fósforo, plomo, titanio, vanadio, zinc, cadmio, terbio, talio, litio, cromo, estroncio, itrio, estaño y bario.

Además, la halófito *Spartina densiflora* colonizaba la periferia de las balsas de fosfoyesos y la orilla izquierda del Río Tinto frente a las balsas acumulaban más fósforo que las que crecían en el resto de localizaciones muestreadas, y más uranio, galio, selenio, estaño, praseodimio, samario, gadolinio y disprosio que en todas las localizaciones excepto el Polo Químico de Huelva.

Nuestros resultados preliminares muestran que los elementos contaminantes de las balsas de fosfoyesos se acumulan, especialmente, en sedimentos cercanos a dichas balsas, y algunos de ellos son acumulados por, al menos, parte de la vegetación. Es decir, los contaminantes de las balsas de fosfoyesos están entrando en la red trófica estuarina a través de los productores primarios.

3.6.- Impacto en la salud pública

3.6.1. Introducción

Actualmente está ampliamente reconocido que la vía causal que conduce a un efecto adverso en la salud de las personas no depende de factores de riesgos aislados, sino de la intrincada relación de muchos elementos entre sí, siendo determinante no sólo las características biológicas y genéticas de las personas, o sus estilos de vida individuales, sino también las condiciones socioeconómicas, culturales, ambientales y políticas de las poblaciones (Martín-Olmedo *et al.*, 2016; Martín-Olmedo *et al.*, 2019). En la zona de la Ría de Huelva el informe independiente que la Sociedad Española de Epidemiología evacuó a petición de la oficina del Defensor del Pueblo Andaluz sobre las causas de la mayor mortalidad sostenida a lo largo del Siglo XX y hasta la fecha del informe, se objetiva el impacto de todos esos factores. Por lo tanto, representa un enorme y complejo reto aislar las implicaciones en salud asociadas a las balsas de fosfoyesos de entre los efectos del resto de condicionantes. Para su caracterización sería preciso un abordaje sistemático y dirigido, nunca llevado a cabo como tal en todos estos años a pesar de la demanda de la sociedad onubense (y no sólo de grupos ecologistas). Hay que mencionar también la importancia crucial en una evaluación sobre salud pública de disponer de datos sobre las estadísticas de enfermedades y mortalidad en la población que sistemáticamente recoge la administración en sus registros sanitarios, y que según la Ley General de Salud Pública de 2011 actualmente vigente en el Estado Español, tiene la obligación de ser facilitada a la ciudadanía o a quien la demande con fines científicos. En dicho sentido ante la ausencia de respuesta de la Administración cuando desde el Comité se han solicitado los datos, se ha tenido que usar información publicada en medios científicos, o datos de estudios independientes en marcha para intentar paliar dicha limitación. Por tanto, la evidencia que se resume a continuación en esta sección se basa en datos parciales, y en la interpretación que las determinaciones ambientales expuestas previamente sugieren.

Previamente, y para tener una mejor comprensión de dónde emanan las consideraciones en salud pública en relación a este caso, es necesario disponer de una visión general de las metodologías estandarizadas disponibles para la cuantificación de impactos en la salud pública.

Estas herramientas metodológicas se pueden clasificar en dos tipos:

- Evaluación de riesgos en salud pública (ERS), basada en evidencia toxicológica y determinaciones ambientales, geográficas, meteorológicas y sociales (fundamentalmente, aunque no exclusivamente). La ERS permite calcular la probabilidad de que una población o determinados sectores o subgrupos más vulnerables estén o no en riesgo de padecer efectos cancerígenos o no cancerígenos (ej. asma, efectos cardiovasculares, afecciones hepáticas, etc.) como consecuencia de una determinada exposición. El elemento clave consiste pues en dirimir cómo un individuo o una población pueden entrar en contacto con un peligro o conjunto de peligros (químico, físico o biológico), caracterizando la extensión, magnitud y frecuencia con la que dicho contacto se produce. Esta metodología no cuantifica el número de personas que enferman o mueren por una determinada causa asociada a peligros ambientales conocidos, pero permite, sobre una evidencia científica sólida, tomar decisiones sobre la necesidad de actuar para proteger la salud de una población, eliminando o minimizando la exposición, y proponiendo acciones de salud pública de seguimiento (ej. biomonitorización de grupos identificados como más expuestos, con seguimiento de su estado de salud, campañas de educación en salud o la vigilancia epidemiológica). Esta metodología es ampliamente aplicada en otros países,

entre ellos en Estados Unidos (Agencias ATSDR y EPA). En España, desde la Sociedad Española de Salud Ambiental (SESA) y la Escuela Andaluza de Salud Pública (EASP) se generó una guía metodológica para su aplicación en nuestro contexto (Martín-Olmedo *et al.*, 2016).

- Estudios epidemiológicos que pueden ser:
 - o Descriptivos: permiten conocer en qué medida la prevalencia y/o incidencia de determinadas afecciones de salud registradas y cuantificadas en poblaciones de áreas contaminadas difiere de aquella medida en poblaciones de referencia no afectadas por la contaminación.
 - o Analíticos: permiten constatar hipótesis etiológicas entre exposición y efectos sobre la salud (qué grado de asociación existe entre exposición y efecto), teniendo en cuenta la contribución de otros posibles factores de riesgo como exposiciones ocupacionales, factores socioeconómicos y estilos de vida.
 - o Biomonitorización humana: centrados en caracterizar la “dosis interna” midiendo concentraciones de contaminantes ambientales o metabolitos, en fluidos corporales fácilmente accesibles (por ejemplo, sangre, orina o saliva) o tejidos corporales (como cabello, uñas) a nivel individual. También sirve para medir biomarcadores de efecto temprano en salud (ej. estrés oxidativo) precursores de efectos graves a largo plazo (ej. diabetes, cáncer). Esta metodología es muy puntera pero también bastante costosa, requiere conocer qué peligros son los prevalentes en la zona afectada, y supone un gran reto logístico tanto para el reclutamiento de la población a monitorizar, como en lo relativo al almacenamiento y análisis de las muestras biológicas.

Los estudios epidemiológicos (EEs), con caracterización de carga de morbi/mortalidad, son sin duda más informativos, pero requieren de una mayor disponibilidad de datos desagregados a nivel individual, tanto en lo relativo a registros de salud de enfermedades específicas como de datos ambientales. Especialmente crítica se ha demostrado la dificultad de medir la magnitud de la exposición a peligros ambientales a nivel individual, lo que ha llevado en muchos casos a resultados poco concluyentes de EEs en zonas contaminadas (Martín-Olmedo *et al.*, 2019). Una secuencia propuesta incluso desde la Organización Mundial de la Salud (OMS) en un estudio reciente llevado a cabo en la ciudad italiana de Taranto con una grave problemática medioambiental, es la combinación de la ERS, especialmente en lo referente a la caracterización de la exposición, con estudios de vigilancia epidemiológica y/o biomonitorización (Martín-Olmedo *et al.*, 2022, en prensa).

3.6.2.- ERS aplicada a la balsa de fosfofosos

La caracterización de la exposición dentro de la ERS conlleva la identificación de todas las posibles rutas de exposición que pueden afectar a la población onubense, entendiéndose como tal el proceso que determina que los peligros emitidos desde las balsas emigren a un medio ambiental (aire, suelos, aguas subterráneas, lixiviados a la Ría), y acaben en un punto donde las personas puedan entrar en contacto con dichos peligros. Un elemento relevante en este proceso es la posible transferencia de contaminantes de un compartimento ambiental a otro (movilidad y geodisponibilidad), así como los procesos de transformación química o biológica, con la posible generación de metabolitos más o menos tóxicos que el contaminante primario. Así, los contaminantes emitidos a la atmósfera son susceptibles de ser depositados en suelos próximos o relativamente alejados dependiendo de variables meteorológicas y orográficas, siendo posible su incorporación a productos de consumo humano producidos en esas zonas, o a las aguas subterráneas por percolación. Asimismo, dentro de un mismo punto de exposición, y atendiendo

a las características físico-químicas del contaminante, éste puede ingresar al cuerpo humano por diversas vías de exposición. Las más frecuentes en población general son: la vía inhalatoria a través del material particulado en suspensión presente en el aire ambiente o inhalación de gases, la oral a través de la ingesta de agua y de alimentos contaminados, y en menor extensión la vía dérmica por contacto con peligros presentes en polvo o disueltos en agua (esta vía es más frecuente en salud laboral, en menor medida en niños cuando juegan suelos afectados por deposición de contaminantes) (Martin-Olmedo et al., 2016).

De lo expuesto en secciones previas sabemos que desde las balsas de fosfoyesos, como fuente emisora, como mínimo pueden iniciarse las rutas de exposición indicadas en la Tabla 3.2.

Para concluir si existe o no riesgo y su magnitud, debemos conocer la concentración de todos esos contaminantes en los puntos de exposición, así como las características de la población realmente afectada (¿toda la población de Huelva, sólo algunos barrios o sólo los trabajadores implicados en la balsa?). Para ello, sería preciso, llevar a cabo un estudio de modelización de la dispersión del material particulado procedente específicamente de la balsa de fosfoyesos, incluyendo metales pesados y fluorhídrico en el aire ambiente, así como un plan de muestreo representativo que permita conocer datos de inmisión (aire respirado) en distintos puntos de la ciudad de Huelva, información de la que carecemos a día de hoy. Una vez obtenida la información basal de dispersión en la población, se podría modelar el impacto que tendría el proyecto de Fertiberia en la acumulación de contaminantes en la población.

Tabla 3.2: Posibles rutas de exposición de la población onubense a peligros emitidos desde las balsas de fosfoyesos a distintos medios ambientales (propuesta basada en datos de secciones previas)

MEDIO AMBIENTE AFECTADO	CONTAMINANTES EMITIDOS TESTADOS*	POSIBLE PUNTO DE EXPOSICIÓN**
Aire ambiente	1. Material particulado (PM ₁₀ , PM _{2,5}) al que puede ir adherido elementos como U, Cd, As, Cu, Zn, Ti, etc. 2. Sulfatos 3. Fosfatos 4. Evaporación de lixiviados ácidos destacando el Fluorhídrico, pero también sulfúrico y fosfórico.	Aire inhalado población general Aire inhalado profesionales implicados en el mantenimiento de las balsas
Lixiviados por pérdidas perimetrales o arrastre de material desde el interior de las balsas a las aguas de la Ría por las grandes grietas radiales identificadas	Cr, P, Fe, U, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd y Sb (principalmente) que no precipitan durante la mezcla con el agua de mar, debido a la gran acidez de los lixiviados y aguas del interior de las balsas. Ácidos fluorhídrico, sulfúrico y fosfórico Cambios en parámetros físicos del agua (pH) que afectan a biodisponibilidad de sustancias peligrosas	Ecosistema de la Ría y las marismas, afectando a toda la cadena trófica, principalmente a peces de la zona, aves y personas que consuman esos pescados y especies que acumulen los tóxicos, principalmente por su entrada en la cadena trófica.
Sedimentos y suelos limítrofes (o alejados)	Cu, Mg, P, Pb, Ti, V, Zn, Cd, Tb, Tl, Li, Cr, Sr, Y, Sn y Ba	Productos de consumo que puedan

afectados por
deposición de material
particulado del aire)

verse afectados a
través de la cadena
trófica del estuario,
especialmente
cultivos agrícolas.

