
uhu.es
Universidad de Huelva

ESTUDIO DE LA GEOLOGIA EN EL ENTORNO PERIMETRAL DE LAS BALSAS Y APILAMIENTOS DE FOSFOYESOS

Estructura Geológica de la Zona.

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; en el sector bajo del Sistema Estuarino.

Este sector está constituido por un conjunto de unidades sedimentarias Cuaternarias de origen estuarino y depositadas en los últimos 9000 años (B.P) 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. Estas unidades se disponen sobre un sustrato de edad Neógena y de composición margosa. En la figura 1 se muestra un esquema simplificado de la estructura del soporte sedimentario de las balsas y apilamientos de fosfoyesos.

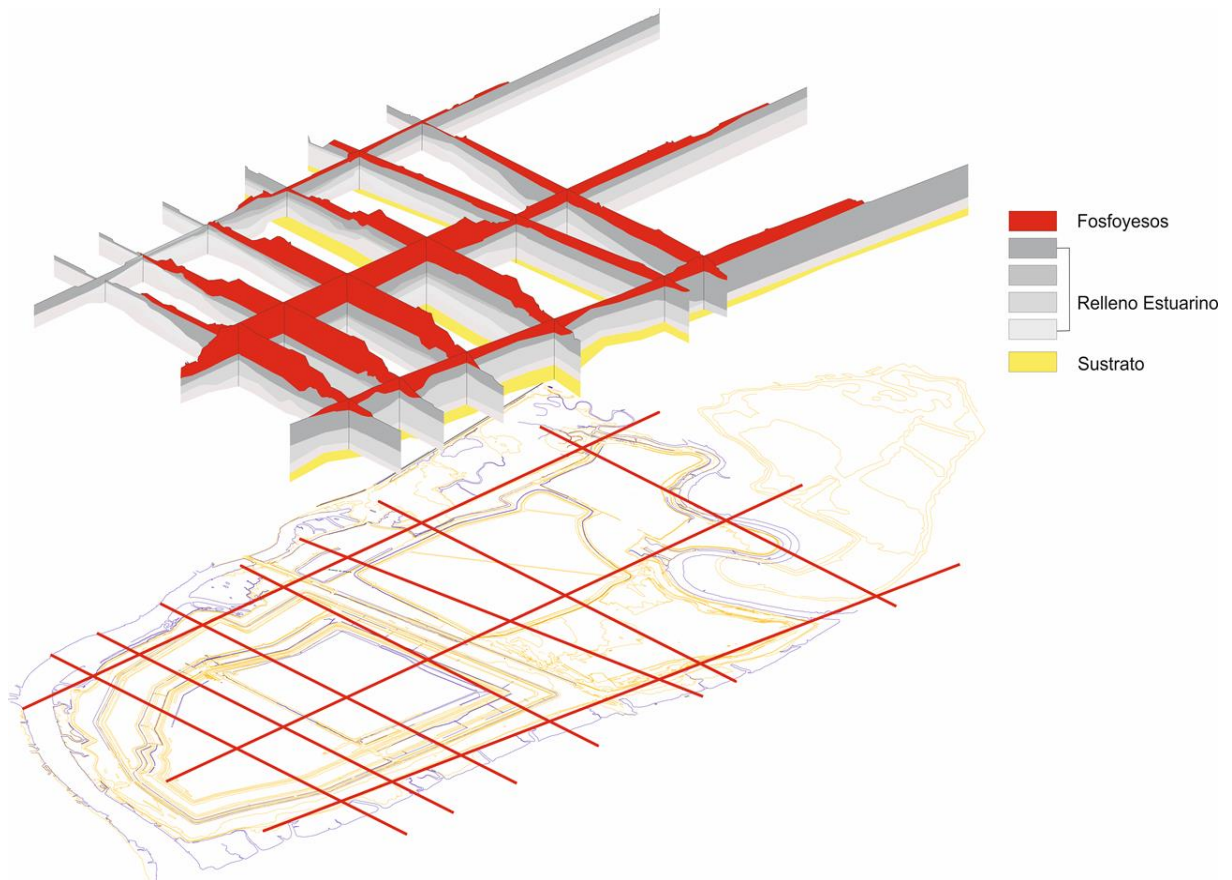


Figura 1. Esquema simplificado de la estructura sedimentaria que constituye el soporte de las balsas y apilamientos.

El espesor de las unidades sedimentarias estuarinas aumentan en sentido sureste, variando entre 2 y 3 metros de espesor en el margen situado en las cercanías de la ciudad de Huelva y entre 30 y 50 metros en el margen sureste cerca de la población de Palos de la Frontera (Fig. 2).

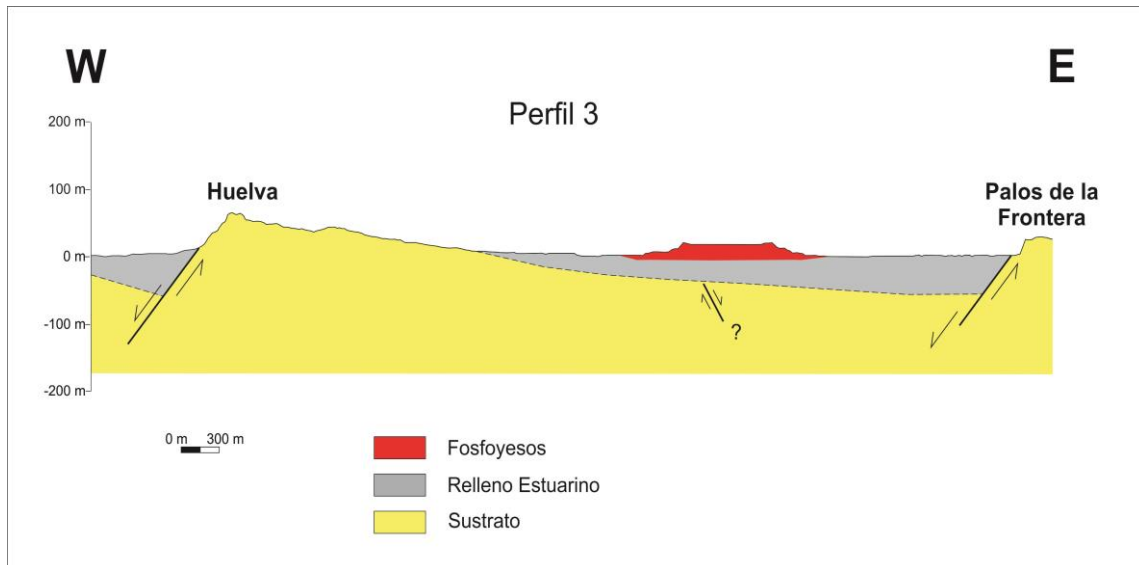


Figura 2. Corte geológico simplificado de las Unidades sedimentarias neógenas y cuaternarias en la transversal Huelva-Palos de la Frontera.

Tal como se recoge en el *Proyecto Constructivo presentado por Fertiberia; Anejo 1: Descripción geológica y geotécnica del emplazamiento. Parte 1*. En el punto 4.4 Tectónica y sismicidad. Y a partir de datos obtenidos en “bibliografía específica, fundamentada en geofísica de reflexión y en sondeos mecánicos profundos” en esta estructura geológica “que existen fracturas Neógenas producto de reactivaciones de falla Hercínicas”.

El funcionamiento de “Estas fracturas durante el Cuaternario y con posterioridad a la deposición de las arenas Pliocuaternarias dieron lugar a levantamientos de bloque como el de la ciudad de Huelva”.

“Posteriormente al Pliocuaternario y hasta **nuestros días** hay una continua subsidencia de la costa, que se manifiesta en la formación de la Ría de Huelva, e incluso en la transgresión marina histórica detectada en las playas de Mazagón, donde se han observado avances marinos de hasta 50 m en los últimos 30 años”.

“Todos estos datos nos confirman la idea de una tectónica reciente debida al amoldamiento que sufren los sedimentos Neógenos y Cuaternarios, con respecto a reajustes de fallas que afectan al zócalo.

Esta actividad tectónica descrita da lugar a un modelo de bloques basculados, una parte occidental de estos se levanta (Ciudad de Huelva y población de Palos de la Frontera) y la otra oeste se hunde (márgenes derechos del estuario del Río Odiel y Río Tinto) (Fig. 2).

Parece claro que esta zona está sometida a una neotectónica activa, producto de un proceso extensional originado por el reajuste de fallas Hercínicas que afectan a todo el apilamiento sedimentario neógeno y cuaternario. Por lo tanto, no se puede descartar un progresivo hundimiento de los bloques en sentido sur-sureste, producto de la subsidencia originada por esta neotectónica.

En la guía de Campo de la excursión de la Comisión de Tectónica de septiembre de 2016, y en perfiles sísmicos superficiales de alta resolución realizados en la confluencia de los estuarios de los Ríos Odiel y Tinto se han identificado fallas que cortan a los sedimentos holocenos de la marisma (los mismos que forma el soporte sedimentario de los apilamientos), y por otra parte, se ha podido identificar una fábrica sísmica definida por reflectores de bajo buzamiento que representan la estructuración pliocena del "basamento" de la marisma (http://www.sociedadgeologica.es/comisiones/memorias_tectonica/memoria_28.pdf). La organización de los materiales del Plioceno muestra una disposición sistemática con buzamientos hacia el interior de la cuenca, es decir, hacia el SE.

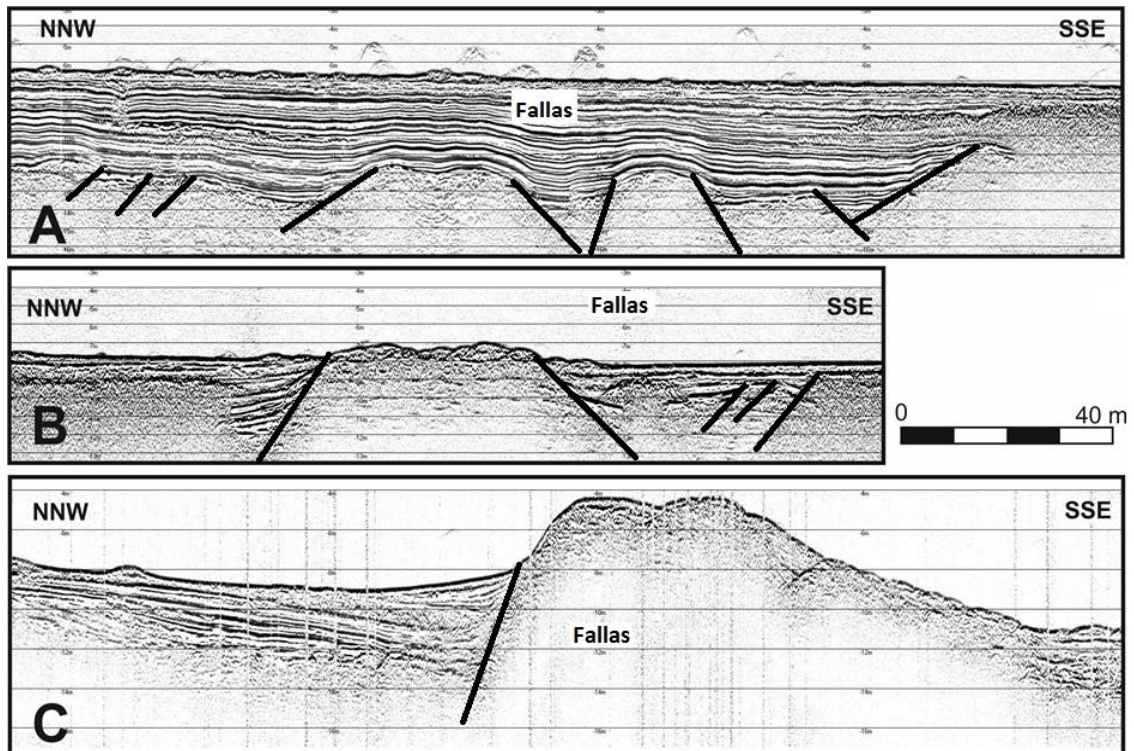


Figura 3. Registros de sismica de alta resolución en la margen izquierda del estuario del Río Odiel, se observan sistemas de fallas que afectan al registro sedimentario reciente.

Por lo tanto, en este contexto no es descartable la presencia de fallas que afecten a los sedimentos holocenos estuarinos que son el soporte estructural de los apilamientos. Las presencias de estas fallas implicarían un riesgo estructural importante que afecta a la estabilidad de las balsas y los apilamientos.