Suelos de zonas
juegos y recreo
infantiles y de adultos

**En Anexo 6.6 (Tabla) se resume la toxicidad intrínseca y principales efectos en salud asociados a cada uno de los contaminantes antes descritos. ** Puntos de exposición no testados.*

Igualmente debería poderse aplicar algún modelo de dispersión de los contaminantes en el medio acuático para discernir hasta dónde pueden desplazarse estos metales pesados y cuáles son las costas afectadas. Esta información debería poder ofrecerla Fertiberia, como empresa responsable de la contaminación generada. Como alternativa, desde la Universidad de Huelva, en colaboración con expertos de este comité, se está llevando a cabo un estudio de caracterización de metales pesados en poliquetos, cangrejos, pescados y plantas de la zona, y en agua de lluvia recogida en distintos puntos de la ciudad a lo largo de dos años (lavado de metales pesados en suspensión en la atmósfera). Una vez caracterizada la población habría que recabar datos de sus características antropométricas medias y de ciertas pautas de consumo, especialmente en lo referente a consumo de alimentos potencialmente afectados. No obstante, parece perentorio en base a los datos presentados anteriormente actuar y evitar la emisión de partículas a la atmósfera y asegurar la estanqueidad de las balsas.

Los posibles impactos en la salud asociados a la exposición por todas estas vías de contaminantes tan peligrosos como el arsénico, el cadmio o el fluorhídrico se ve acrecentado por la amenaza de colapso de las balsas como apuntan los estudios de geoestabilidad e hidrogeología presentados con anterioridad, riesgo que aumenta ante eventos meteorológicos extremos cada vez más frecuentes asociados al fenómeno de cambio climático.

3.6.3.- Estudios epidemiológicos llevados a cabo en relación a la balsa de fosfoyesos

Para valorar de forma objetiva y correcta el posible impacto en la salud de la población del Proyecto RESTORE es imprescindible conocer qué sustancias pueden llegar a la población. Una vez identificadas dichas sustancias, se deberían hacer estudios para conocer la magnitud de la exposición atribuible a las balsas y su movilización según previsto en el proyecto RESTORE. Una vez conocidas las dosis de exposición, se puede consultar la literatura científica para conocer cuales son los efectos en salud esperables que se encontrarían en la población teniendo en cuenta las dosis de exposición. Y el último paso es comprobar si en las zonas con mayor exposición de la población se observa un aumento de dichos efectos en la salud (enfermedades). Para ello es imprescindible que la administración facilite datos sobre la frecuencia de dichas enfermedades en las zonas de estudio. Sin embargo, a pesar de haber solicitado la información sobre dichas estadísticas, la administración no ha facilitado los datos. La falta de acceso a datos de morbi-mortalidad desagregados a nivel censal recientes ha imposibilitado a este Comité poder sacar algunas conclusiones sobre la evolución de ciertas afecciones relacionadas con la exposición a los contaminantes identificados en relación a las balsas de fosfoyesos de forma específica.

Hay otros estudios previos más generales como el elaborado desde la Escuela Andaluza de Salud Pública (EASP) para el Defensor del Pueblo sobre “*Situación Actual de la Ría de Huelva*” (Daponte *et al.*, 2010) o el “*Dictamen realizado por*

encargo del Defensor del Pueblo Andaluz sobre El exceso de mortalidad y morbilidad detectado en varias investigaciones en La Ría de Huelva” elaborado por el Grupo de Trabajo de la SEE en 2014. Este último hace hincapié en un elemento muy relevante, las desigualdades en salud y el tema de justicia ambiental por cuanto, el deterioro ambiental afecta con mayor frecuencia a los sectores más desfavorecidos de la sociedad, hecho que debería analizarse en detalle en relación a la localización de los barrios en las proximidades de las balsas. De estos estudios se deduce además que la mortalidad general y por las principales causas de muerte en el occidente andaluz, y en concreto en la provincia y Ría de Huelva se ha mantenido a lo largo de los años por encima de la media nacional, destacando en especial el exceso de mortalidad observado en hombres desde los 15 años.

Especial mención requiere la problemática de las sustancias NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) presentes en la balsa como el uranio natural, y su peligro potencial para la salud pública. Dichos elementos pueden emitir partículas de tipo alfa, de corto alcance e incapaces de atravesar la piel de las personas, pero potencialmente peligrosas si entran en la cadena trófica o si son inhaladas. Se han realizado estudios de caracterización radiológica de las balsas. Los estudios del CSIC, Universidad de Huelva (UHu) y Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) han aportado amplia información en contra de que exista riesgo relevante por radiación para la población general, y los últimos estudios muestran que tampoco para los trabajadores (Bolívar y cols, 2013). Tan sólo un estudio encargado por Greenpeace a la Comisión para la Investigación e Información Independiente sobre Radioactividad (CRIIRAD por sus siglas en francés) presenta resultados discordantes. El CRIIRAD solamente hizo mediciones sobre fosfoyeso y aguas de escorrentía. El CSIC, la UHU y el CSN realizó un mapa dosimétrico de la superficie de fosfoyeso actual y el CRIIRAD no ha expuesto ninguno. Los resultados del CRIIRAD presentan mayores niveles de radiación que los del CSIC, la UHU y el CSN, seguramente por una selección arbitraria de los puntos de muestreo de cara a realizar las mediciones. Esto no invalida el trabajo del CRIIRAD, pero limita sus conclusiones, y no permite generalizarlas. Ante una superficie de 1200 Ha, y una elevada heterogeneidad en la composición del terreno, pueden quedar dudas sobre la representatividad de las muestras analizadas en todos los estudios hechos para la totalidad de la balsa. En dicho sentido, habría un problema potencial si partículas con uranio son resuspendidas en el aire, o si se acumulan en alimentos y llegan a la población. En tanto la granulometría de las partículas de polvo superficial de las balsas es gruesa, dicha resuspensión sería improbable y a corta distancia. Pero descartar que los radionúcleos de las balsas no llegan a la población solo puede hacerse con estudios específicos, que a nuestro conocimiento no se han realizado. Además hay que tener en cuenta el depósito de residuos con Cesio en las balsas provenientes del accidente en la empresa Acerinox.

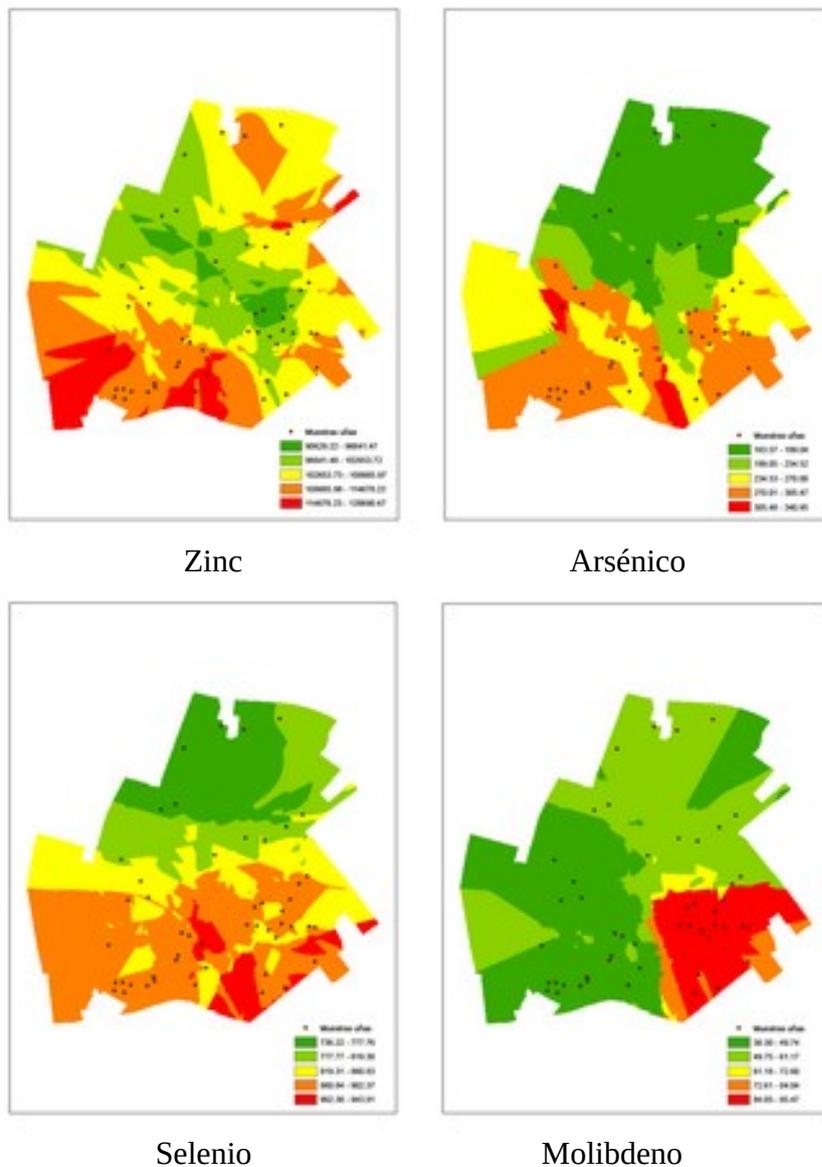
3.6.4.- Estudios de asociación de base individual

Se ha llevado a cabo un análisis geoespacial de los niveles de metales en uñas en 50 personas sanas de entre 35 y 80 años de edad residentes en la ciudad de Huelva teniendo en cuenta la proximidad de sus domicilios a las balsas de fosfoyesos. Se utilizó el método Kriging de interpolación espacial, a fin de crear superficies continuas de cada uno de los metales analizados a partir de los datos, consistentes en 50 muestras de uñas pertenecientes a residentes en Huelva ciudad, lo que permitió visualizar los patrones espaciales asociados a dichos metales en las áreas

desconocidas de la ciudad. Los mapas de interpolación espacial y de patrones de distribución se elaboraron con el software ArcGIS 10.5 for Desktop (Esri Inc. USA).

Se analizaron los siguientes metales a partir de las muestras en uñas (que reflejan exposición acumulada) de los participantes en el estudio: zinc, aluminio, hierro, cobre, níquel, cadmio, arsénico, uranio, vanadio, manganeso, cobalto, selenio, molibdeno, talio y cromo. En la Fig. 3.15 se presentan los mapas de los patrones espaciales obtenidos a partir de la interpolación espacial Kriging para cada uno de ellos

En ellos podemos observar como para el zinc, el arsénico, el selenio y el molibdeno las zonas urbanas más próximas a las balsas de fosfoyesos presentan altos valores de estos metales. En el caso del cobre se observa mayor acumulación en zonas cercanas al polo químico y las balsas, y para uranio, se observa un patrón de acumulación en las proximidades de las instalaciones industriales del polo químico de Huelva y las balsas, y en la parte noreste de la ciudad. Para los metales reseñados, estos resultados son altamente compatibles con la llegada de dichas sustancias desde la balsa de fosfoyesos en condiciones basales, sin movimiento intensivo de maquinaria.



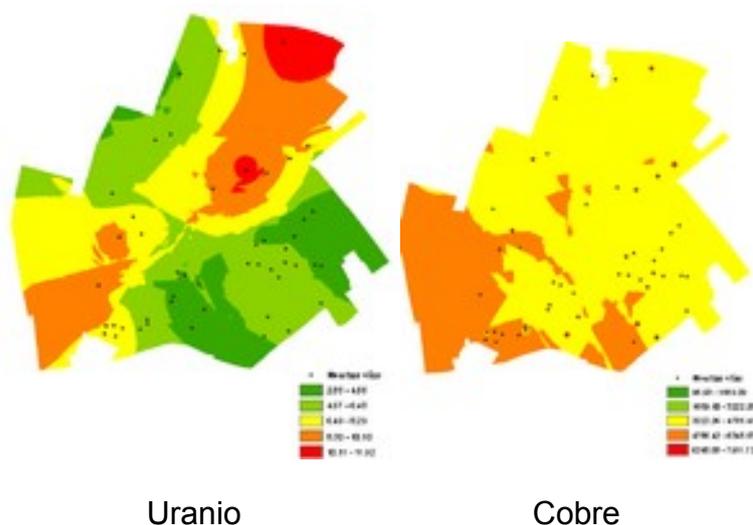


Figura 3.15.- Mapas de patrones de exposición acumuladas a metales.

3.6.5. Estudios de percepción ciudadana sobre su salud.

Conocer las actitudes de la población ante un riesgo potencial para la salud, la percepción que tienen los ciudadanos sobre los impactos potenciales, las estrategias que llevan a cabo para protegerse, sus preocupaciones y expectativas, es un paso previo fundamental para una adecuada gestión del riesgo. Además, la posible preocupación de la población contribuye en sí misma al estado de salud general de las personas, por cuanto puede generar estados de ansiedad y otros problemas de salud mental.

En el caso de la problemática de la balsa de fosfoyesos, existían dos versiones opuestas sobre la magnitud (mucho vs. poca) de la importancia de la problemática para la población. Es por ello que desde este comité de expertos se ha llevado a cabo una encuesta en una muestra estadísticamente representativa de la población general de la conurbación de Huelva capital donde se han analizado factores de la percepción asociada a la problemática de las balsas de fosfoyesos (Sala et al., 2022).

En general destacamos como conclusiones más relevantes los siguientes tres puntos:

- Las balsas de fosfoyesos son percibidas como una amenaza más peligrosa que la contaminación atmosférica o los residuos de la minería en la Ría. De hecho, 8 de cada 10 habitantes considera que los riesgos de los fosfoyesos son una amenaza directa para su salud.
- Además, 7 de cada 10 encuestados admiten sentirse preocupados por el posible impacto de las balsas en su salud. El posible impacto de las balsas en el medio ambiente y en la imagen exterior de la ciudad todavía resultan más preocupantes para los residentes.
- Los habitantes de Huelva sienten que no pueden protegerse frente a los riesgos de las balsas. Menos de un 20% cree que puede hacer algo para reducir el riesgo de las balsas en su salud.

Estas preocupaciones de la ciudadanía coinciden con las expresadas por la mayoría de asociaciones ciudadanas que fueron invitadas por el comité a participar en una reunión para transmitir sus preocupaciones. En dicha reunión también se reivindicó por varias asociaciones y partidos políticos la recuperación total del espacio de las balsas para disfrute de la ciudadanía onubense.

4.- Análisis y revisión del proyecto de Fertiberia

4.1.- Respecto a Geología de subsuelo

4.1.1.- Marco Geológico.

Del análisis y revisión respecto del Marco Geológico recogido en el proyecto de Fertiberia, se desprende que se han utilizado datos bibliográficos antiguos y que reflejan un conocimiento incompleto de la geología a escala local. Los datos utilizados son de escala regional y provincial. Esto hace que el conocimiento geológico sobre el que se basa el Proyecto sea obsoleto, impreciso e incompleto. Por ello se necesita reformular el marco geológico partiendo de los datos regionales y locales ya conocidos, pero realizando un análisis de detalle de la Geología local, haciendo hincapié en la anisotropía del sustrato que soporta las balsas y la obtención de datos geotécnicos actualizados y más completos. Hay que señalar que muchos de los datos geotécnicos obtenidos por la empresa corresponden a campañas separadas por muchos años entre ellas y que reflejan situaciones de las acumulaciones de fosfoyesos muy diferentes.

4.1.2.- Deformación del Sustrato Sedimentario y Subsistencia/Hundimiento del apilamiento de la Zona 2.

En el **“TEXTO REFUNDIDO PROYECTO CONSTRUCTIVO Y ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CLAUSURA DE LAS BALSAS DE FOSFOYESOS DE FERTIBERIA EN HUELVA”** se recoge el siguiente párrafo (apartado 1.5 párrafo 2 de la página 25):

“Informe Científico Técnico del Comité de Expertos, de la Universidad de Huelva”, firmado por el Director de dicho Comité, el Dr. José Borrego Flores, el 19 de Abril de 2017. El Informe Científico Técnico plantea, además, otras problemáticas en relación con el propio asentamiento de los fosfoyesos en los depósitos sedimentarios de marisma, basándose en datos propios de Geofísica (Perfiles Sísmicos superficiales de Alta Resolución), vulnerabilidad a tsunamis, etc. pero estas problemáticas no serán objeto del presente Informe.

Es muy evidente que conociendo los datos de deformación del sustrato no se les considera en el análisis de la estabilidad estructural del apilamiento de la zona 2.

Respecto a la subsidencia, hundimiento y deformación laterales, en el proyecto se recogen en la página 21 párrafo 3 y 4. Apartado 1.4.2 Asientos.

El resumen y conclusiones del Cálculo de asientos del apilamiento de fosfoyesos en la Marisma del Rincón (Huelva), son las siguientes:

“La deformación vertical del apilamiento de fosfoyesos tiene una muy marcada componente edométrica, es decir, la zona de afección de los asientos es muy reducida. Esto es debido a que en planta presenta una muy grande extensión (1.300 a 2.000m) en relación al espesor de suelo muy blando consolidable (del orden de 5 a 25m de marismas arcillosas), por lo que el terreno natural que no se encuentra bajo los derrames exteriores del apilamiento no puede deformarse lateralmente.”

De nuevo no se tienen en cuenta ni el hundimiento diferencial (que afecta a todo el apilamiento de la Zona 2), ni que la deformación perimetral observada en el sustrato de soporte pueda afectar a los derrames exteriores del apilamiento. Todo lo anterior

nos permiten afirmar que se debe de realizar un exhaustivo análisis de cómo afecta la deformación del sustrato y el elevado hundimiento del sector apical de la Zona 2 sobre la estabilidad estructural de dicho apilamiento, con el fin de descartar futuros problemas de estabilidad que puedan dar lugar al colapso de la estructura.

4.1.3.- Fallas y Actividad Sísmica.

Respecto a la presencia de Fallas en el entorno o en el sustrato portante de las Balsas, el proyecto de Fertiberia recoge un informe emitido por EPTISA: **Informe sobre la Posibilidad de fallas activas, en el entorno de Huelva.**

Página 46, párrafo 2 del apartado 6:

“Las características termoeléctricas de los perfiles realizados se observa en la figura 32. Aunque, en una primera impresión, determinadas anomalías subverticales podrían dar lugar a ser interpretadas como fracturas, ello se debe ser tomado con precaución al no ser este el objetivo del estudio tomográfico realizado. Además, quizá tampoco sea este el método geofísico más apropiado para la detección de fracturas, en un contexto litológico-hidrogeológico como el presente en los depósitos de fosfoyesos”.

La figura 4.1 recoge diferentes perfiles donde se muestran las características termoeléctricas del apilamiento de la Zona 2.

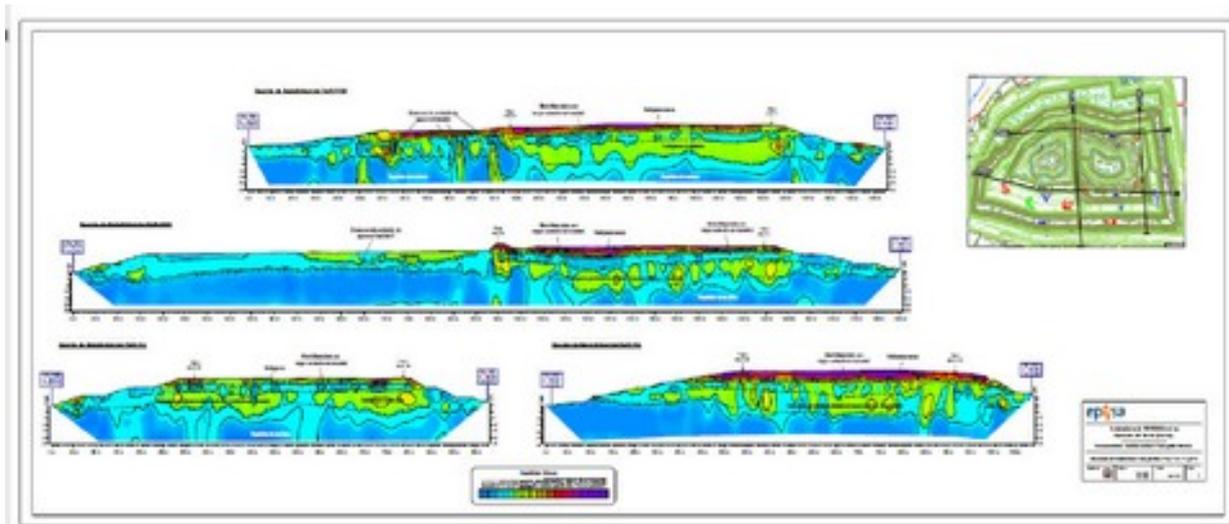


Figura 4.1.- Perfiles Tomográficos del apilamiento de la Zona 2, realizados por EPTISA.

En estos registros se observan claramente anomalías subverticales, compatibles con fracturas en el interior del apilamiento y que pueden estar asociadas a fallas del sustrato que las soporta. Parece lógico que para una obra de estas características se deba realizar un análisis profundo de estas anomalías; máxime cuando en el análisis de la sismicidad local se afirma: *“A partir de los terremotos se demuestra la dimensión fractal del proceso de fracturación en relación con la reactivación de fallas sometidas a un campo de esfuerzos regional que extiende el “forebulge” de la cuenca del Guadalquivir”.* Por todo lo anterior se debe afirmar que el proyecto RESTORE carece de un estudio válido de la posibilidad de la existencia de Fallas que podrían afectar gravemente a la estabilidad estructural de los apilamientos de fosfoyesos.

4.1.4.- Estructuras Deltaicas.

En el proyecto presentado por Fertiberia no se recoge la presencia de estas estructuras a lo largo de las Zonas 1, 2, 3 y 4. Por lo tanto no se proponen medidas correctoras que impidan la interconexión hidráulica entre los canales mareales y el interior de las balsas, que permiten el paso de elementos contaminantes desde las balsas al sistema estuarino.