Además, en este mismo documento y a partir “del análisis geomorfológico de la zona se muestra una lineación del relieve muy clara según la dirección NE-SO para los principales ríos, y NO-SE para los afluentes de tales ríos. Aparentemente los cambios litológicos de las rocas en ese sector de la cuenca no condicionarían tal estructuración de la red de drenaje, ni tampoco parece razonable relacionarla con variaciones climáticas, por lo que probablemente tenga un control estructural. Los valores obtenidos de los índices de asimetría y elongación del radio de las cuencas principales del Odiel y Tinto muestran la existencia de estructuras tectónicas recientes que controlan dichas cuencas. Además, los cálculos del índice de asimetría (muy altos) evidencian que existe una migración de los ríos principales hacia el E. La migración de los cauces de los ríos se asociaría al basculamiento que se produce entre los distintos bloques de las fallas. A partir de las curvas hipsométricas y de los datos de geología regional conocidos se puede

justificar que fallas normales NE-SO se reactivan en la cuenca del Guadalquivir y condicionan el relieve y la red de drenaje en tiempos recientes. La desembocadura del río Tinto es un ejemplo de la actividad tectónica holocena en el margen septentrional del Golfo de Cádiz”.

En este contexto se hace imprescindible la realización de un detallado estudio de geología de subsuelo que permita identificar con precisión la estructura geológica de la zona de balsas, apilamientos y toda su toda su periferia; con el fin de definir los posibles riesgos asociados.

Estructura geológica sub-superficial.

Como se puede observar en la figura 3, los apilamientos de fosfoyesos se sitúan sobre sedimentos de relleno estuarino con espesores variables desde 2 a 3 metros en la zona NW, hasta entre 15 y 25 metros en la zona SE. Esta variación del espesor esta originada, tal como se ha comentado anteriormente al basculamiento en sentido SE que sufre el sustrato terciario. Se puede observar como el espesor del apilamiento alcanza las mismas proporciones que el sustrato sedimentario reciente que los soporta (Fig.3).

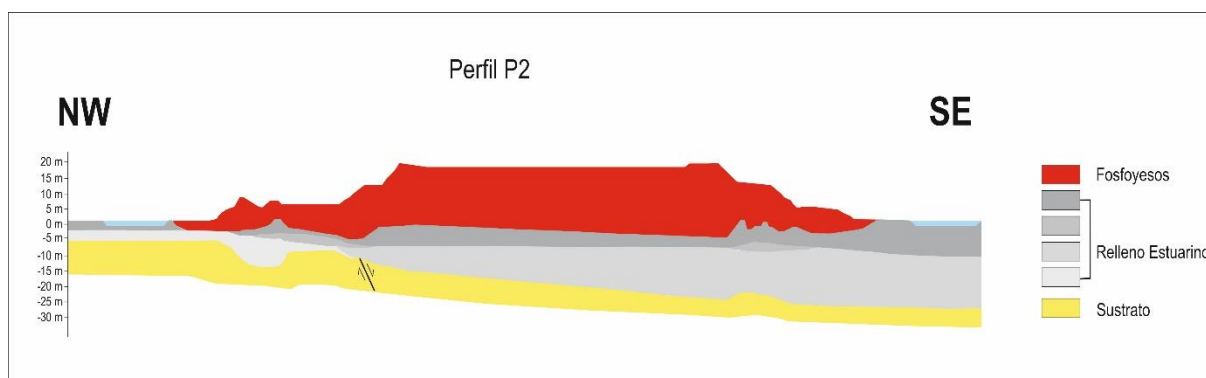


Figura 3. Perfil geológico simplificado de la zona de apilamiento de fosfoyesos.

Según datos recogidos en el ***Proyecto Constructivo presentado por Fertiberia; Anejo 1: Descripción geológica y geotécnica del emplazamiento. Parte 1; Punto 6. Caracterización geotécnica.*** Las densidades secas del yeso son variables, dependiendo de si es yeso de deposición reciente (yesos nuevos) o yeso de deposición antigua (yesos antiguos). Los primeros presentan densidades secas de entre 0,9 y 1,3 t/m³, mientras que los segundos oscilan entre 1,35 y 1,65 t/m³.

Si admitimos un valor medio de densidad seca de $1,4 \text{ t/m}^3$, la presión ejercida por el apilamiento de 25 metros de altura de fosfoyesos alcanzaría 35 t/m^3 . Esa sería la presión media ejercida por el apilamiento sobre el soporte sedimentario infra-yacente. Esta presión se ejerce sobre materiales de alta plasticidad y con altos contenidos en agua intersticial.

En condiciones naturales la presión ejercida sobre el sustrato sedimentario situado al nivel de la marea alta viva media es prácticamente nula, mientras que a 25 metros de profundidad (con una densidad seca de sedimento de $1,1 \text{ t/m}^3$; sería de $27,5 \text{ t/m}^3$. Si superponemos el apilamiento de fosfoyesos incrementaríamos la presión en 35 t/m^3 , lo que supone ejercer algo más del doble la presión natural sobre el soporte sedimentario.

En condiciones no antrópicas (naturales) la acumulación de 25 metros de sedimentos en el estuario del Río Tino tiene lugar durante 8000 años, lo que permite un tiempo de acomodación de la presión por acumulación amplio. La acumulación del apilamiento de fosfoyesos se produce en un periodo igual o inferior a 50 años, originando una presión superior a la del depósito sedimentario natural. En estas condiciones es necesario conocer el comportamiento de los materiales que constituyen el soporte estructural del apilamiento en condiciones de sobre-presión. Con este objetivo se ha realizado un análisis mediante sísmica de reflexión de muy alta resolución de todo el sector periférico a las balsas y apilamientos de fosfoyesos en el Estuario del Río Tinto.

Metodología.

Fundamento teórico.

Los sistemas sísmicos operan según el principio por el cual la energía sismo-acústica transmitida incide en una interface acústica, reflejándose parcialmente por esta superficie. Una *interface acústica* es aquella zona del subsuelo a través de la cual, existe algún contraste en la *impedancia acústica*, definida como el producto de la densidad del medio por la velocidad de propagación de las ondas sónicas compresionales (ondas P). La *reflexión* se obtiene por una variación de la impedancia acústica que es una medida del contraste acústico de los materiales a cada lado de la interface (Fig. 4).

Las interfaces acústicas quedan representadas gráficamente por cada uno de los sistemas sísmicos, y son llamados '*reflectores sísmicos*'. Estos últimos son superficies de contacto entre dos materiales que presentan distinta impedancia acústica y que se comportan frente

a los pulsos acústicos como espejos, reflejando (y refractando) parte de la energía acústica emitida. Estos reflectores no tienen por qué coincidir con los conceptos de “estratos”, “capas”, “niveles” usados en geología, aunque de hecho pueden corresponder a interfaces físicas como planos de estratificación, discontinuidades, fallas, superficies de erosión, zonas con gas, etc. (Fig.4)

El perfilador de fondo paramétrico, sin necesidad de grandes transductores que limitan la navegación en zonas someras, permite generar muy bajas frecuencias y una resolución excelente que unido a una penetración sorprendente en subsuelos fangosos ha sido considerada la opción más adecuada para este estudio. El efecto paramétrico consiste en la producción de dos frecuencias muy cercanas entre ellas lo cual genera una frecuencia resultante de la sustracción de ambas con un haz muy estrecho, lo cual permite una resolución de 5 centímetros.

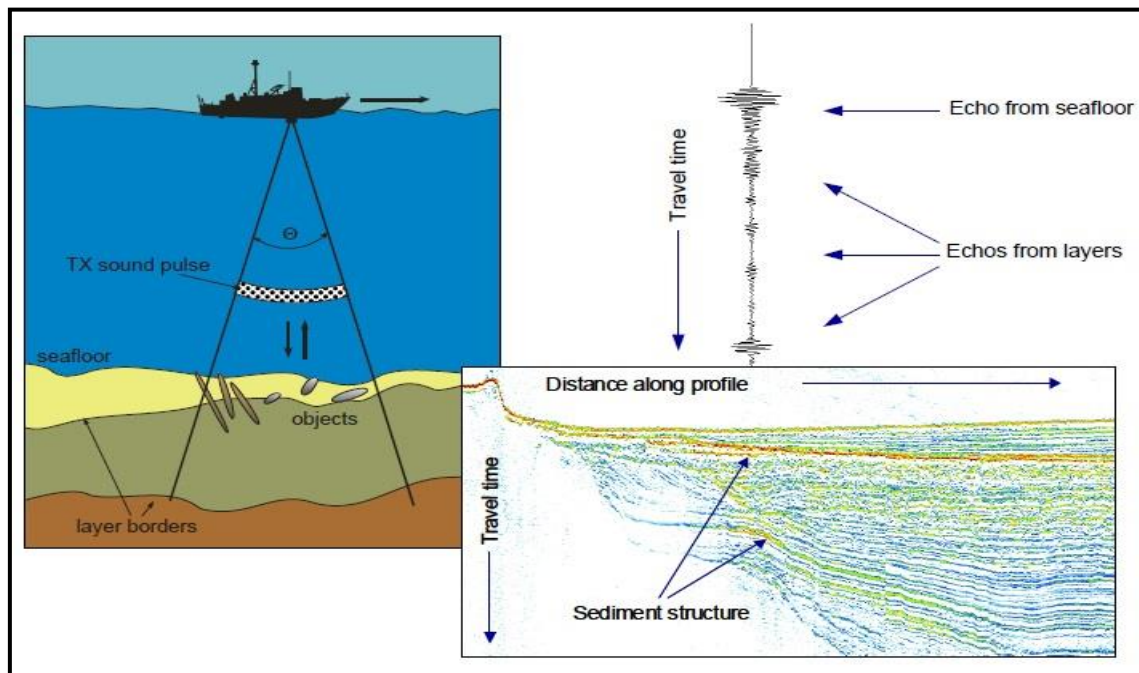


Figura 1. Esquema del funcionamiento de los equipos de sismica de reflexión mediante perfilador de fondo INNOMAR.

Equipos empleados

El perfilador SES-2000 Compact de la marca INNOMAR cuenta las siguientes características:

- Ancho de pulso comprendido entre 66 y 800 μ s.

- Penetración hasta 40 metros dependiendo de los sedimentos, frecuencia seleccionada y nivel de ruido existente.
- Selección de frecuencia por el usuario (5, 6, 8, 12 y 15 KHz).
- Frecuencia de repetición de pulsos: hasta 50 pulsos/segundo.

El sistema permite visualizar los datos en tiempo real, y para perfeccionar la calidad de los datos obtenidos, es posible variar los parámetros de adquisición en post-procesado.



Figura 5. Sondador paramétrico INNOMAR SES-2000 COMPACT; transducer y centralita electrónica del sondador.

Campañas de campo.

Se realizaron dos campañas de campo, la primera durante el mes de diciembre de 2016 y la segunda durante el mes de enero de 2017 (Figuras 5 y 6).

Una vez procesado los datos de la primera campaña se comprobó que, en el margen derecho de la Ría del Tinto, en las inmediaciones de los depósitos de fosfoyesos, se concentran numerosas anomalías que debían de analizarse pormenorizadamente mediante una nueva malla de prospección geofísica.

Por lo que en la segunda campaña se realizaron perfiles longitudinales distanciados 25 metros entre sí y perpendiculares a 150 metros de separación, como se muestra en las trayectorias reflejadas en las figuras 6 y 7.



Figura 2. Trayectorias de los perfiles sísmicos realizados en la primera campaña geofísica en la zona de estudio.

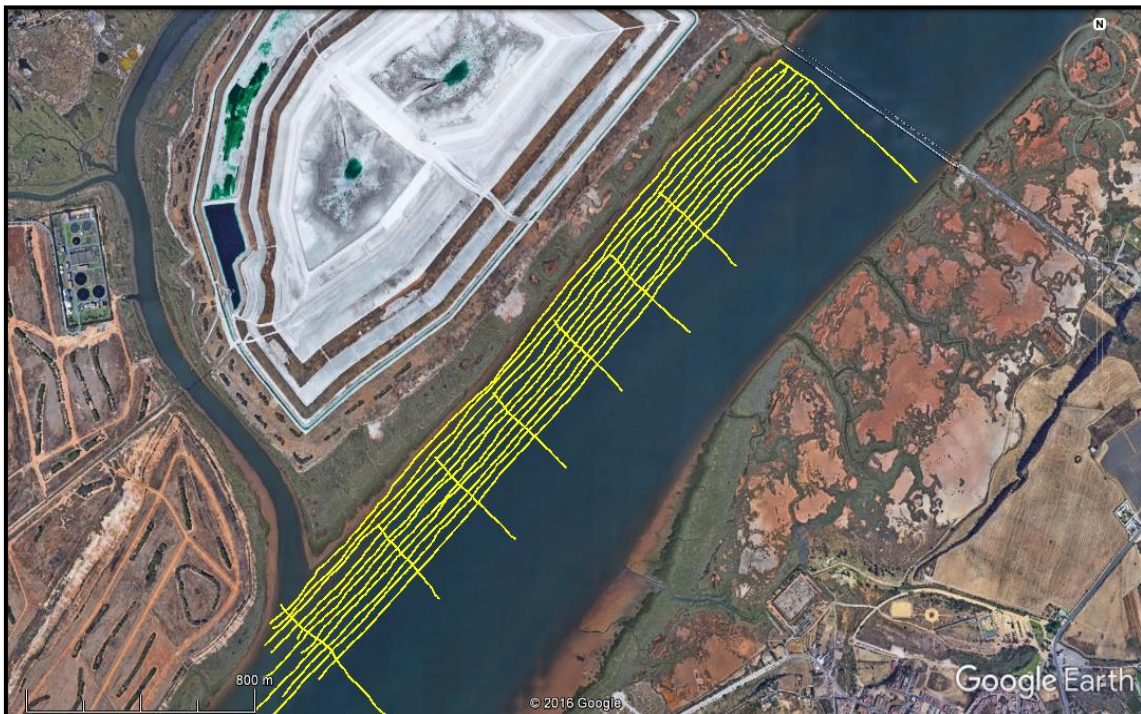


Figura 3. Trayectorias de los perfiles sísmicos realizados en la segunda campaña geofísica en la zona de estudio.