4.2.- Respecto a la Hidrogeología y calidad del agua

4.2.1. Deficiencias en el estudio hidrogeológico y de calidad de las aguas

Como se ha comentado en el apartado 3.2, los fosfoyesos depositados sobre las marismas del Rincón y de Mendaña se comportan como un acuífero que almacena aguas ácidas (pH en torno a 1.6), con elevadísimas concentraciones de fosfatos, fluoruros, As, Cd, Cr, Cu y otros contaminantes. En la actualidad, se siguen produciendo vertidos contaminantes a la Ría del Tinto por aguas ácidas de los fosfoyesos a través de las denominadas ‘salidas de borde’ situadas en el perímetro de todas las zonas de los apilamientos de fosfoyesos. El proyecto de clausura no contempla ninguna actuación sobre las denominadas zonas 1 y 4, pues las considera ya restauradas. Sin embargo, la única actuación realizada consistió en cubrir los fosfoyesos con tierra vegetal, de forma que no están aislados y siguen liberando contaminantes en forma de salidas de borde.

El modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico descrito en la documentación aportada no es correcto, ya que desprecia la recarga en profundidad que tiene lugar a través del basamento. El informe le otorga importancia únicamente a la recarga superficial; sin embargo, no se puede obviar la recarga de agua a través del estuario. Existe una fuerte conexión entre el agua estuarina y las salidas de borde como lo demuestra las relaciones hidroquímicas, y por tanto, el origen de estas salidas perimetrales debe estar relacionado con una entrada de agua intermareal a través de canales secundarios mareales hacia la balsa. La última modificación del Proyecto de Clausura incluye el sellado de los canales mareales con barreras de yeso fraguado y arcillas, junto con una red de control de drenaje perimetral. Sin embargo, no se contempla el tratamiento (activo o pasivo) de las posibles salidas de borde que se generen una vez clausurada la balsa.

Los fosfoyesos se disponen sobre materiales arcillosos y limosos de marismas de baja conductividad hidráulica. Sin embargo, existen varias capas arenosas y de gravas en profundidad que actúan como niveles acuíferos. La más profunda, denominada formación PT2a (Niveles Detríticos Inferiores), está situada justo encima de las margas azules neógenas y presenta una continuidad lateral bajo la zona ocupada por los fosfoyesos. Este nivel contiene aguas con valores de pH neutro y una conductividad próxima a 2 mS/cm pertenece a la Masa de Agua Subterránea Niebla (código 30593 en la planificación hidrológica). Además, existen piezómetros realizados en las balsas con aguas neutras y salinidades próximas al agua de mar, que deben corresponder a aguas congénitas al depósito de los materiales arcillosos de marismas. Sin embargo, existen perforaciones en la zona que permiten la conexión hidráulica entre diferentes niveles en la vertical. Estas perforaciones pueden servir de vías preferenciales de permeabilidad produciendo la contaminación de los niveles acuíferos inferiores. Sin embargo, no existe un inventario adecuado de estas perforaciones que se deben sellar para que no se produzca un flujo de las aguas ácidas de los fosfoyesos hacia el acuífero infrayacente.

La utilización de bentonita sódica como material de sellado de las perforaciones existentes no es adecuada con aguas de gran salinidad, como son las de los fosfoyesos y las aguas congénitas de los materiales arcillosos de marismas. Debe sustituirse por cementos u otro tipo de arcillas que garanticen el aislamiento a largo plazo entre el nivel acuífero inferior y las aguas ácidas de los fosfoyesos.

Los fosfoyesos están constituidos fundamentalmente por sulfato cálcico que tiene una solubilidad elevada, de forma que el agua de las precipitaciones o la que entra del estuario a

través de canales mareales circula a través de los fosfoyesos y produce su disolución, creando cavidades en un proceso conocido como karstificación. Este aspecto tiene una enorme implicación en el comportamiento del flujo de agua dentro del apilamiento, pero no se conoce adecuadamente, por lo que debe ser investigado. De hecho, en la documentación aportada por la empresa existen incongruencias entre sus distintos apartados ya que algunos indican la casi inexistente probabilidad de karstificación mientras que en otros se reconocen indicios de este proceso.

4.2.2. Deficiencias del modelo hidrogeológico considerado en el proyecto de clausura

Las diferentes deficiencias encontradas en el modelo hidrogeológico considerado por Fertiberia se enumeran a continuación:

- En el modelo hidrogeológico incluido en el Proyecto de Clausura no se justifican adecuadamente las geometrías de las unidades hidroestratigráficas modeladas. No se tienen en cuenta la geometría interna ni los parámetros hidráulicos de los diversos materiales del depósito. No se explica cómo y qué tipos de ensayos han permitido cuantificar dichos parámetros (solo se considera la permeabilidad). Los valores de permeabilidad utilizados son extremadamente bajos (permeabilidad horizontal 5×10^{-7} m/s y vertical 5×10^{-8} m/s) y no parecen coherentes.
- El modelo matemático realizado sólo se considera un modelo interpretativo y sólo se genera una sección 2D. Por tanto no tienen capacidad cuantitativa.
- No se justifica el que previamente se considere que el flujo no es difuso. En este sentido no se tienen en cuenta los efectos de las disoluciones y hundimientos por karstificación previamente descritos.
- No se justifica si existen flujos verticales por efectos de densidad variable. La modelación se ha hecho a densidad constante igual a 1.
- Las condiciones de contorno del modelo no se justifican. Por ejemplo: se comenta que “La recarga superficial sobre el apilamiento de fosfoyesos correspondiente a la infiltración de una fracción del agua de lluvia”. Debe justificarse el valor utilizado indicando que cifra se ha considerado y como ha sido calculado.
- No se muestra ajuste con los niveles piezométricos medidos en piezómetros del interior o exterior del apilamiento, de forma que el resultado obtenido por la piezometría es cualitativo.
- No se comenta si ha existido un proceso de calibración del modelo. No se comentan parámetros de partida ni parámetros calibrados finales.
- El resultado del balance no es cuantitativo ya que las condiciones de contorno (entrada por recarga) se han impuesto, y no se ha contrastado ni justificado de forma adecuada, ni siquiera se muestra un análisis de sensibilidad. Además la geometría que representa la sección modelada representa un cuerpo de apilamiento tabular de longitud indeterminada, siendo el depósito una forma aproximada de tronco de pirámide cuadrangular. Los flujos cuantificados deben corregirse teniendo en cuenta dicha geometría.
- No se ha modelado el transporte del potencial contaminante del apilamiento (dirección, salidas, concentraciones, tasas y variaciones interanuales) respecto a las salidas a las aguas superficiales o subterráneas de la marisma. Tampoco aporta información relevante para el cálculo o la observación de aspectos relacionados con la deformación de sustrato de la marisma o la estabilidad del depósito. Por todo ello, se considera que el modelo utilizado no tiene validez cuantitativa y su representatividad es muy limitada.
- El modelo numérico hidrogeológico realizado por el Subgrupo de Hidrogeología de este Comité (ver Anexo sobre el modelo), se encuentra operativo para abordar los escenarios que sean considerados. El modelo respeta las geometrías internas, tanto del depósito de fosfoyesos como las de las unidades hidroestratigráficas y el balance de masas calculado numéricamente es congruente con el balance estimado conceptualmente. Los ajustes

obtenidos entre los niveles piezométricos observados y calculados son satisfactorios, como así también lo son los coeficientes estadísticos alcanzados. Las conductividades hidráulicas calibradas son coherentes con las revisadas en la bibliografía y realísticas con las unidades representadas. Este modelo constituye una herramienta fiable para abordar los escenarios de gestión ambiental del proyecto de clausura de las balsas de fosfoyesos, su uso debe entenderse a escala local.

4.3.- Respecto a la evaluación radiológica

Las principales conclusiones obtenidas en los diferentes estudios son:

4.3.1.- Exhalación de radón y concentraciones en Huelva

La tasa de exhalación de Rn promedia en la superficie de las balsas de FY sin cubrir está en torno a los (1-3) kBq m⁻² h⁻¹, unas 20-30 veces superior a un suelo típico no perturbado.

Una capa de tierra vegetal de unos 30-40 cm reduce la exhalación del Rn en un máximo de un 20%, dependiendo de la granulometría del suelo usado para la cubrición.

Por el contrario, el uso de una geomembrana similar a la prevista en el proyecto de restauración logra reducir la tasa de exhalación en un factor 30-40, llegando a valores incluso por debajo de la exhalación natural promedio de un suelo, que está en unos 40 Bq m⁻² h⁻¹. Estos resultados demuestran que el uso de una geomembrana es adecuado y recomendable para evitar la emisión de gas radón desde la balsa de fosfoyeso a la atmósfera.

Es importante asegurar un correcto sellado de la geomembrana, evitando grietas y roturas que permitan la formación de “chimeneas” de radón que favorezcan su transporte hacia la atmósfera. Incluso con la existencia de estos caminos preferenciales, los resultados de los experimentos en laboratorio muestran que la combinación de geomembrana + 60 cm de arcilla + 40 cm de tierra vegetal es capaz de reducir la exhalación en más del 40 %.

Mediante el estudio y análisis de la base de datos de Rn que el grupo de investigación FRYMA posee, tanto de datos propios como de la red de vigilancia nacional REVIRA del CSN, se ha demostrado que el incremento máximo de la concentración de Rn en la ciudad de Huelva es inferior a los 2 Bq/m³, lo cual no es significativo desde el punto de vista radiológico. El nivel máximo de concentración de Rn en el aire de las viviendas recomendado en España por la Guía de Seguridad GS 11-02 del CSN es de 300 Bq/m³, referido al promedio anual de la concentración de radón.

Por tanto, si las condiciones técnicas previstas en el proyecto de restauración de los depósitos de fosfoyeso se cumplen, se puede afirmar que la tasa de exhalación de Rn se reducirá a valores de fondo, y por tanto el incremento de dosis por radón sobre los habitantes de su entorno será despreciable.

4.3.2.- Inhalación de material particulado (FY) resuspendido desde las balsas

Estudios han demostrado que la resuspensión de FY en las condiciones actuales (sin restaurar) es pequeña debido a que cuando la superficie de la balsa se seca, se produce una especie de “fraguado” que endurece los primeros 2-4 cm de FY, formando una dura costra que impide que material particulado más fino del FY se re-suspenda y se transporte con el viento. Este hecho se constató mediante observación directa “in situ”, y también mediante la medida de filtros

atmosféricos en Huelva ciudad y en la estación de bombeo, los cuales no indicaron incrementos de concentraciones de elementos característicos del FY (P, S, Ca, etc.)

4.3.3.- Irradiación externa

Los fosfoyesos normales “sin cubrir” producen unas tasas de dosis efectivas anuales máximas a los trabajadores que realizan labores de mantenimiento en torno a 0.4 mSv/a el cual no llega al 50% del límite para el público general, que es 1 mSv/a.

Los fosfoyesos blancos, una vez sellados con las capas previstas en el proyecto no generan un incremento de dosis efectiva ni sobre los trabajadores ni sobre la población.

Durante las labores de restauración de los FY está previsto un sistema de prevención de riesgos laborales con uso de mascarillas, y que además controlará el polvo existente en el interior y en el entorno de las balsas. Este plan de control radiológico de los trabajadores informará periódicamente al CSN de las dosis radiológicas efectivas mensuales recibidas por los trabajadores más expuestos, que serán aquellos que trabajen en las zonas de fosfoyesos negros.

A partir de simulaciones realizadas con el código de cálculo RESRAD se puede concluir que mediante la dilución de los fosfoyesos negros con fosfoyesos convencionales en una proporción de 1 a 7, y su posterior cubrición con 0.5 metros de fosfoyesos blancos, más su posterior cubrición con geomembrana/arcilla/suelo, la exposición a radiaciones ionizantes por la población del entorno de los apilamientos de fosfoyeso, una vez concluida la restauración proyectada cumplirá los criterios radiológicos establecidos por el CSN para el individuo más expuesto en el escenario recreativo: a) < 0.3 mSv/a; b) < 300 Bq/m³ de radón en la hipotética vivienda situada en el emplazamiento.

4.3.4.- Ingestión (agua y material sólido), e incorporación a través de la piel.

Estas vías de incorporación de radionucleidos hacia las personas no se consideran ya que los fosfoyesos nunca entrarán en contacto con las personas que realicen actividades recreativas sobre las balsas en las condiciones previstas en el proyecto de restauración.

4.3.5.- Otras consideraciones radiológicas

Tanto en la DIA como en el informe del CSN sobre el proyecto constructivo y estudio de impacto ambiental de la clausura de las balsas de fosfoyesos de FERTIBERIA SA en Huelva, se establece un condicionado adecuado para el control radiológico de las obras del proyecto de clausura, así como de los 30 años posteriores a su finalización. Las herramientas principales con que cuenta son:

- Un Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental (PVRA), que deberá: a) iniciarse antes del comienzo del proyecto de clausura, de forma que permita disponer de un valor de referencia para aguas superficiales y sedimentos; b) establecer frecuencias de muestreo; c) el laboratorio que realice las medidas radiactivas contará con un sistema de garantía de calidad que permita garantizar su competencia.
- Plan de acondicionamiento, gestión y vigilancia de materiales con especial significación radiológica, con especial atención en los que incluya fosfoyesos negros y eflorescencias.
- Se recomienda que se verifique in situ que la propuesta de gestión de los fosfoyesos negros (dilución con FY convencional en proporción 1/7), es adecuada y cumple los

criterios radiológicos establecidos bajo el escenario recreativo, tanto a nivel de dosimetría externa como de radón.

- Se realizará un control de las eflorescencias existentes sobre la superficie de los depósitos, ya que diferentes estudios han demostrado que estos nuevos materiales se forman durante los ciclos hidrológicos naturales por procesos de disolución/evaporación/precipitación, haciendo que los radionucleidos y otras especies químicas presentes se puedan concentrar, o en algunos casos diluir, con relación a sus valores iniciales en el FY. Por ello, se presentará una caracterización adecuada de estos materiales (cantidades, zonas de ocurrencia y concentraciones de actividad de los radionucleidos de interés).
- En base a esa caracterización realizada en el punto anterior, se llevará a cabo un análisis de las alternativas para la gestión de estos materiales conforme a la Orden IET/1946/2013, de 17 de octubre, por la que se regula la gestión de los residuos generados en las actividades que utilizan materiales que contienen radionucleidos naturales.

4.4.- Respecto a la calidad del aire

El 27 de abril de 2017 se presentan alegaciones dentro del procedimiento de información pública al “Proyecto constructivo de clausura de las balsas de fosfoyesos situadas en el término municipal de Huelva”, de acuerdo con BOE del 13 de marzo de 2017. El documento fue firmado por de la Rosa y Querol, siendo elaborado a partir de los datos preliminares obtenidos en el informe de justificación del Proyecto CGL2014-54637-P (<https://bit.ly/3akbgFx>). A continuación, se detallan algunos puntos de estas alegaciones, que no fueron tenidos en cuenta por parte de FERTIBERIA al Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España, y que han sido reafirmados por los estudios publicados por la Unidad Asociada al CSIC-UHU “Contaminación Atmosférica” entre los años 2019 y 2020.

El modelo de restauración de los depósitos de fosfoyesos no devuelve la marisma a su estado original. No se contempla el desalajo de los lixiviados ácidos ni las sales bandeadas. Mientras existan, se producirán emisiones de HF a la atmósfera.

Se constata que la balsa 3 es una trampa química con elementos potencialmente tóxicos para el medio ambiente y la salud pública. Estos elementos han sido acumulados desde hace 20 años, generando emisiones de aerosoles ácidos, de F, S y F, conjuntamente con altas concentraciones de U, Cd, As y Se entre otros contaminantes. Por si mismo, los lixiviados y sales bandeadas dejan de ser fosfoyeso (s.s.), por lo cual, conceptualmente deja de ser válido el modelo de restauración de la balsa 3, si se realiza de la misma forma que la balsa 2 (fosfoyesos).

También se observa que la presencia y dinámica de los lixiviados son desde el punto de vista ambiental muy relevantes, no siendo evaluada en la EIA.

En verano, la tasa de emisión de HF alcanza 15 mg/ha/día desde los fosfoyesos y sales bandeadas, siendo muy superior si se considera la evaporación de HF desde los lixiviados (hasta 2.8 kg/ha día). En invierno, las tasas de emisión se reducen un 50% desde los fosfoyesos y sales. En la ciudad de Huelva se ha alcanzado niveles bajos de HF en aire ambiente (entre 1-0.8 µg/m³) similares a los de Matalascañas en modo baja resolución temporal, aunque se han determinado picos horarios mediante medidas de alta resolución temporal y reproducibles con el modelo CALPUFF. Este modelo de dispersión considerando las emisiones de HF desde el sistema fosfoyesos no se han tenido en cuenta en la EIA.

La contribución de fuentes de partículas sedimentables derivadas de las balsas de fosfoyesos no supera el 5% de la contribución total a 500 m de las balsas. A esta misma distancia, los niveles

son 5 veces inferiores que en el centro de la balsa. A 1 km, los niveles de PSD son 50 veces inferiores. Por ello, es conveniente un plan de vigilancia alrededor de un cinturón de seguridad de 500 m de distancia del límite de las balsas 2 y 3, para la medida de niveles de PSD y otros contaminantes en el aire no convencionales tales como HF (vapor) y F en PSD.

Las emisiones fugitivas de HF, HCl y H₃PO₄ a la atmósfera durante la evaporación de un 75% de 1 hm³ de lixiviado durante 15 días, supone la emisión de 1.5 Tn F, 2.4 Tn de Cl y 9.2 Tn de P, lo cual puede ocurrir varias veces al año. Estas emisiones no han sido consideradas por parte de FERTIBERIA, por lo que no constan en el Registro Europeo de Emisiones de Sustancias Contaminantes (EPER, <https://bit.ly/3ReoeoU>), siendo obligatorio su declaración al igual que otras emisiones canalizadas a la atmósfera. Esto supondría añadir alrededor de un 60% más de HF por emisiones derivadas de la balsa 3. Aparte de su declaración, era deseable que se impidiera su evaporación para evitar la incidencia de este contaminante en la calidad del aire de Huelva.

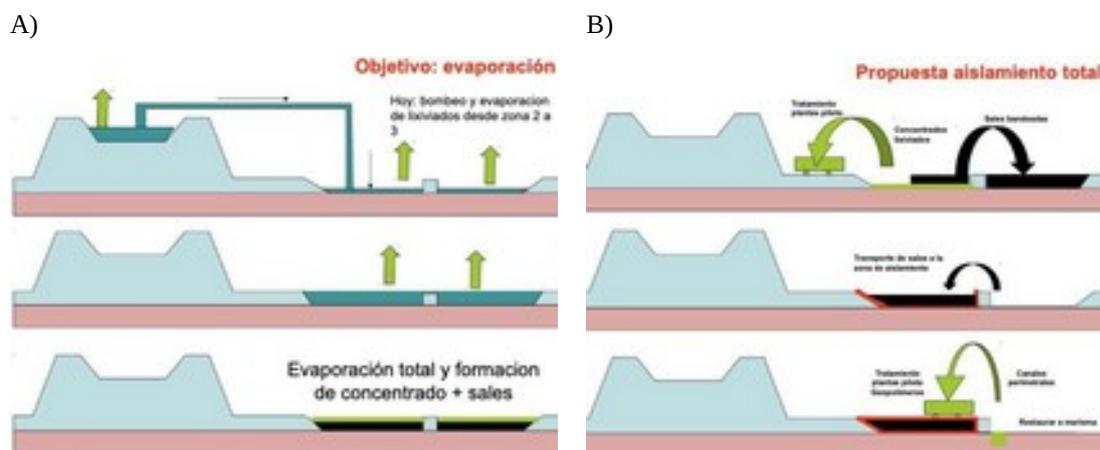


Figura 4.2.- A) Modelo de evaporación actual de la balsa 3 consistente en el transporte de lixiviados y evaporación con la formación de concentrados y sales bandeadas. B) Modelo alternativo de restauración de este estudio consistente en el aislamiento integral de las sales bandeadas y tratamiento de lixiviados concentrados en plantas piloto para el aprovechamiento de metales críticos y producción de geopolímeros.

El residuo sólido originado a partir de la evaporación de 1 hm³ origina 189 Tn U, 220 Tn de V, 244 Tn Cr, 383 Tn de Zn y 67.1 de Cd. Estos elementos, además de altamente tóxicos en el medio ambiente, son susceptibles de ser recuperados en un contexto de economía circular. La extracción de las sales y lixiviados con alta concentración de metales debe realizarse en el mes de septiembre, coincidiendo con la finalización del periodo de máxima evaporación anual.

Finalmente, se propone un modelo de restauración para la balsa 3 alternativo a RESTORE 2030 (<https://restore2030.com/>) consistente en el aislamiento integral de las sales bandeadas y eliminación de lixiviados ácidos para tratamiento en plantas piloto especializadas para el aprovechamiento de elementos críticos (Fig 4.2). De esta forma, se restaura no solamente los elementos del sistema fosfoyeso (lixiviados, sales y fosfoyesos), sino además hasta un 50% de la marisma.

El Proyecto Básico de Ingeniería de este modelo fue evaluado en 35.3 Meuros por Algaida Ingenieros en el año 2017, con una duración de 10 años.

4.5.- Respecto al impacto ecológico

En general, *el proyecto que plantea la empresa Fertiberia para la clausura de los apilamientos de fosfoyesos en las Marismas del Tinto adolece de importantes deficiencias desde un punto de vista ecológico*. Entre estas carencias destacan seis aspectos:

1.- Análisis insuficiente de las posibilidades de valoración de los fosfoyesos como materias primas para la extracción de productos útiles en diferentes procesos productivos. Esta alternativa generaría empleo en la zona y conlleva su retirada gradual de las Marismas del Tinto y su posterior restauración ecológica.

2.- Zona de actuación mal definida. La Zona 1 se da por restaurada y, por lo tanto, no se actúa en ella. Sin embargo, esta zona vierte altas concentraciones de contaminantes a la Ría del Tinto a través de los canales mareales.

3.- Ausencia de medidas compensatorias para la creación de nuevas marismas costeras que, al menos, compensasen las que permanecerían ocupadas por fosfoyesos. Estas medidas compensatorias deberían incluir la creación de nuevas marismas mareales en una superficie igual a la ocupada por los fosfoyesos (aproximadamente 1200 hectáreas).