Procesado de datos

La interpretación de los registros se realiza mediante el programa ISE, que permite probar múltiples configuraciones (filtros, TVG, colores, etc.) para obtener la mejor visualización respecto al objetivo enfocado; una vez establecidas, se procede a la digitalización en pantalla de las capas de sedimento y/o objetos o cuerpos extraños detectados.

El procesado de capas de sedimento se exporta posteriormente a un archivo de texto donde se tienen tanto las coordenadas horizontales (x, y), como la vertical (z), que corresponde a la profundidad. Con estos datos se determinan las potencias de los reflectores, y la profundidad del lecho marino de la cual se pudo obtener una batimetría de la zona de estudio.

Para el estudio planimétrico, los resultados obtenidos deben ser representados cartográficamente. Bajo este fin es necesario realizar el enlace planimétrico de los resultados conforme a las características planimétricas descritas por el REAL DECRETO 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España, adoptando el sistema ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) como datum de referencia.

Este Datum está basado en el elipsoide SGR80 y es la base para el Sistema de Referencia Coordinado utilizando coordenadas elipsoidales.

Resultados

Características estratigráficas de los registros sísmicos

Para el estudio de los perfiles sísmicos, ha sido necesario identificar y localizar la profundidad a la que se encuentran el basamento acústico. En este sentido asumimos que corresponde al material más antiguo detectado, a partir del cual se produce un apantallamiento o atenuación gradual de la señal acústica que impide la penetración de la misma. Por lo tanto, el material sedimentario no consolidado detectado queda limitado a muro (zona inferior) por el reflector que se interpreta como basamento acústico y a techo (zona superior) por el reflector correspondiente al actual lecho marino o fondo del canal.

En la imagen del siguiente perfil sísmico (Fig. 8) se pueden observar de manera general las características litosísmicas que se producen en la zona de estudio.

Aunque se observan numerosos cambios en los tipos de depósitos sedimentarios según la zona, se expone a continuación el perfil tipo más frecuente describiendo las características de los reflectores de más antiguo a más moderno.

Basamento acústico:

El reflector coincidente con el basamento acústico ofrece un apantallamiento de la señal importante, que indica un cierto grado de consolidación suficiente para interpretarlo como una capa de sedimento con cierto grado de compactación. Este sustrato se observa frecuentemente en ambos márgenes del estuario, a profundidades de unos 4 metros bajo el lecho marino (Fig. 8).

La morfología tridimensional que presenta es planar. Se ha interpretado como una capa de sedimentos de tamaño de grano fino bastante compacta.

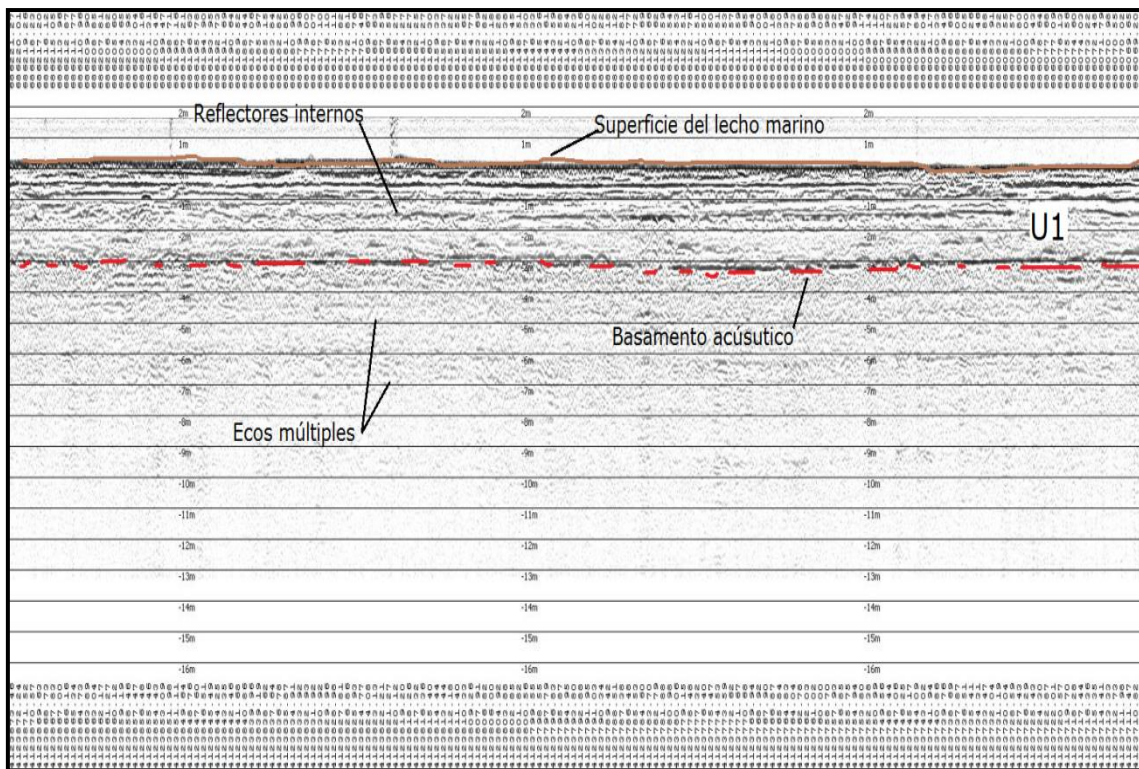


Figura 8. Imagen de un registro sísmico de alta resolución de unos 320 metros de longitud y sentido hacia el SO. La profundidad está referida al cero del puerto. Se puede observar el basamento acústico y la unidad sísmica U 1 con geometría paralela.

Unidad sísmica 1 (U1):

El límite inferior con el basamento es claramente paralelo, los reflectores internos muestran una geometría diversa paralela o subparalela al fondo marino (Fig. 8) o sigmoide (Fig. 9). El espesor de sedimento detectado en este caso es de 4 metros y se interpreta como una alternancia de distintos tipos de sedimentos de tamaños de grano fino (arcillas limosas/ limos arenosos).

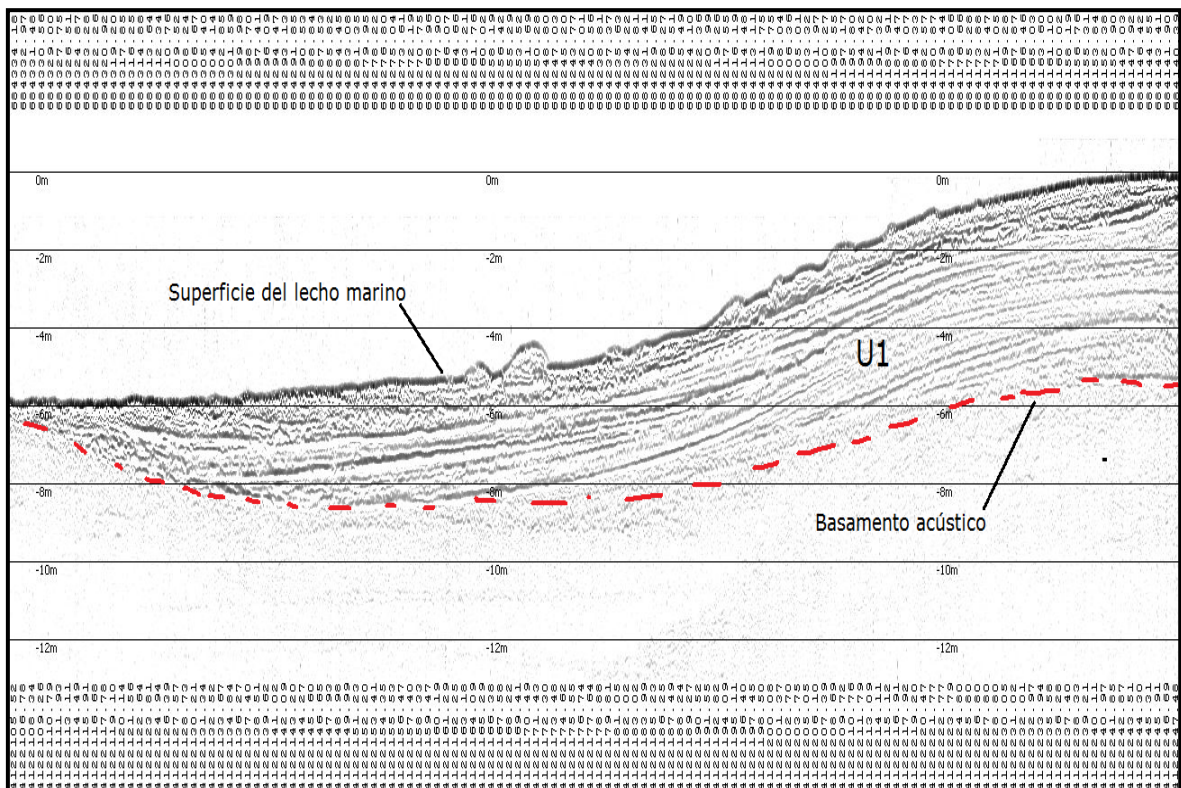


Figura 9. Registro sísmico donde se observa el basamento acústico y la unidad sísmica U1 con geometría sigmoide.

Lecho marino o fondo de canal.

A techo se observa el fondo marino a una profundidad de 0 metros referido al cero del puerto de Huelva, con cierta rugosidad posiblemente por el contenido en material orgánico (plantas, bioclastos, etc.) y pudiendo observarse diferentes geometrías (Fig. 10),

fondo plano, o campos de variadas formas de fondo como megaripples; estos últimos producto del transporte de arenas medias gruesas a partir de corrientes de marea.

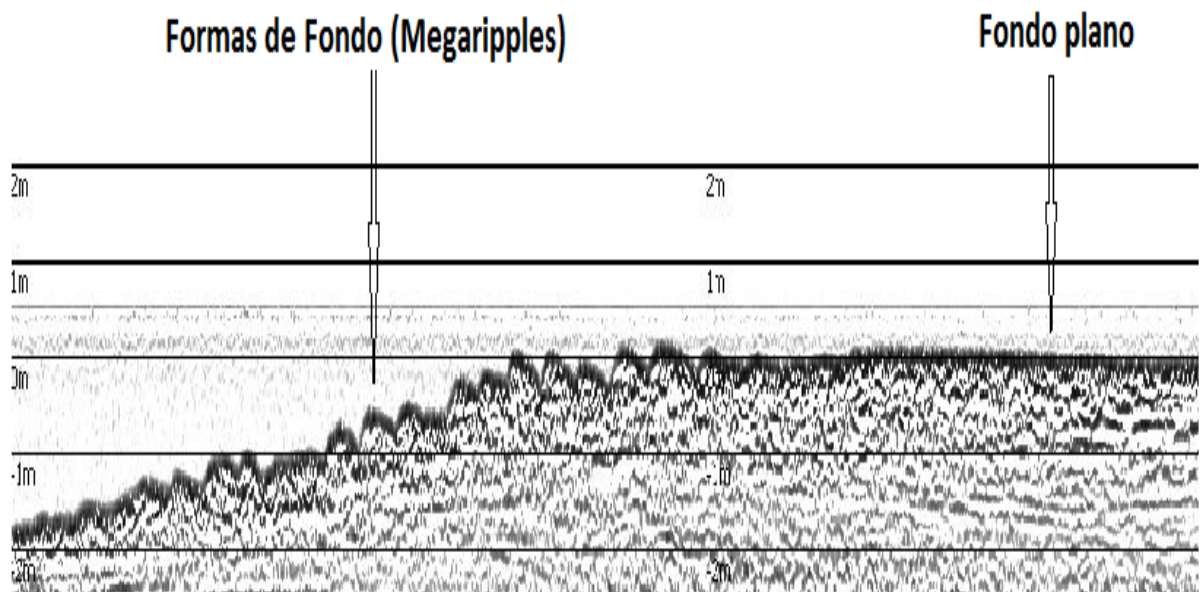


Figura 10. Registro sísmico donde se observa la superficie del canal estuarino con fondo plano y formas de fondo móviles, (megaripples).

Análisis de los registros sísmicos

De la observación de los perfiles sísmicos realizados se desprende la presencia de numerosas estructuras de deformación que afectan a los primeros metros del relleno sedimentario. Este tipo de estructuras no han sido observadas en trabajos anteriores realizados en otros sectores de la Ría de Huelva, incluidas zonas del estuario del río Tinto alejados de la periferia de las balsas y los apilamientos de Fosfoyesos. A continuación, se describen algunos de los perfiles tipo.

Perfil sísmico 1

En el siguiente perfil (Fig. 11) se observa un basamento acústico discontinuo, pero de morfología planar. Se observa una única unidad sísmica cuyos reflectores internos se encuentran plegados y discontinuos, el espesor detectado llega a los 6 metros. La superficie del lecho marino se presenta deformada e irregular.

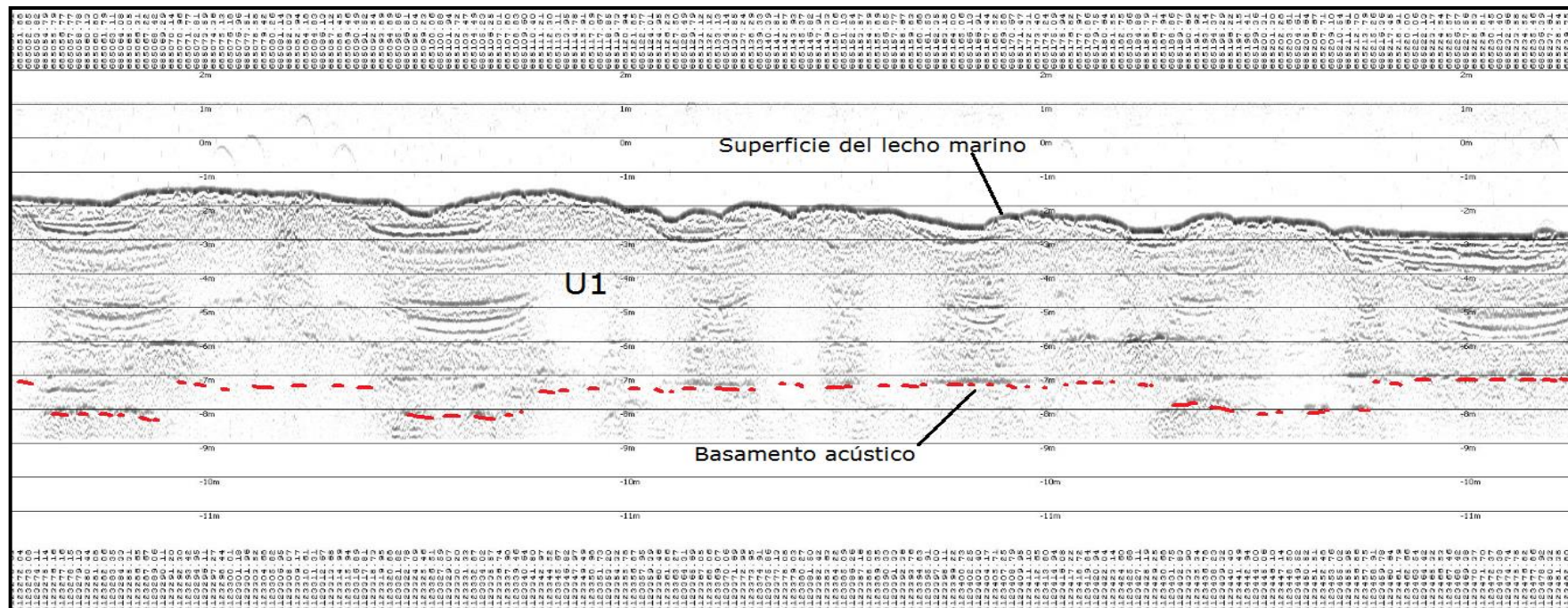


Figura 11. Perfil sísmico 1 de la zona de estudio con una longitud de 320 metros y sentido hacia el NE. La profundidad está referida al cero del puerto.

Perfil sísmico 2

El basamento acústico (Fig. 12) se presenta discontinuo y con numerosas fallas que lo fracturan, localizándose a distintas profundidades. Se observa una deformación importante que incluso aflora sobre el lecho marino. Se detecta una única unidad sedimentaria cuyos reflectores internos son poco reflectivos y bastante homogéneos lo que indica que no hay cambios litosísmicos importantes.

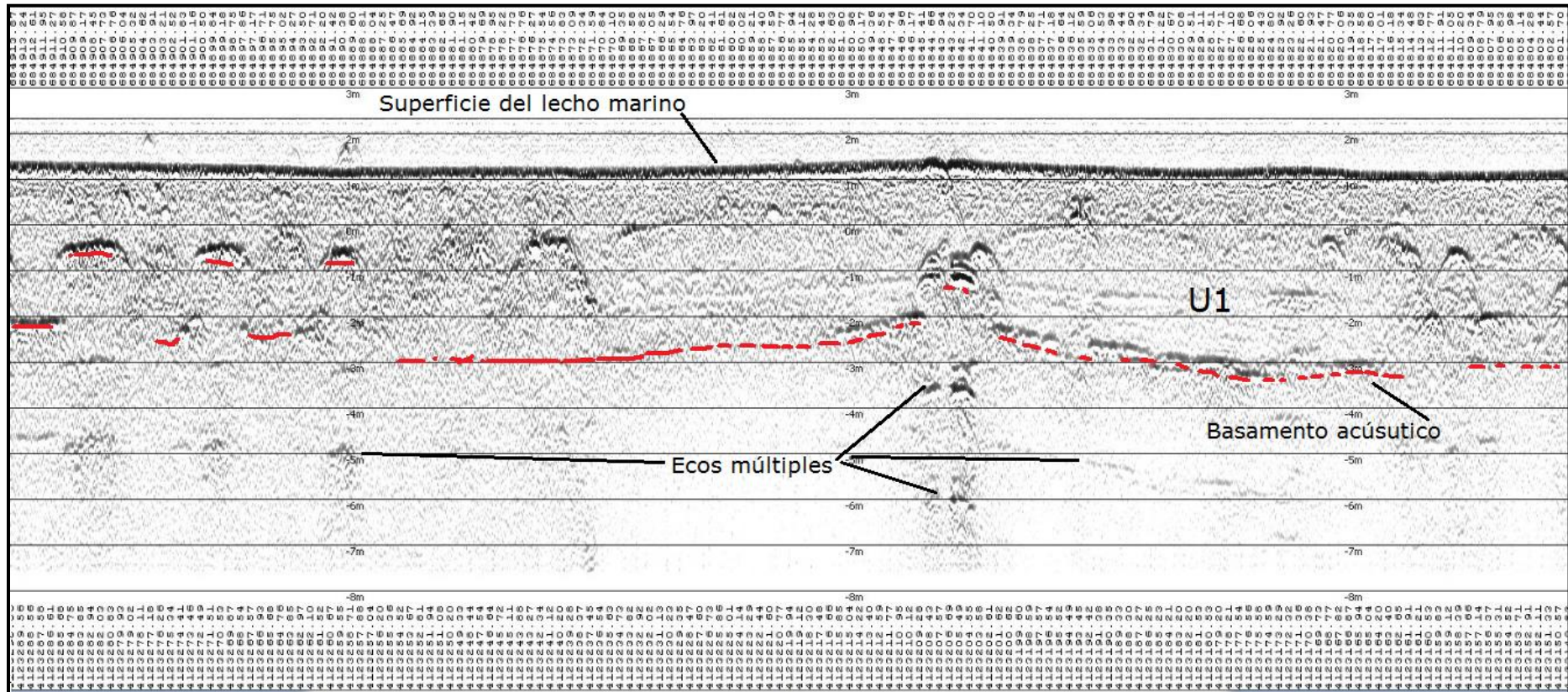


Figura 12. Perfil sísmico 2 de la zona de estudio con una longitud de 300 metros y sentido hacia el SW. La profundidad está referida al cero del puerto.

Perfil sísmico 3

En la imagen del registro (Fig. 13) se aprecia un basamento acústico bastante reflectivo, aunque discontinuo; debido a las numerosas parábolas de escape de fluidos, que deforman prácticamente toda la secuencia sísmica. A muro de la unidad sísmica se aprecia una configuración interna masiva sin reflectores, mientras que a techo (parte superior) se observa una disposición paralela de los reflectores internos, lo que indica que las estructuras de deformación no alcanzan la superficie.

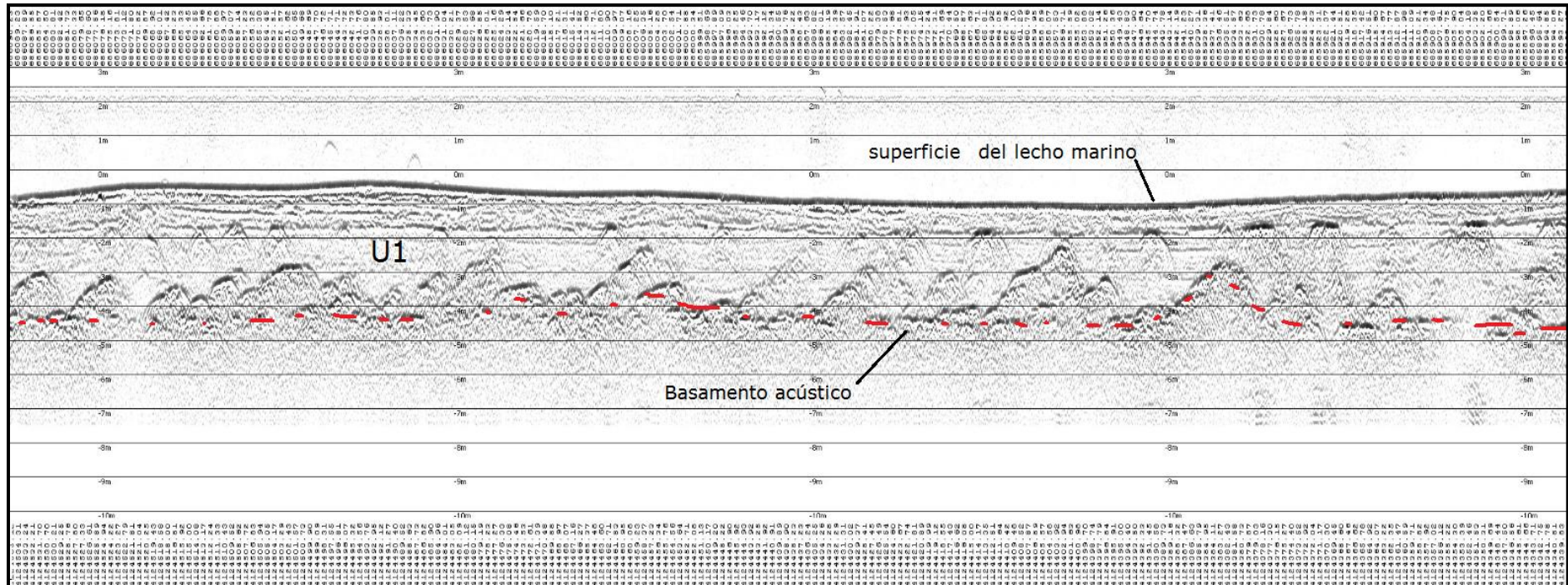


Figura 13. Perfil sísmico 3 con una longitud de unos 320 metros y sentido hacia el SW. La profundidad está referida al cero del puerto.

Perfil sísmico 4

En la imagen del siguiente registro no se aprecia claramente el basamento acústico, ya que está muy fragmentado, son numerosas las estructuras de deformación de las capas sedimentarias; basculamientos, bordes de arrastre, extrusiones diapíricas y parábolas de escape de fluidos.