4.- Se ignora la situación actual de cambio climático global y la subida del nivel del mar asociada. Esto se refleja, por ejemplo, en la falta de desarrollo de medidas adecuadas para luchar contra la erosión. Erosión provocada tanto en la periferia de las balsas por el flujo y reflujo de las mareas y el oleaje junto con la subida del nivel del mar (cerca de 3.8 cm por década en la zona), como en el material que debe colocarse sobre los fosfoyesos por las cada vez más frecuentes lluvias torrenciales. Además, este aumento de lluvias torrenciales podría aumentar las posibilidades de inundación de la zona de las balsas por las avenidas del Río Tinto, aspecto que tampoco se recoge convenientemente en el proyecto.

5.- La zona de actuación podría convertirse en una trampa ecológica, pues se plantean como objetivos que ‘durante el seguimiento de las fases de clausura y post-clausura se tomarán las medidas necesarias para asegurar que, en toda la extensión de las balsas 2 y 3, no se permite el establecimiento de poblaciones de animales que puedan dañar las capas de impermeabilización’, ‘controles sobre las poblaciones de conejos y otras comunidades de animales que pudieran proliferar’ y la ‘siega cuando la vegetación alcance 25 cm de altura’. Estas medidas podrían impactar sobre especies de fauna protegidas, amenazadas y/o de interés ecológico especial que colonicen la zona de actuación.

6.- El seguimiento de las medidas correctoras de impacto propuestas es insuficiente. Así, el proyecto no recoge ninguna medida concreta para controlar que los contaminantes de las balsas de fosfoyesos no entren en la red trófica estuarina. En este sentido, el programa de vigilancia ambiental debería incluir medidas para el seguimiento de la concentración de contaminantes en flora y fauna de las inmediaciones de las balsas en comparación con zonas de control.

En vistas a estas deficiencias, el proyecto de Fertiberia no evitaría la entrada de contaminantes en la red trófica del Estuario de los Ríos Tinto y Odiel y, además, generaría nuevos impactos socio-ambientales en la zona de actuación.

4.6.- Respetto a la salud pública

Tras la publicación de la Declaración de Impacto Ambiental del proyecto presentado por Fertiberia, en abril de 2021 se hizo una revisión de las carencias que presentaba desde el punto de vista de salud pública, que resumimos a continuación:

4.6.1.- Desde la perspectiva de la ERS y la identificación y caracterización de rutas de exposición completas o potenciales.

Tal y como venimos reivindicando desde este grupo, es el elemento crucial para dilucidar los posibles riesgos para la población onubense en relación a las balsas de fosfoyesos. La lectura del documento presentado por Fertiberia evidencia las siguientes deficiencias:

1.1 Falta de datos fiables sobre caracterización de localización y extensión de la capa freática. Deben existir datos en Medio Ambiente o en la Delegación provincial de Salud. Mapa de pozos y usos de esas aguas. Es necesaria una caracterización química y radiológica exhaustiva de estas aguas, así como un inventario de sus posibles usos pasados (muchos de estos contaminantes son bioacumulables con efectos a largo plazo) y actuales.

1.2 Existe una canalización de la Cuenca Hidrográfica del Guadiana que limita con la balsa zona 2. Se deberían solicitar datos sobre aislamiento de esa canalización y medidas de seguridad para evitar filtraciones. Además, se debería saber el destino y usos del agua, y en qué medida los trabajos que se pretenden acometer pueden afectarla provocando roturas o filtraciones (si es que no existen ya).

1.3 La EDAR o planta de tratamiento de aguas residuales de Huelva es igualmente colindante a esta zona (creo recordar que próxima a fosfoyesos negros). Actualmente existe un amplio debate sobre la efectividad de los tratamientos convencionales para la eliminación de un amplio grupo de sustancias presentes en las aguas residuales, lo que plantea la posibilidad de que existafiltración de material radiológico que no se elimine y se acabe vertiendo a cauces de agua públicos, además de ciertos metales pesados.

1.4 Muestreo y caracterización química de los fosfoyesos blancos y negros de manera mucho más representativa y exhaustiva. Los datos aportados son muy pobres y equívocos (los datos de las tablas 1.1 y 1.2 discrepan en un orden de magnitud de 10 o más) y puede señalarse que no se analiza todo lo que sería relevante desde la perspectiva de la salud pública.

1.5 Carencia de datos recientes (de al menos los últimos 5 años) sobre caracterización química de las aguas de baño de la zona con análisis de material radiológico y metales pesados. Las analíticas que se suelen hacer en estos casos está muy focalizada a peligros biológicos (coliformes y otros patógenos fecales) pero no tanto a análisis en profundidad relacionados con este tipo de focos contaminantes.

1.6 Se han llevado a cabo campañas y estudios sobre productos de la pesca local, pero no se aportan los datos.

1.7 Hay que conocer datos de pesca furtiva y consumo del pescado fruto de dicha actividad.

1.8 El tema de grietas, vertidos a la Ría y estabilidad de la balsa es lo más crucial. Hay que conocer el volumen de filtraciones y afectación de las aguas superficiales y/o subterráneas. La información contenida en el informe de Fertiberia sobre tsunamis o terremotos es pobre y poco convincente.

1.9 Caracterización de mapas de dispersión de partículas por vía aérea, identificando dentro de la ciudad de Huelva y poblaciones limítrofes, los distritos potencialmente más afectados. La información de las estaciones de medición no está diseñada para estos propósitos. Además, las mediciones de metales pesados no suelen hacerse en continuo. Se necesita de una campaña específica de caracterización de dispersión de metales pesados, con análisis discriminador de la composición de tierras raras típicas de las balsas que permitiría diferenciar la exposición frente a otros focos en la zona.

1.10. En base a los mapas de dispersión y las campañas analíticas dirigidas que permitan identificar grupos de poblaciones más expuestos o susceptibles, definir indicadores de seguimiento y biomonitorización de esta población tanto a sustancias químicas como a radionúclidos.

4.6.2.-Estudios de datos de salud.

Se deberían recoger datos de prevalencia e incidencia de enfermedades relacionadas específicamente con los peligros más relevantes presentes en los fosfoyesos, desagregados por zonas censales para detectar posibles acumulaciones de casos en distintas zonas de la ciudad. El proyecto italiano SENTIERI, focalizado en vigilancia epidemiológica de zonas contaminadas en todo el país, ofrece una exhaustiva revisión de la evidencia científica que podría servir de referencia. Los datos de mortalidad agregados a nivel provincial son del todo inadecuados puesto que provocan una dilución de efecto que enmascararía cualquier exceso de enfermedad. Muy relevante es el diseño de un estudio de seguimiento de impacto en la salud de los trabajadores que acometerán las obras, así como de la población residente en las ciudades limítrofes con las balsas.

Del estudio de percepción de la ciudadanía de Huelva llevado a cabo desde el Comité de expertos (Salas et al., 2022), se ofrecen las siguientes conclusiones en relación al proyecto RESTORE 20/30:

- Solo 3 de cada 10 encuestados declararon conocer el proyecto Restore 20/30.
- En una escala de 0 a 10, el proyecto obtiene una valoración promedio de 5,7.
- En relación a la efectividad del proyecto (si permitirá limpiar eficazmente la zona de las balsas) un 50,5% no tiene una creencia formada al respecto, y un 35% cree que no resultará efectivo.
- Un 75% de los encuestados admite sentirse preocupado por algunos aspectos de la restauración.

4.6.3. La percepción de los ciudadanos en relación a la restauración

En la encuesta de percepción pública realizada (Sala et al., 2022), también se preguntó por el proyecto de restauración Restore 29/30, propuesto por Fertiberia. Del estudio, destacan las siguientes conclusiones en cuanto a la percepción que tienen los ciudadanos del proyecto Restore 20/30 y de sus impactos para la salud:

- A pesar de que existe la creencia generalizada de que es necesario recuperar las balsas para el disfrute de la población, solo 3 de cada 10 ciudadanos declara conocer el proyecto Restore 20/30 propuesto para dicha restauración.
- Un importante 75% de los encuestados admite sentirse preocupado por algunos aspectos de dicha restauración.
- Existe cierta polarización en la aceptabilidad del proyecto Restore 20/30. Mientras que un 65% de los participantes declara que el proyecto le parece aceptable, otro 34% declara que le parece inaceptable.
- La diferencia actitudinal fundamental entre opositores y partidarios del proyecto de restauración reside en la percepción de efectividad del proyecto de restauración: los opositores perciben en mayor medida que los partidarios que el proyecto de restauración no será efectivo para limpiar eficazmente los residuos.

5.- Conclusiones y recomendaciones

El presente documento se completa, cristalizando en un conjunto de conclusiones y recomendaciones sugeridas que se agrupan por cada una de las áreas técnicas que se han considerado a lo largo del mismo.

Conclusiones desde la Geología de subsuelo.

- El estudio de la Geología local es insuficiente y no permite determinar las características geológicas básicas del sustrato que soporta los apilamientos.
- La presión que ejercen los fosfoyesos apilados en las zonas 2 y 3, provocan la migración de fangos fluidificados hacia la zona periférica del Canal principal del estuario; originado la deformación del sustrato de fango y la elevación del fondo del canal.
- El peso del apilamiento en las Zonas 2 y 3, están provocando un rápido hundimiento asimétrico de la masa apilada que da lugar a una importante debilidad estructural.
- El vertido directo de fosfoyesos sobre las superficies de marisma mareal a partir de finales de los años 60 dio lugar a la formación de Deltas de fosfoyesos (Similares a los deltas que forman los ríos cuando desembocan en el mar, como el Delta del río Ebro o el Delta del río Nilo). Estos deltas permiten la circulación del agua en profundidad entre el estuario y los apilamientos, en las zonas 1, 2, 3 y 4.
- El estudio de la sismicidad local ha permitido identificar numerosos sismos en el entorno de las balsas, esto evidencia la presencia de fallas locales en el sustrato que soporta los apilamientos. La existencia de estas fallas puede afectar a la estabilidad estructural de las balsas.

Recomendaciones respecto a la Geología de subsuelo

- Realizar un estudio completo de la Geología local que permitiría conocer con detalle las características estructurales, geotécnicas e hidrogeológicas del sustrato que soporta los apilamientos.
- Se necesita hacer un seguimiento temporal de las deformaciones del sustrato fangoso en la periferia de las zonas 2 y 3, para reconocer la evolución de las deformaciones y su posible afectación de la estabilidad de estos apilamientos.
- Es necesario conocer el estado real del sustrato sedimentario por debajo del apilamiento de la zona 2, con el fin de poder evaluar medidas de estabilidad estructural complementarias.
- Hay que identificar todas las estructuras deltaicas asociadas a las balsas (Zonas 1, 2, 3 y 4), para poder sellar los contactos hidráulicos entre el fondo de los apilamientos y los canales mareales.

- Evaluar las condiciones de contorno de los apilamientos en caso de afectación de una elevación anómala del nivel del mar.