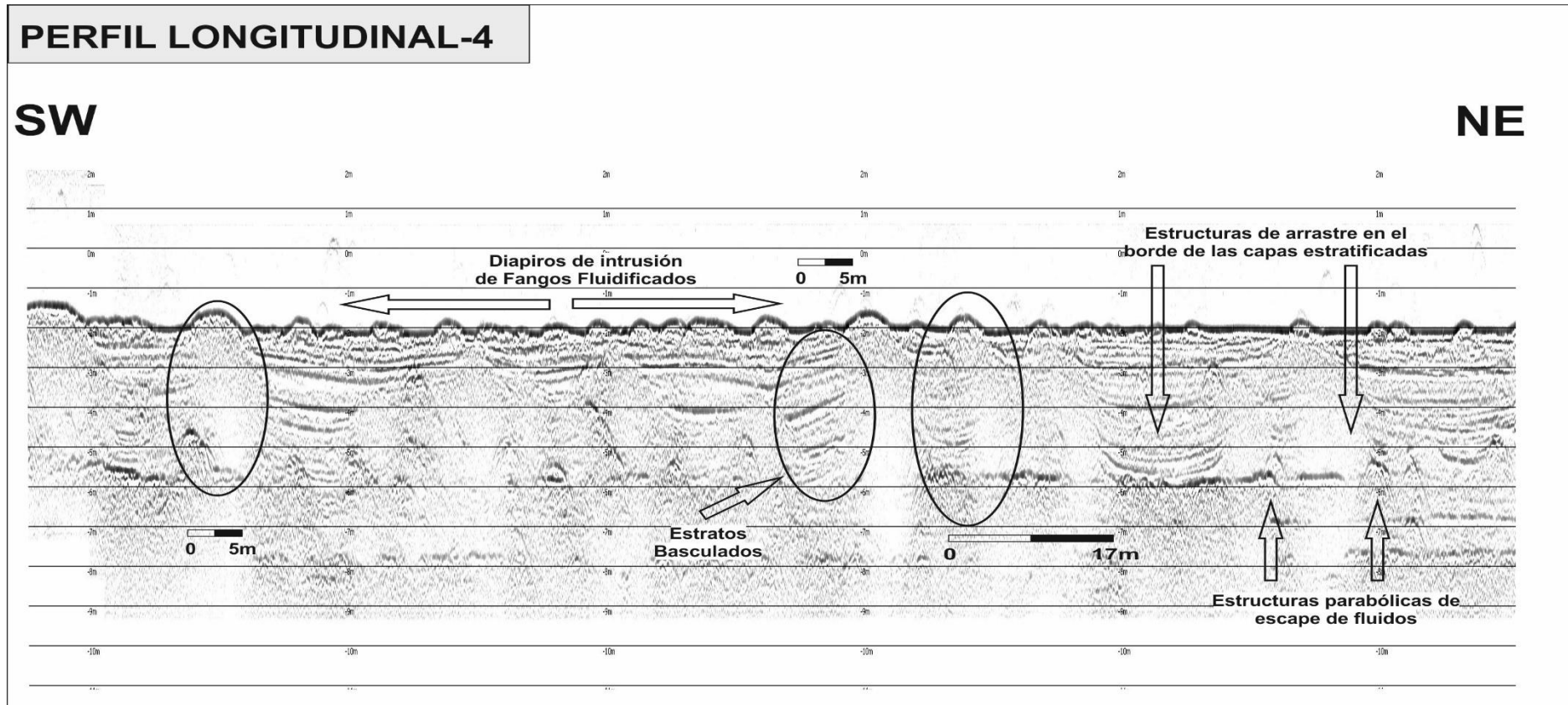


Figura 14. Perfil sísmico 4 con una longitud de unos 310 metros y sentido hacia el NE. La profundidad está referida al cero del puerto

Estructuras de deformación

A continuación, se describe con más detalles algunas de estas estructuras de deformación por sobrepresión que afecta al relleno sedimentario de la periferia de los apilamientos.

Estructura 1

En el siguiente registro se observan estructuras de escape que deforman la capa identificada como basamento acústico alterando su posición natural y rompiendo fragmentos de entre 5 y 15 metros que se acercan a la superficie del lecho marino, aunque sin alterarlo (Fig. 15).

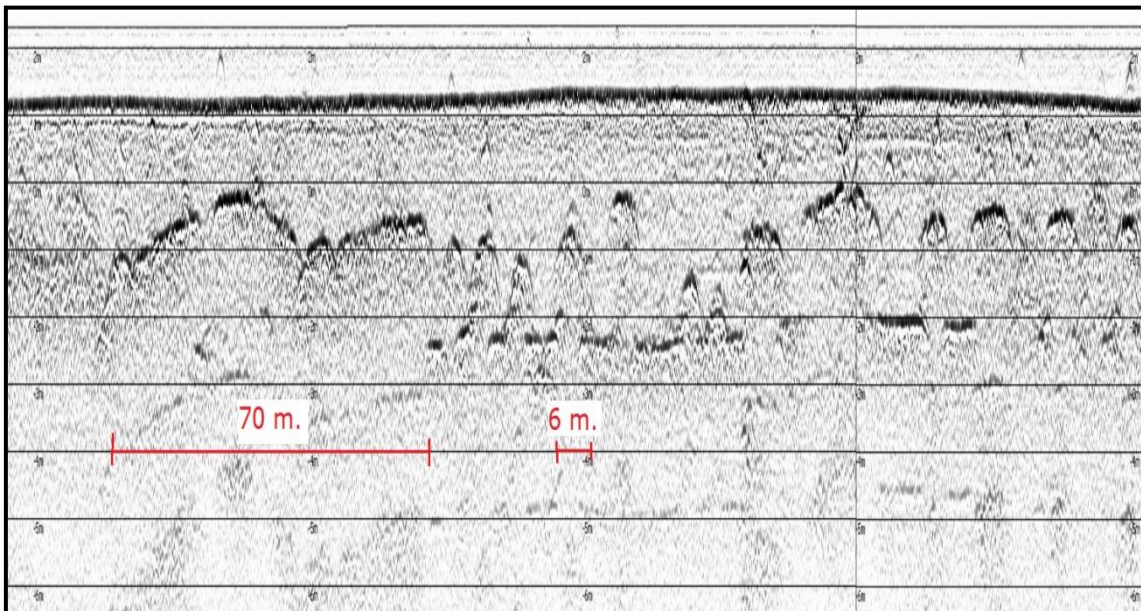


Figura15. Fragmento del perfil 1 en el sector central.

En el siguiente perfil (Fig. 16), las estructuras de escape de fluido son muy abundantes en prácticamente todo el perfil, se observa un basamento acústico intensamente deformado; sin embargo la parte superior del relleno sedimentario conserva la estructura original; lo que indica que las estructuras de escape no han alcanzado la superficie.

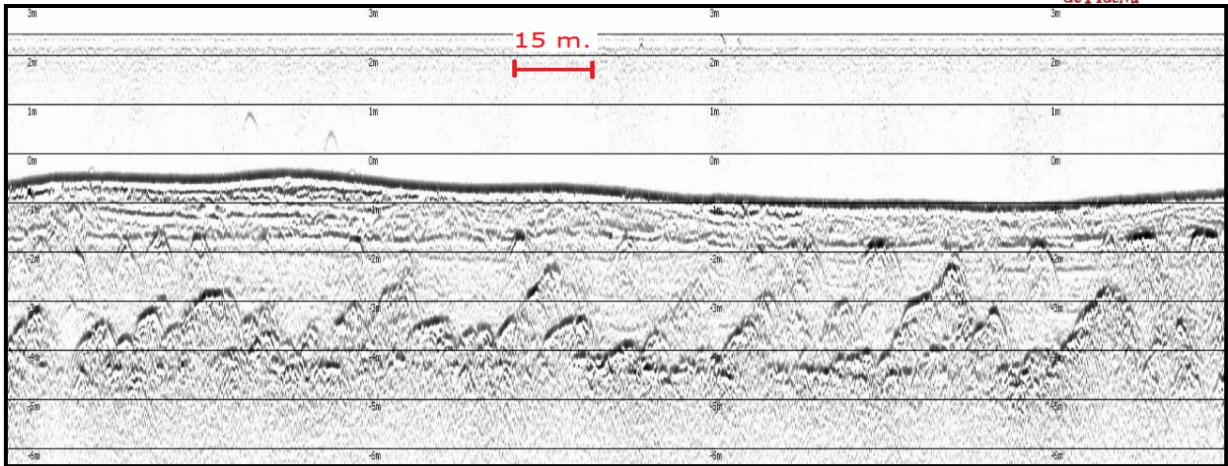


Figura 16. Fragmento del perfil 3 en el sector NE.

Estructura 2

En esta imagen (Fig. 17) se observan fracturas en el basamento acústico por escape de fluidos y deformación dúctil de las capas de fangos comprendidas entre dicho basamento y la cobertera superficial. Es apreciable la formación incipiente de formas diapíricas que no llegan a afectar a la superficie de lecho del canal, conservándose la estructura sedimentaria de los sedimentos; estratificación horizontal algunas formas de fondo (megaripples).

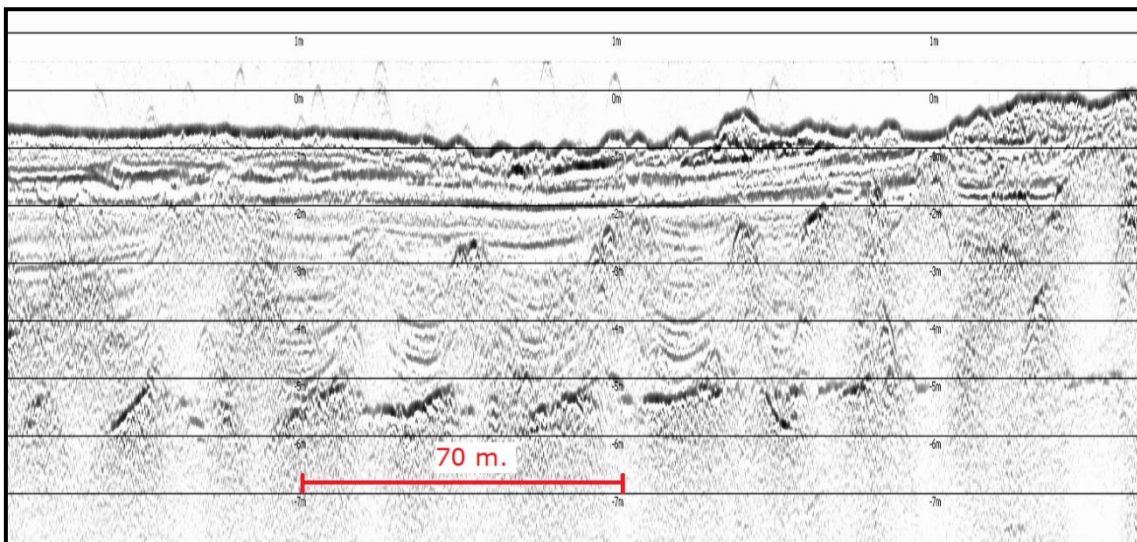


Figura 17. Fracturas del basamento acústico por escape de fluidos. Perfil 3 sector SW.

Estructura 3

En este perfil se observa la rotura del basamento acústico y consiguiente elevación de la superficie del lecho marino (Fig. 18). Se origina una pluma diapirica de aproximadamente 30 metros de longitud, que origina un abultamiento en el lecho del canal.

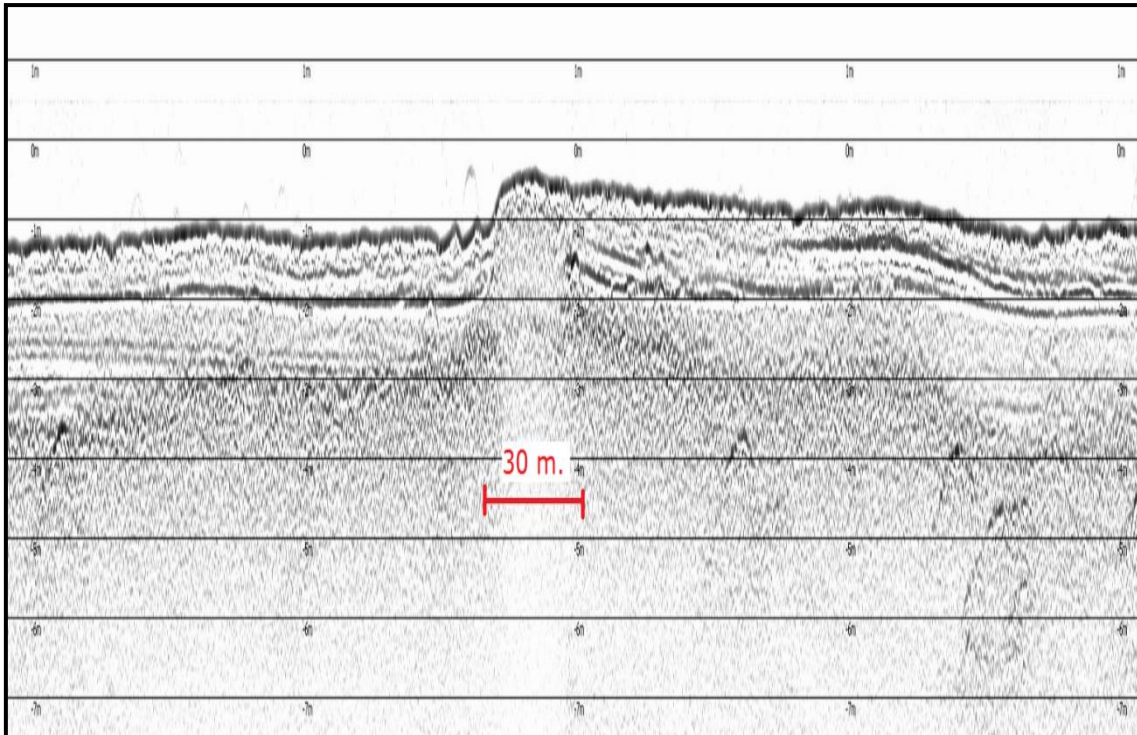


Figura 18. Fragmento del perfil 3 en el sector central.

Estructura 4

Se observa fractura del basamento acústico por ascenso de fluidos (Fig. 19, 20, 21 y 22), deformación dúctil de las capas intermedias que desencadenan en elevaciones del lecho marino. Estas estructuras diapíricas son de entre 15 y 50 metros de longitud concentrándose en el sector SW.

En la figura 23 se aprecia cómo se produce la convergencia de numerosas estructuras diapiricas, originando un gran domo de extrusión con una longitud superior a los 300 metros.

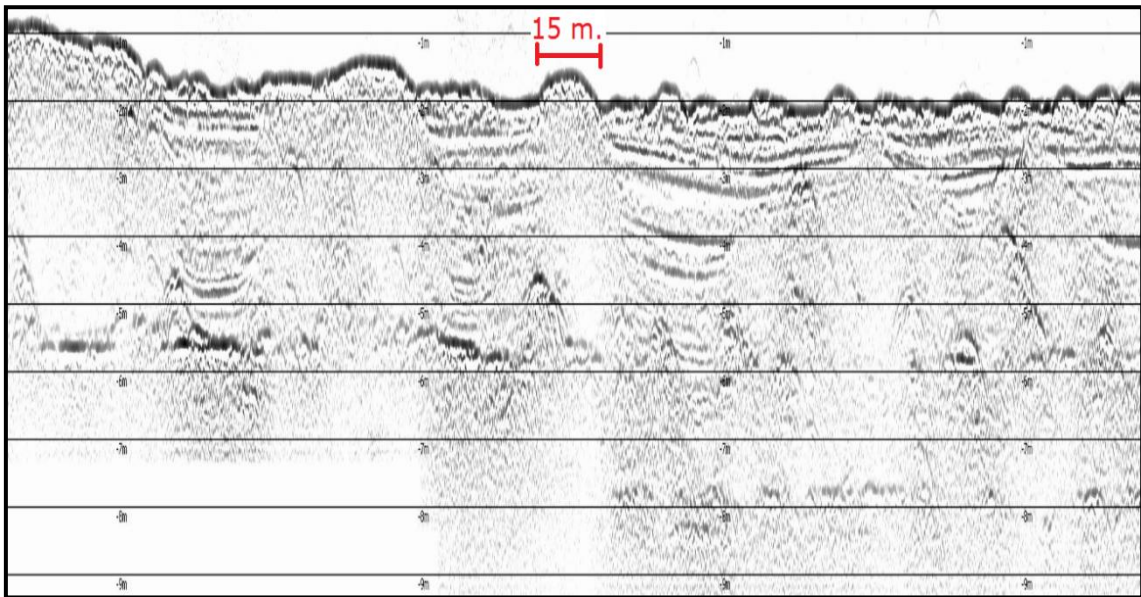


Figura 19. Fragmento del perfil 4 en el sector SW.

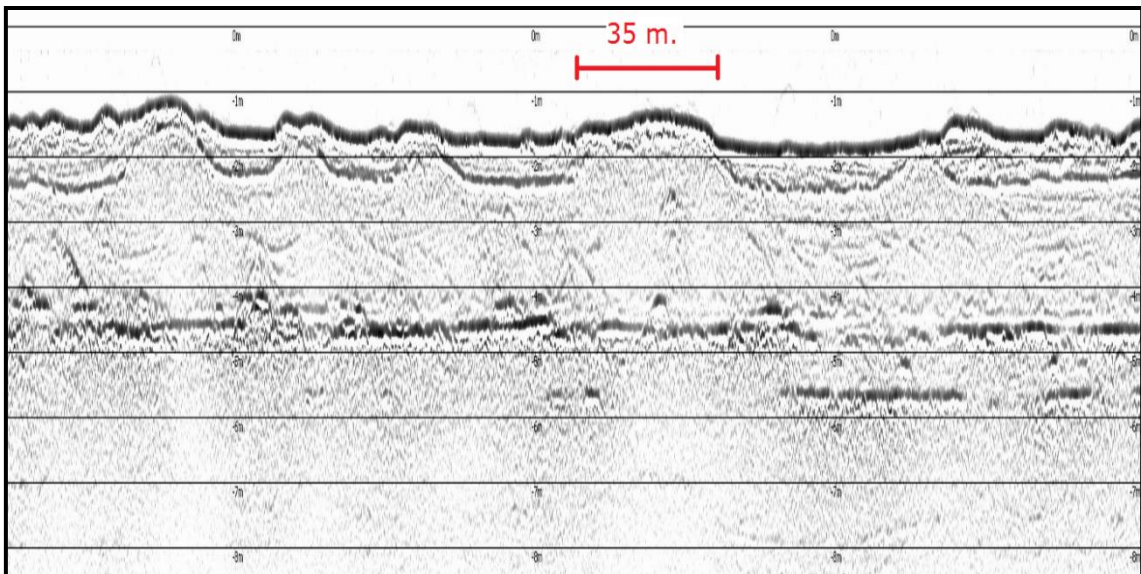


Figura 20. Fragmento del perfil 4 sector NE.

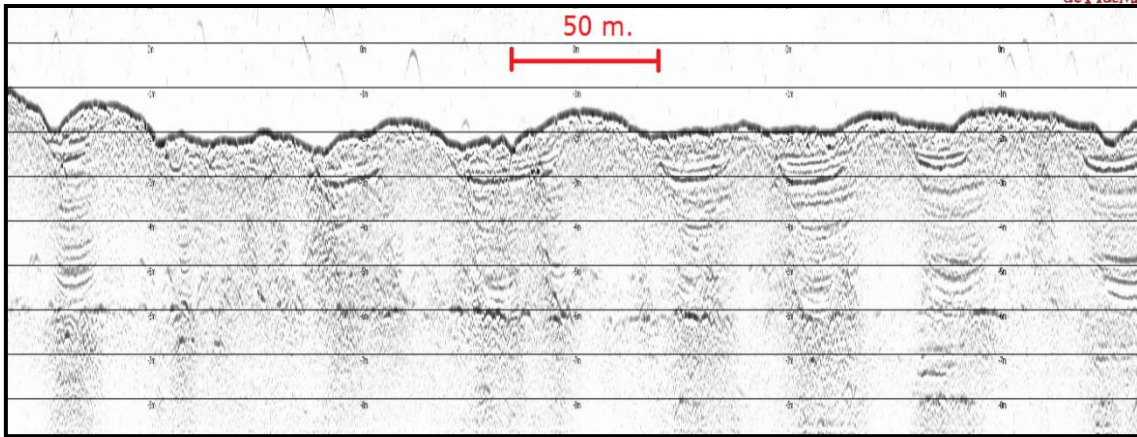


Figura 21. Fragmento del perfil 5 sector central.

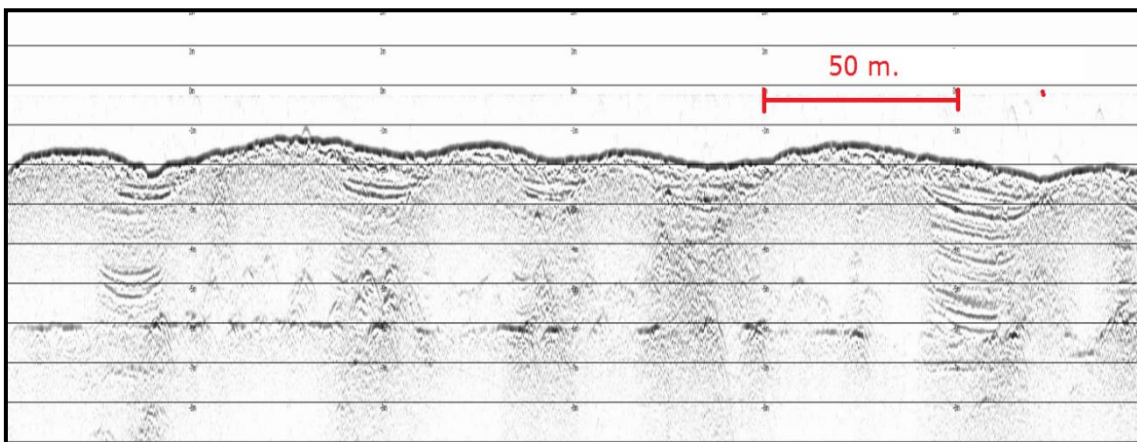


Figura 22. Fragmento del perfil 6 sector SW. Abundantes las fracturas de la capa basal.

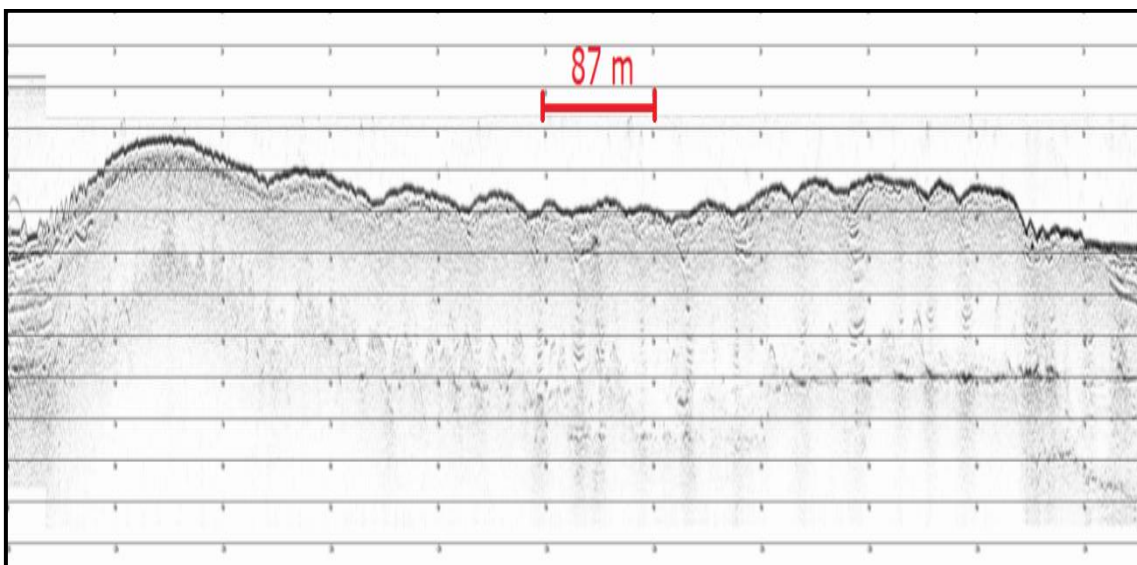


Figura 23. Abultamiento en el sector SW, perfil 7. A la izquierda se observa el canal submareal.

Estructura 5

En la siguiente imagen del registro sísmico (Fig. 24) se observa el detalle de una pluma ascendente de fluidos, que alcanza una altura de tres metros y se produce en el interior de uno de los diapiros.

Estas estructuras de escape en forma de plumas en el interior de diapiros se han observado en otros perfiles, aunque de menores dimensiones, esto indica que se pueden originar estructuras de deformación en etapas diferentes.

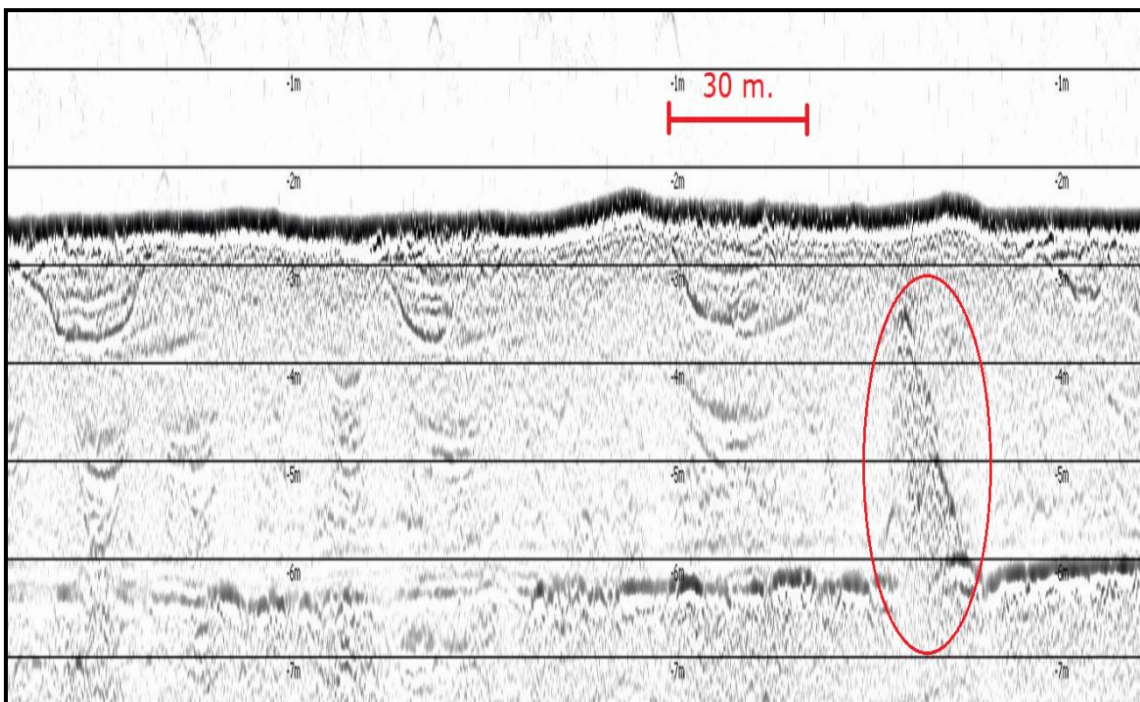


Figura 1. Fragmento del perfil 7 en el sector central.