Conclusiones desde la Hidrogeología y calidad del agua:

- Las balsas de fosfoyesos actúan como un acuífero, dónde las aguas que recargan el sistema proceden de las precipitaciones y del estuario a través de canales secundarios mareales y formaciones deltaicas de fosfoyesos. Estas aguas se infiltran en los depósitos de fosfoyesos y a medida que circulan por ellos van adquiriendo condiciones ácidas y se van cargando con elevadísimas concentraciones de contaminantes potencialmente tóxicos. El exceso de agua sale por los bordes de la balsa generando lixiviados o salidas de borde que descargan la contaminación a la Ría de Huelva.
- Los fosfoyesos tienen una solubilidad elevada y están sujetos a procesos de meteorización como la disolución y karstificación que favorecen la generación de las salidas de borde.
- Las múltiples perforaciones realizadas en la zona no están bien aisladas y ponen en contacto las aguas ácidas de los fosfoyesos con un nivel acuífero inferior, produciendo su contaminación.
- En las zonas 1 y 4, teóricamente restauradas, también ocurren estos procesos, especialmente en la zona 4 donde existen tantas salidas de borde como en las zonas 2 y 3.
- El modelo numérico hidrogeológico contemplado en el Proyecto de Clausura tiene numerosas deficiencias. Por lo tanto, no puede considerarse adecuado para validar en términos cuantitativos el flujo y transporte de contaminantes en un medio poroso saturado. Tampoco aporta información relevante para el cálculo o la observación de aspectos relacionados con la deformación del sustrato de la marisma o la estabilidad del depósito.

Recomendaciones respecto a la Hidrogeología y calidad del agua:

- Es necesario investigar la efectividad a largo plazo del funcionamiento de las barreras de yeso fraguado y arcillas para evitar la conexión de las aguas de los fosfoyesos con el estuario del Río Tinto y sus esteros. Estos sistemas también se deberían emplear en las formaciones deltaicas de fosfoyesos que podrían tener el mismo papel que los antiguos canales mareales.
- Se debería contemplar un tratamiento (activo o pasivo) de las posibles salidas de borde que se podrían seguir generando en las zonas 2 y 3 si se realiza el proyecto de clausura, así como las que se producen actualmente en las zonas 1 y, especialmente, 4.
- Se deben mejorar las medidas contempladas en el proyecto de clausura para impedir el flujo de contaminantes hacia el nivel acuífero inferior. Así mismo, la bentonita sódica prevista para aislar las perforaciones conocidas debe sustituirse por cementos u otro tipo de arcillas que garanticen el aislamiento a largo plazo entre el nivel acuífero inferior y las aguas ácidas de los fosfoyesos.

- Las zonas 1 y 4 de las balsas de fosfoyesos deben ser restauradas adecuadamente para evitar que sigan generando salidas de borde contaminantes.
- Para simular la efectividad de las posibles medidas a implementar es necesario disponer de un modelo numérico hidrogeológico suficientemente preciso y fiable para abordar de forma adecuada los distintos escenarios de gestión ambiental, incluyendo la evaluación de la estabilidad geotécnica en el caso de realizarse el proyecto de clausura previsto.

Conclusiones sobre la evaluación radiológica

- En el estado actual no hay una afección radiológica significativa por encima del fondo natural sobre la población que reside en el entorno de las balsas (grupo crítico).
- En el estado actual, la máxima afección radiológica sobre los trabajadores de las balsas de fosfoyeso (grupo crítico, considerando toda su jornada laboral en las balsas), no sobrepasa 0.4 milisievert al año, siendo el máximo establecido por el Consejo de Seguridad Nuclear para el público 1 milisievert al año.

Recomendaciones desde la evaluación radiológica

- Las recomendaciones del “Consejo de Seguridad Nuclear sobre el proyecto constructivo y estudio de impacto ambiental de la clausura de las balsas de fosfoyesos de Fertiberia SA en Huelva”, se consideran adecuadas para controlar los riesgos radiológicos de trabajadores y población, tanto durante el proyecto de clausura como durante los 30 años posteriores de control ambiental de la instalación.
- Se deberán establecer e implementar antes del inicio del proyecto: a) Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental; b) Plan de acondicionamiento, gestión y vigilancia de materiales con especial significación radiológica.
- Se deberán revisar y/o verificar “in situ” los potenciales impactos radiológicos de la eficacia real de la restauración, especialmente de las capas de cobertura en lo relativo al transporte de radón.

Conclusiones desde la calidad del Aire

- La evaporación de los lixiviados ácidos desde la balsa 2 y 3 producen emisiones de HF(v). Los modelos de dispersión muestran como estas emisiones alcanzan las zonas urbanas limítrofes a las balsas.
- La contribución de fuentes de partículas sedimentables procedente de las balsas de fosfoyesos en fase de inactividad es inferior a 5% a una distancia de 500 m en la ciudad desde las balsas. Se estima que esta contribución puede aumentar en fase de restauración de las balsas.
- El modelo RESTORE 20/30 considera un tratamiento similar a las sales baldeadas de la balsa 3 y fosfoyesos (s.l.). Las sales bandeadas deben

inertizarse y tratarse con un tratamiento específico, distinto al de los fosfoyesos, no considerados en el modelo RESTORE 20/30. Los concentrados de los lixiviados ácidos poseen importantes anomalías de elementos potencialmente tóxicos, destacando U.

Recomendaciones al respecto de la calidad del aire

- Durante la restauración de las balsas según el proyecto RESTORE 2030, se recomienda aumentar los controles del aire ambiente en las zonas habitables de la ciudad próxima a los fosfoyesos y aplicar técnicas de abatimiento para las emisiones de partículas fugitivas que se produzcan.
- Deben tratarse ambos, tanto sales bandeadas como concentrados de los lixiviados de forma individualizada e independientemente de los fosfoyesos.

Conclusiones desde la salud pública

- Existe bioacumulación de metales presentes en las balsas de fosfoyesos en población residente en las zonas más cercanas a las balsas de fosfoyesos
- Con la información disponible hasta la fecha ni se pueden confirmar, ni se pueden descartar aumentos de enfermedades causados por los contaminantes peligrosos presentes en las balsas

Recomendaciones respecto a la salud pública

- Llevar a cabo estudios tóxico-epidemiológicos que permitan cuantificar la aportación de las balsas en la biocumulación de sustancias peligrosas (tanto químicas como radionúclidos) para la salud en la población, y poder predecir/modelar el impacto que tendría el proyecto propuesto por Fertiberia en la salud de la población.
- Caracterizar la morbimortalidad de las zonas más impactadas por los contaminantes de las balsas, y monitorizar su evolución temporal durante cualquier actividad de remediación en las balsas.
- Dar el soporte adecuado para caracterizar la exposición humana por distintas vías y así poder estimar la gravedad (diferenciando entre cáncer y no cáncer) y la magnitud de los riesgos que verdaderamente están afectando a la población y los trabajadores de la empresa.
- Reducir las inquietudes de la población con una comunicación transparente y bidireccional sobre la situación actual y futura de la industria y sus posibles impactos (o riesgos) a la salud pública y trabajadores.
- Mejorar la comunicación de riesgos y sobre medidas de prevención y protección (en caso de que no sea posible eliminarlos) a la población, proporcionando información que dé respuesta a sus preocupaciones y dudas (por ejemplo, los estudios de evidencia).

- Desarrollar mecanismos de implicación social para permitir a la ciudadanía participar en la toma de decisiones relevantes a los proyectos asociados y atender sus inquietudes.
- Iniciar urgentemente un estudio de biomonitorización en la población residente cerca de las balsas a tóxicos (tanto químicas como radionúclidos) presentes en la balsa antes del inicio de las acciones propuestas por el proyecto RESTORE 20/30, para poder tener una referencia de cara a monitorizar el impacto en la acumulación de tóxicos en la población una vez se inicie cualquier proyecto de restauración de las marismas afectadas.

Conclusión Global

En base a lo expuesto en los apartados anteriores, los miembros del comité de expertos concluyen de forma unánime:

1. El proyecto presentado por Fertiberia, RESTORE 20/30 no puede ser considerado como una solución definitiva para la restauración y recuperación de las marismas afectadas por las balsas de fosfoyeso.
2. El proyecto RESTORE 20/30 sí que puede ser considerado como una intervención de urgencia para minimizar los riesgos asociados a los residuos apilados en las balsas de fosfoyeso.
3. Se debe iniciar un proceso para búsqueda de propuestas de restauración y recuperación de las Marismas afectadas por las balsas de fosfoyesos que cumplan con la legislación vigente y reduzcan al máximo posible el impacto sobre el medio ambiente, garantizando la seguridad de la población a largo plazo.

6. Anexos y referencias

6.1.- Anexos “Geología de subsuelo”

I informe científico técnico del comité de Expertos (Marzo 2017)

- Estudio de la Geología en el entorno perimetral de las balsas y apilamientos de fosfoyesos
- Análisis preliminar sobre la protección de las balsas de fosfoyesos frente a fenómenos de tsunami
- Resultados preliminares del estudio geoquímico y mineralógico de las balsas de fosfoyesos

II informe científico técnico del comité de Expertos (Junio 2018)

- Análisis del registro sedimentario en el entorno de las balsas de fosfoyesos
- Análisis de deformaciones geológicas producto de la sobre-presión ejercida por el apilamiento de fosfoyesos
- Identificación de deltas de fosfoyesos en el borde de canal de los apilamientos de fosfoyesos
- Estudio de la afección de las balsas de fosfoyesos por parte de las mareas y las olas
- Conexión hidroquímica entre las balsas de fosfoyesos y el estuario del río tinto como principal mecanismo de contaminación

Informe Técnico: Resultados Medidas de Deformación con DInSAR Satelital (Diciembre 2020)

III informe científico técnico del comité de Expertos. Informe Actividades Grupo Geología de Subsuelo y Geotecnia (Mayo 2021)

- Perfiles sísmicos de alta resolución
- Levantamiento batimétrico mediante sonda multihaz
- Estudio de la actividad sísmica en el entorno de las balsas

6.2.- Anexos “Hidrogeología y calidad del agua”

Modelo Hidrogeológico desarrollado por el grupo del Comité de Expertos

Referencias

- Pérez-López R, Nieto JM, de la Rosa JD & Bolívar JP (2015). Environmental tracers for elucidating the weathering process in a phosphogypsum disposal site: Implications for restoration. *Journal of Hydrology* 529(3), 1313-1323. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.056>
- Pérez-López R, Macías F, Cánovas CR, Sarmiento AM & Pérez-Moreno SM (2016). Pollutant flows from a phosphogypsum disposal area to an estuarine environment: An insight from geochemical signature. *Science of The Total Environment* 553, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.070>
- Macías F, Cánovas CR, Cruz-Hernández P, Carrero S, Asta MP, Nieto JM & Pérez-López R (2017). An anomalous metal-rich phosphogypsum: Characterization and classification according to international regulations. *Journal of Hazardous Materials* 5(331), 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.02.015>

- Pérez-López R, Carrero S, Cruz-Hernández P, Asta MP, Macías F, Cánovas CR, Guglieri C & Nieto JM (2018). Sulfate reduction processes in salt marshes affected by phosphogypsum: implications for managing pore-water quality. *Journal of Hazardous Materials* 350, 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.02.001>
- Papaslioti EM, Pérez-López R, Parviainen A, Macías F, Delgado A, Garrido CJ, Marchesi C & Nieto JM (2018). Stable isotope insights into the weathering processes of a phosphogypsum disposal area. *Water Research* 140, 344-353. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.060>
- Papaslioti EM, Pérez-López R, Parviainen A, Sarmiento AM, Nieto JM, Marchesi C & Garrido CJ (2018). Effects of seawater mixing on the mobility of trace elements in acid phosphogypsum leachates. *Marine Pollution Bulletin* 127, 695-703. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.001>
- Papaslioti EM, Pérez-López R, Parviainen A, Phan VTH, Marchesi C, Fernández-Martínez A, Garrido CJ, Nieto JM & Charlet L (2020). Effects of redox oscillations on the phosphogypsum waste in an estuarine salt-marsh system. *Chemosphere* 242, 125174. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125174>

Tesis Doctorales Directas o Indirectas

- Maria Evgenia Papaslioti (2018). Environmental Implications of a Phosphogypsum Disposal Area (Huelva, SW Spain): Weathering Processes and Mobility of Contaminants. Universidad de Granada – Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC). Calificación: Sobresaliente Cum Laude y Doctorado Internacional. Publicación electrónica: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=216389>
- Ricardo Millán Becerro (2022). Hydrogeochemical and mineralogical study of the ecological treatment of phosphogypsum leachates. Universidad de Huelva. Calificación: Sobresaliente Cum Laude y Doctorado Internacional.