Estas estructuras de deformación afectan de forma muy intensa al sector del canal más cercano a los apilamientos de la Zona 2, alcanzado el mayor grado de deformación en la parte apical del apilamiento en dirección sur. En sentido este, hacia la margen de Palos de la Frontera la deformación se atenúa y se conserva la estructura sedimentaria original.

Síntoma claro de que estas estructuras de deformación están originadas por sobre presiones ejercidas por los apilamientos de fosfoyesos sobre el sustrato sedimentario que los soporta.

La morfología del relleno sedimentario (Fig. 2 y 3) tiene forma de una cuña que se engrosa en sentido sur-este, por lo que la sobre presión origina una migración de fluidos en ese mismo sentido, por lo que es congruente que las estructuras de deformación originas por esa migración avancen en ese sentido.

Resultados de la batimetría del sector bajo del Estuario del Río Tinto

Las campañas de perfiles sísmicos realizadas con la sonda multi-parametria, permiten realizar un mapa batimétrico de detalle de todo el sector estudiado; que se puede observar en la figura 25.

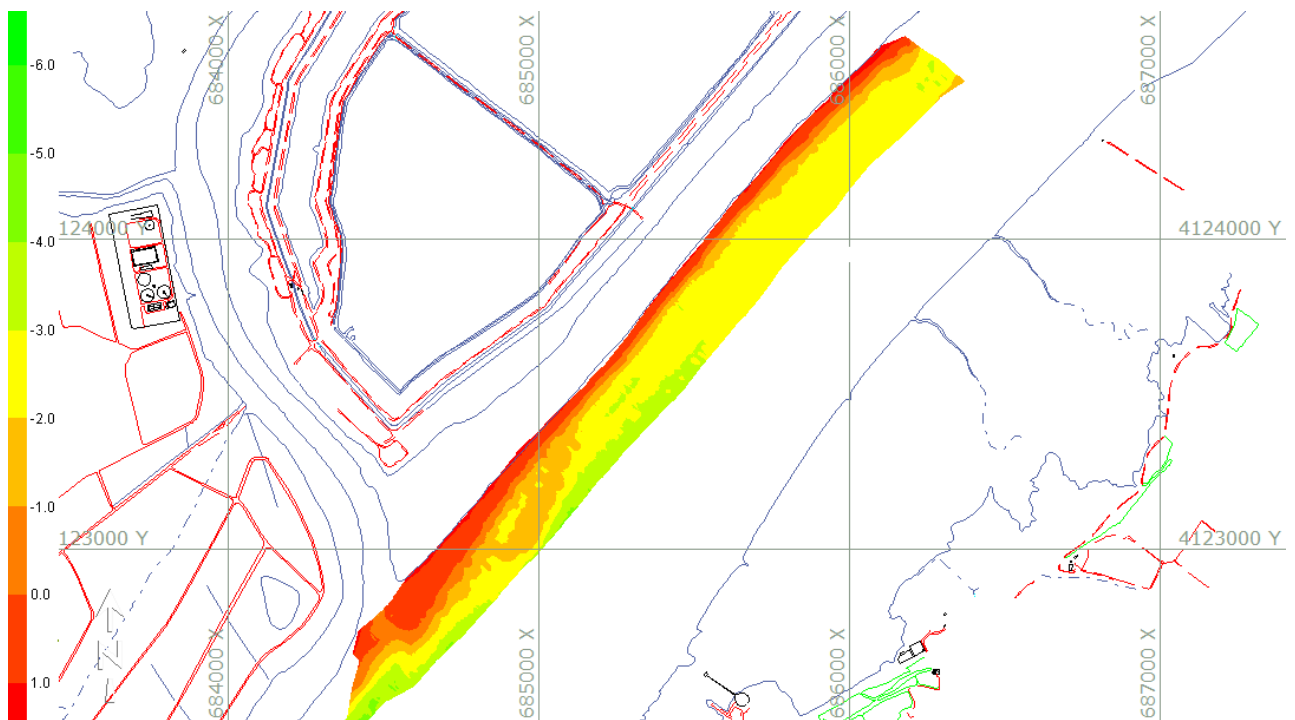


Figura 25. Mapa batimétrico de la zona periférica del apilamiento de Fosfoyesos.

Una reconstrucción en tres dimensiones de la batimetría de esa zona (Fig. 26), permite observar un importante abultamiento del fondo del canal en el sector apical del apilamiento de la Zona 2.

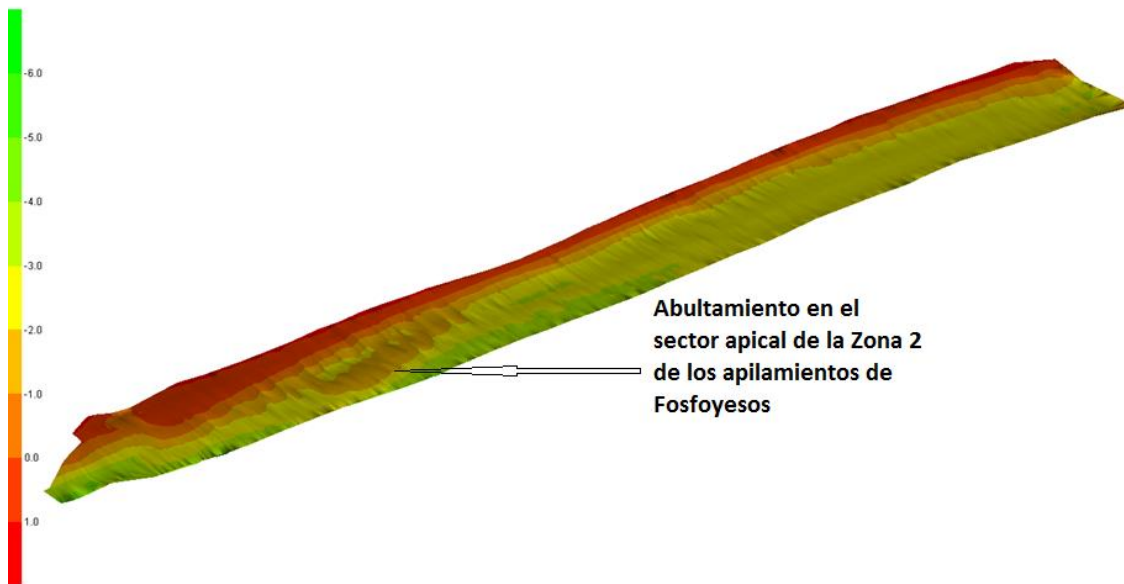


Figura 26. Reconstrucción en tres dimensiones del sector de canal periférico al apilamiento de fosfoyesos de la Zona 2.

Este abultamiento tiene una longitud superior a los 300 metros y una anchura media de 70 metros. Su estructura interna (Fig. 23) se corresponde a una extrusión diapirica formada por estructuras menores coalescentes.

CONCLUSIONES

- 1.- Es necesario realizar un estudio detallado de la geología de subsuelo en las zonas ocupadas por las balsas y los apilamientos de fosfoyesos.
- 2.- Los datos obtenidos mediante sísmica de alta resolución en la zona inter y submareales de las falsas y los apilamientos, demuestran que la estructura sedimentaria sub-superficial (los 5 primeros metros de acumulación sedimentaria; presenta una alta deformación por sobrepresión que origina numerosas estructuras de escape de fluidos y extrusiones en forma de diapiros de fango de dimensiones decamétricas. Además, la batimetría del canal

del estuario del Río Tinto en la periferia de los apilamientos, muestra importantes deformaciones en su estructura superficial originadas por las estructuras diapíricas.

3.- Los datos obtenidos mediante sísmica en la zona periférica a las balsas y los apilamientos son completamente inéditos y demuestran la fuerte afectación por sobre presión del sustrato sedimentario. Estos efectos no se han tenido en cuenta en trabajos anteriores realizados para analizar la estabilidad de la estructura de apilamientos. Además, la migración e fluidos ha modificado completamente la estructura sedimentaria y por lo tanto el comportamiento mecánico del soporte sedimentario de las balsas.

4.- El estudio realizado se ha centrado en la zona periférica de los apilamientos, y solo afecta a los primeros 6 metros de sustrato sedimentario. Es necesario conocer la situación real del subsuelo que soporta la estructura de acumulación de los fosfoyesos, para determinar su grado de afectación por la sobrepresión y los efectos que puede tener la migración los fluidos que se esta producción.

5.- Todo lo anterior hace necesario que se tenga que tener en cuenta un nuevo escenario en la situación de las balsas y los apilamientos y su seguridad estructural.

ANALISIS A LA PROTECCIÓN DE LAS BALSAS DE FOSFOYESOS FRENTE A FENÓMENOS DE TSUNAMI

El estudio expresa en el apartado 3.3 que “el escenario más desfavorable se daría en el caso de un tsunami originado por la falla CFW (Cádiz Wedge Fault), en el que el extremo norte de la zona 4 y las zonas bajas de los esteros de Rincón y Mendaña serían susceptibles de sufrir una inundación de 2,5 metros sobre el nivel de agua habitual, quedando reducida dicha altura de inundación a 1 m en las zonas bajas de marisma que circundan las balsas.” En el segundo párrafo de este estudio se afirma que “la precisión alcanzada con el análisis realizado no permitiría asegurar que bajo un escenario de tsunami no entrase en contacto el agua en ningún punto con las balsas” y que “un tsunami no afectaría de una manera global a las balsas ocasionando un accidente grave”. A continuación, se incluye un mapa de inundación que refleja las cotas que alcanzaría el agua según la modelización realizada en su estudio.

Ante lo expuesto, puede afirmarse lo siguiente:

- 1) El párrafo explicativo está lleno de imprecisiones al no expresar en ningún momento: el punto de inicio del tsunami en una falla que tiene cientos de kilómetros, la magnitud del sismo que se le atribuye a la citada falla y las dimensiones de la ola supuesta (altura y longitud de onda).
- 2) No se incluye información del software utilizado para la realización del modelo, ni de los parámetros utilizados como condiciones de contorno, ni del modelo digital del terreno utilizado y su precisión, ni de las ecuaciones de propagación utilizadas.
- 3) Se refieren las cotas al “nivel habitual” del agua, sin tener en cuenta que se trata de un sistema mareal con diferencias de cota entre pleamares y bajamares y entre mareas vivas y mareas muertas que pueden superar los tres metros. Tampoco se especifica si el modelo ha sido aplicado en uno u otro de estos niveles, aunque la afirmación de que la cota del agua simplemente alcanzaría el borde de la marisma hace pensar que el modelo ha sido aplicado en marea baja, ya que una simple pleamar viva alcanza este nivel sin necesidad de el incremento de altura generado durante un tsunami.

- 4) Se contempla el fenómeno de tsunami como una mera inundación, sin tener en cuenta en ningún momento las velocidades que el agua alcanzaría en los canales del estuario al encauzarse para entrar y salir del mismo. Estas velocidades serían de varios metros por segundo y generarían, sin duda, erosión en el fondo de los canales y en sus márgenes, pudiendo generar desestabilización de los mismos como ocurrió con velocidades mucho menores durante una inundación en el estuario del Odiel bajo el puente hacia Corrales en marzo de 2012 (figura 1).



Figura 1. Deslizamientos generados en la orilla debidos al descalce de la misma por erosión en el margen del canal durante una avenida del Odiel.

- 5) Aunque no se especifica en el estudio, las dimensiones de la ola de tsunami han sido claramente infradimensionadas. Comparando el mapa presentado con una modelización realizada por la empresa NAUTILUS INGENIERÍA MARÍTIMA S.L. en mayo de 2011 (figura 2) se observa que las cotas de inundación en la zona costera abierta situada frente al complejo de la refinería de REPSOL, el modelo presentado por EPTISA alcanza una extensión de la inundación sensiblemente menor que el de NIMSL con una altura de ola supuesta de 10 m. Es curioso que el modelo de NMSL también subestima las dimensiones de la ola, cuando se conoce que el tsunami del terremoto de Lisboa alcanzó en Huelva los 15 metros.