Otras fuentes de financiación

- Proyecto de investigación de Excelencia de la Junta de Andalucía de la convocatoria 2012: “Fosfoyesos: de su evaluación ambiental como residuo a su revalorización como recurso” (FOREVER; Ref.: P12-RNM-2260).
- Proyecto de investigación de Retos de la convocatoria 2017 del Ministerio de Economía y Competitividad de España: “Contaminación asociada a la actividad minera que se transfiere al Océano Atlántico: Procesos geoquímico en el Estuario Odiel-Tinto” (CAPOTE; Ref.: CGL2017-86050-R).
- Proyecto del programa operativo FEDER-ANDALUCÍA 2014-2020: “Evaluación de la movilidad de contaminantes de la balsa de fosfoyesos de Huelva y propuesta de sistema de tratamiento (EMFHA-SIST; Ref. UHU-1253533).

6.3.- Anexos “Evaluación radiológica”

Estudio del transporte de radón en la cubierta de sellado de la balsa de fosfoyesos: propuesta de optimización para su reducción al fondo ambiental

Informe de la CSN: <https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04-25+Estudio+y+evaluaci%C3%B3n+del+impacto+radiol>

[%C3%B3gico+producido+por+las+actividades+de+diversas+industrias+no+nucleares+del+sur+de+Espa%C3%B1a.+Industrias+de+%C3%A1cido+fosp%C3%B3rico](#)

6.4.- Anexos “Calidad del aire”

Referencias

Alastuey A., Querol X, Plana F., Viana M, Ruiz C.R, Sánchez-de-la- Campa A., de la Rosa J., García dos Santos S., Mantilla E, (2006) Identification and Chemical Characterisation of Industrial Particulate Matter Sources in Southwest Spain. **Journal of Air and Waste Management Association** vol 56, 993-1006. [Web Link](#).

Lieberman RN, Knop Y, Izquierdo M, Moreno Palmerola N, J de la Rosa J, Cohen H, Muñoz-Quirós C, Cordoba P, Querol X (2018) Potential of hazardous waste encapsulation in concrete with coal fly ash and bivalve shells, **Journal of Cleaner Production** 185: 870-881.
DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.03.079](#)

Lieberman NR, Izquierdo M, Córdoba P, Moreno N, Querol X, Sánchez de la Campa AM, Font O, Cohen H, Knop Y, Torres-Sanchez R, Sánchez-Rodas D, Muñoz-Quiros C, de la Rosa JD (2020) The geochemical evolution of brines from phosphogypsum deposits in Huelva (Spain) and its environmental implications. **Science of The Total Environment** 700: 134444.
DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.134444](#)

Querol X, Alastuey A, de la Rosa JD, Sánchez de la Campa A, Plana F, Ruiz CR (2002) Source apportionment analysis of atmospheric particulates in an industrialised urban site in southwestern Spain **Atmospheric Environment** 36, 3113-3125.
DOI: [10.1016/S1352- 2310\(02\)00257-1](#).

Torres R, Sánchez de la Campa AM, Beltrán M, Sánchez-Rodas D, de la Rosa JD (2017) Geochemical anomalies of household dust in an industrialized city (Huelva, SW Spain). **Science of The Total Environment** 587-588: 476-481.
DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.02.167](#)

Torres-Sánchez R, Sánchez-Rodas D, Sánchez de la Campa AM, Kandler K, Schneiders K, de la Rosa JD (2019) Geochemistry and source contribution of fugitive phosphogypsum particles in Huelva, (SW Spain). **Atmospheric Research** 230: 104650.
DOI: [10.1016/j.atmosres.2019.104650](#)

Torres-Sánchez R, Sánchez-Rodas D, Sánchez de la Campa AM, de la Rosa JD (2020) Long term geochemical variation of brines derived from a major phosphogypsum pond of SW Europe. **Journal of Environmental Management** 254: 109832.
DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.109832](#)

Torres-Sánchez R, Sánchez-Rodas R, Sánchez de la Campa AM, de la Rosa JD (2020) Hydrogen fluoride concentrations in ambient air of an urban area based on the emissions of a major phosphogypsum deposit (SW, Europe). **Science of The Total Environment** 136891.
DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.136891](#)

Tesis Doctorales Directas e Indirectas

- María Millán Martínez. Contribución de fuentes de material particulado atmosférico en zonas industriales complejas. Directores Daniel A Sánchez-Rodas y J de la Rosa. Fecha de defensa: 19-7-2022. Universidad de Huelva.
- Raquel Torres Sánchez. BES-2015-071239. Evaluación del impacto a la atmósfera e implicaciones en la calidad del aire de lixiviados ácidos en depósitos de fosfoyesos. Programa Doctorado Ciencia y Tecnología Industrial y Ambiental. Directores: Jesús D. de la Rosa y Daniel A. Sánchez-Rodas. Universidad de Huelva. Defendida en Marzo 2020. Sobresaliente cum laude por unanimidad.
- Rocío Fernández Camacho. Origen y características de las partículas finas y ultrafinas en el aire ambiente de Huelva. Directores: Sergio Rodríguez Gozález y Jesús D. De la Rosa Díaz. Defendida el 13 de julio de 2011. Universidad de Huelva. Sobresaliente cum laude por unanimidad. TESEO.
- Yolanda González Castanedo. Caracterización Físico-Química del material particulado atmosférico de origen industrial en Andalucía. Directores: Jesús D. De la Rosa Díaz, J. Andrés Alastuey Urós y Victoria E. Cachorro Revilla. Defendida el 12 de julio de 2011. Universidad de Huelva. Sobresaliente cum laude por unanimidad. TESEO.
- Ana María Sánchez de la Campa Verdone, Geoquímica del material particulado atmosférico en Huelva, Suroeste de España. Directores: Querol, X, Alastuey A y de la Rosa JD. Defendida el 1 de abril de 2004. Universidad de Huelva. Sobresaliente cum laude por unanimidad. TESEO.

6.5.- Anexos “Impacto ecológico”

Identificación de la huella de contaminación de las balsas de fosfoyesos de Huelva

Análisis ecológico del proyecto «Clausura de las balsas de fosfoyesos situadas en el término municipal de Huelva» de la empresa Fertiberia.

6.6.- Anexos “Impacto en la salud pública”

- Martín-Olmedo P, Carroquino Saltó MJ, Ordóñez Iriarte JM, Moya J (eds). La Evaluación de riesgos en salud. Guía metodológica. Aplicaciones prácticas de la metodología de Evaluación de riesgos en salud por exposición a químicos. Madrid. Sociedad Española de Sanidad Ambiental y Escuela Andaluza de Salud Pública. Serie “De aeribus, aquis et locis”, nº 3. 2016. I.S.B.N.: 978-84-617-6362-7. Accesible en: <https://www.sanidadambiental.com/wp-content/uploads/2016/11/LA-EVALUACION-DE-RIESGOS-EN-SALUD.pdf>
- Martín-Olmedo P, Ranzi A, Santoro M, Dack S, de Hoogh K, Martuzzi M, Dogliotti E, Hoek G, Tomasova J, Dimovska M, Iavarone I. Methods and data needs to assess health impacts of chemicals in industrial contaminated sites. *Epidemiol Prev.* Jul-Aug 2019;43(4):223-237. doi: 10.19191/EP19.4.A01.068.
- Martín-Olmedo P, Spadaro JV, Ranzi A, Racioppi F and Martuzzi M. Health Impact assessment of steel plant activities in Taranto, Italy. WHO- Regional Office for Europe, 2022 (*en prensa*).
- Alguacil J, Rodríguez Pacheco RL, Contreras M, Martín-Olmedo, P. Geodisponibilidad y ciclo geoquímico de contaminantes en la zona de las balsas de Fosfoyesos y áreas de influencias (Huelva). *Proyecto en curso (2022-2024)*.

- Daponte A, Ocaña Riola R, Fernández Ajuria A, Martín-Olmedo P, Rueda de la Puerta P, Ballesteros V, Gurucelain JL, Mayoral JL. Situación de la Ría de Huelva. Informe para el Defensor del Pueblo Andaluz. Noviembre, 2010.
- Grupo de Trabajo de la Sociedad Española de Epidemiología (Grupo de Trabajo de la SEE) (Alguacil J, Ballester F, de Mata Donado Campos A, Escolar Pujolar A, Pollán M, Rodríguez-Artalejo F). Dictamen realizado por encargo del Defensor del Pueblo Andaluz sobre El exceso de mortalidad y morbilidad detectado en varias investigaciones en La Ría de Huelva. Marzo, 2014.
<https://www.defensordelpuebloandaluz.es/sites/default/files/Huelva.pdf>
- Sala R, Oltra Ch, Prades A, Domínguez JA, Alguacil J, Contreras M, Martín-Olmedo P, Luitsko L. Percepción pública de las balsas de residuos de fosfoyesos y el proyecto RESTORE 20/30: un estudio a partir de encuesta. Huelva, Febrero 2022.
- Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité (CRIIRAD). Control radiológico de las balsas de fosfoyesos y del vertido de cesio 137 del CRI-9 Informe CRIIRAD N°07-117 Controles radiológicos en HUELVA (España). 2007.

Tabla sobre efectors adversos descritos para contaminantes identificados en material particulado o gases emitidos desde las balsas de fosfoyesos, vertido en suelos y/o lixiviados a las aguas de la Ría o agua subterránea

OTROS impactos a la salud (estudios externos):

- Al-Hwaiti, M., & Al-Khashman, O. (2015). Health risk assessment of heavy metals contamination in tomato and green pepper plants grown in soils amended with phosphogypsum waste materials. *Environmental geochemistry and health*, 37(2), 287-304.
- Silva, L. F., Oliveira, M. L., Crissien, T. J., Santosh, M., Bolivar, J., Shao, L., ... & Schindler, M. (2022). A review on the environmental impact of phosphogypsum and potential health impacts through the release of nanoparticles. *Chemosphere*, 286, 131513.