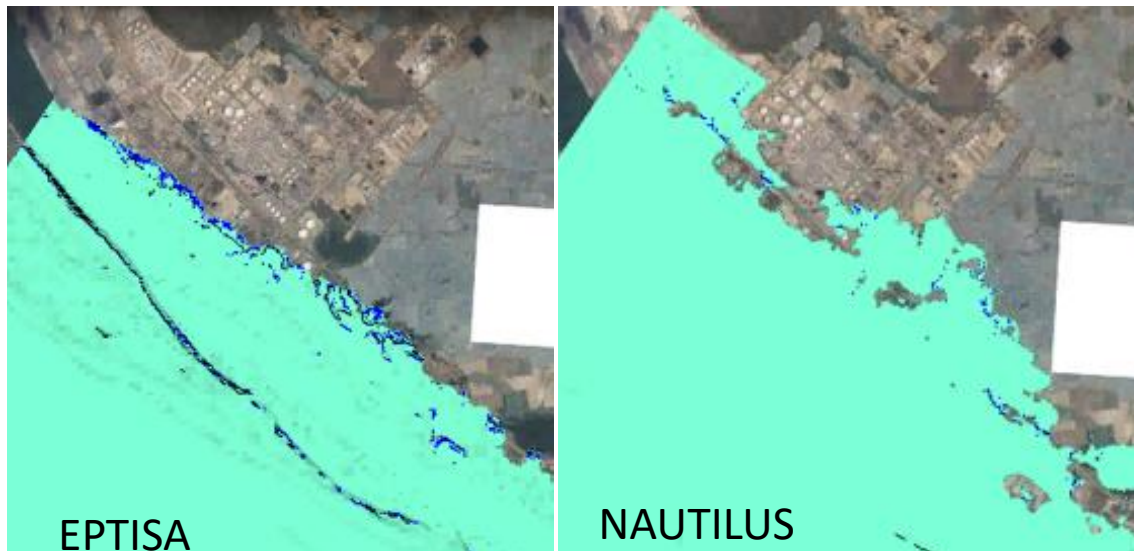


Figura 2. Comparación de las zonas inundadas en el estudio de EPTISA (izquierda) y en el estudio de NAUTILUS INGENIERÍA MARÍTIMA. En el segundo caso la altura de la ola estimada es de 10 metros, 5 metros inferior a la que originó el terremoto de Lisboa.

Estas consideraciones niegan la afirmación realizada por EPTISA de que se ha considerado el escenario más desfavorable.

Por otra parte, la solución que el informe de EPTISA propone para la defensa del frente de las balsas no toma en consideración las probabilidades de que el seísmo previo al tsunami produzca fenómenos de licuefacción en los sedimentos que sustentan las balsas. Los estudios presentados por TRAGSATEC entre 2009 y 2010 ponían de manifiesto la presencia de fluidos a presión contenidos en los poros de una capa de arena intermedia a dos capas impermeables. Cualquier rotura provocada por un seísmo generaría una salida instantánea de estos fluidos con una notable pérdida de la capacidad de sustentación de los mismos al licuefactar las capas superiores. Esto redundaría en un desplome de parte de las balsas situándolas a cotas inferiores y con mayor susceptibilidad a la ola del posterior tsunami. La solución propuesta no haría sino incrementar el peso del frente de las balsas facilitando el desplome de las mismas en este supuesto.

ESTUDIOS SOBRE MOVILIDAD DE CONTAMINANTES

Caracterización y clasificación del fosfoyeso de acuerdo a la normativa europea

El fosfoyeso es el principal residuo generado por la industria de fertilizantes fosfatados. A pesar del alto nivel de contaminantes encontrados normalmente en estos residuos y de la cercanía de las balsas a las ciudades, no hay una normativa específica para su adecuada gestión. En este estudio, se aplica el test de lixiviación propuesto por la actual normativa europea de gestión y clasificación de residuos en el fosfoyeso de la balsa de Huelva, y los resultados se comparan con otros fosfoyesos del mundo. Los principales resultados son:

1. El fosfoyeso de Huelva contiene concentraciones anómalas de metales y metaloides comparado a otras balsas del mundo. Las concentraciones de metales como As, Fe, Pb, Sb, Mn, V y Cu en la marisma que soporta al residuo son muy superiores a las observadas en otros fosfoyesos mundiales. Además, las concentraciones de As superan con creces las observadas en otros fosfoyesos mundiales para todo el perfil de la balsa de Huelva, desde superficie hasta la base de marisma (Fig. 1). Destaca también la alta movilidad de dichos contaminantes en solución.

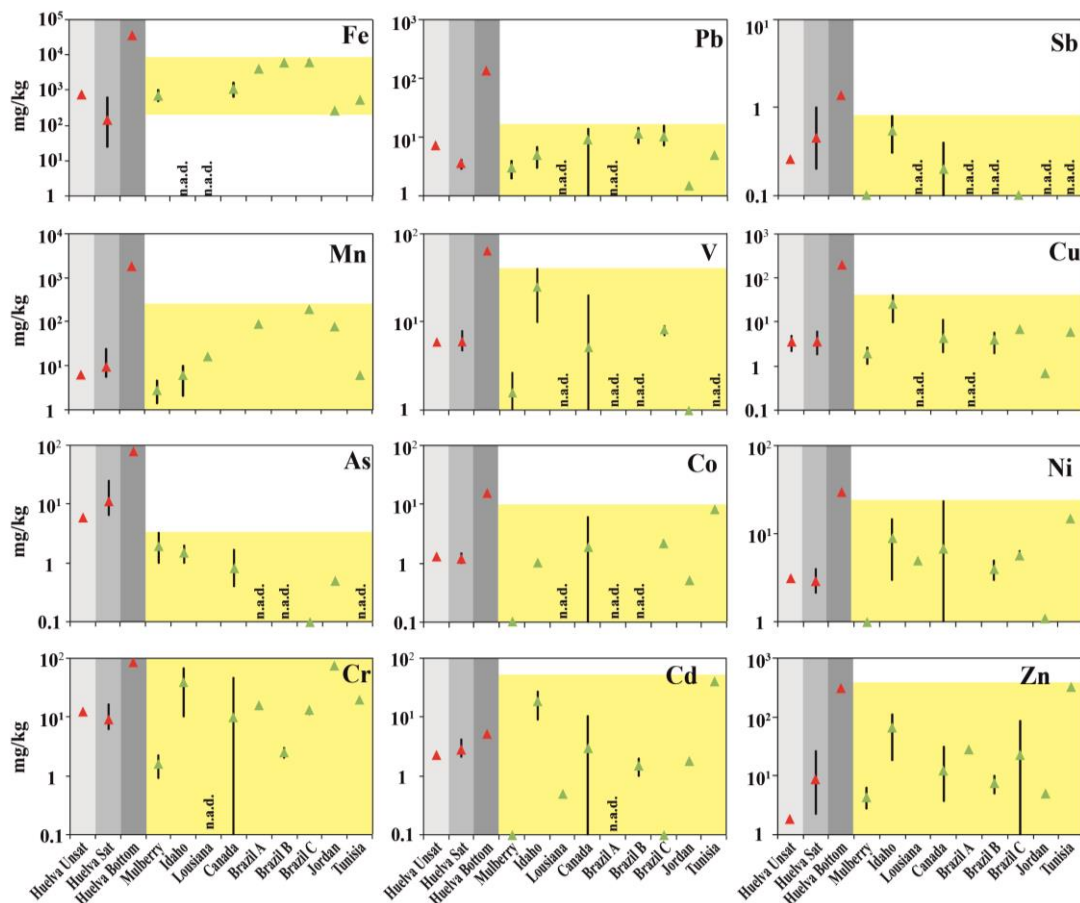


Figura 1. Contenido de contaminantes en el perfil del fosfoyeso de Huelva -zona no saturada (unsat), zona saturada (sat) y suelo de marisma (bottom)- y comparación con otras balsas alrededor del mundo.

2. La alta movilidad de As, principalmente, y Cd, en menor medida, hace que el fosfoyeso de Huelva se clasifique como un residuo peligroso de acuerdo con la normativa actual europea (test de lixiviación EN 12457-2). Esto no ocurre con el fosfoyeso de otras balsas mundiales como por ejemplo la que se encuentra en Mulberry (Florida), la cual almacena buena parte de la producción mundial de fosfoyesos (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados del test de lixiviación aplicado al perfil de profundidad del fosfoyeso de Huelva y al fosfoyeso de Mulberry (Florida), y comparación con los límites reglamentarios de la Unión Europea para la aceptación de residuos en vertederos.

Landfills for:	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn	S
Inert wastes	0.5	20	0.04	0.5	2	0.5	0.4	0.5	0.06	0.1	4	0
Non-hazardous wastes	2	100	1	10	50	10	10	10	0.7	0.5	50	2
Hazardous wastes	25	300	5	70	100	30	40	50	5	7	200	5
Huelva depth profile (m):												
0.5	0.03	0.19	0.12	b.d.1	0.03	0.04	0.09	b.d.1	b.d.1	0.06	0.31	1
1.6	0.09	0.20	0.11	b.d.1	0.04	0.05	0.10	0.02	b.d.1	0.07	0.32	1
2.9	4.24	0.29	0.35	0.22	0.78	0.02	0.43	0.13	0.03	0.02	2.63	1
3.5	3.72	0.29	0.34	0.33	0.74	0.02	0.41	0.14	0.04	0.02	2.57	1
4.1	3.47	0.35	0.38	0.39	1.52	0.02	0.48	0.17	0.05	0.02	2.57	1
5.6	3.22	0.28	0.35	0.34	1.26	0.03	0.38	0.11	0.06	0.03	6.73	1
7	6.71	0.30	0.42	0.26	0.70	0.02	0.46	0.10	0.04	0.03	9.16	1
8.1	6.76	0.23	1.78	0.03	1.78	0.18	1.06	0.01	0.05	0.10	24.7	1
Mulberry (n=8)												
Max	b.d.1	1.20	b.d.1	b.d.1	3.40	2.00	0.80	b.d.1	b.d.1	b.d.1	5.80	1
Min	b.d.1	0.40	b.d.1	b.d.1	1.80	0.40	0.20	b.d.1	b.d.1	b.d.1	2.00	1
Mean	b.d.1	0.80	b.d.1	b.d.1	2.40	1.00	0.40	b.d.1	b.d.1	b.d.1	3.60	1

b.d.1 (below detection limit), n.a.d (no available data).

Exploración del fosfoyeso como fuente potencial de ‘Critical Raw Materials’

Europa afronta el reto del agotamiento progresivo de sus recursos minerales debido a la intensa explotación sufrida a lo largo de años. Aunque las materias primas son indispensables para la economía de la Unión Europea, su disponibilidad está en peligro por el aumento en la demanda a nivel mundial. El panel de expertos en materias primas identifica un grupo de materias primas críticas o ‘Critical Raw Materials’ (elementos de las tierras raras, Sb, Be, Co, Ga, Ge, Mg, In, Nb, Ta y elementos de los platinoides) que poseen un elevado valor económico por sus aplicaciones industriales y tecnológicas pero que presentan un alto riesgo de suministro para la economía de la UE. Los expertos advierten que otras materias primas, como Cr, V, Ni, Zn, Mn, Al, Fe, Mo, Re o Se, que actualmente no están en un riesgo crítico, podrían estarlo a corto plazo si cambian las variables que controlan su suministro. Los mayores productores de estos ‘Critical Raw Materials’ se encuentran fuera de la UE, especialmente China. Esta dependencia no hará más que aumentar en el futuro, ya que las necesidades de materias primas están llamadas a crecer bajo el efecto de las tecnologías emergentes, de las que a su vez dependen la innovación y la competitividad europeas. En algunos casos, esta dependencia es crítica, como por ejemplo para el Ga, In, Ge o tierras raras cuya demanda podría multiplicarse exponencialmente a lo largo de los próximos años.

Por consiguiente, la Unión Europea recomienda la investigación de nuevas fuentes de recursos minerales y el desarrollo de técnicas eficientes de aprovechamiento. Una de las fuentes más prometedoras de materias primas es la valorización de residuos. La obtención de materias primas a partir de residuos reduce la presión sobre la demanda de estas materias, el volumen de residuos generado y el consumo energético derivados de las actividades de extracción y procesado del mineral. En este sentido, este estudio explora la posibilidad de usar el fosfoyeso de Huelva, así como el agua de proceso embalsada sobre la balsa y las infiltraciones laterales, como una fuente de elementos de interés económico, estimando las reservas disponibles y discutiendo los pros y contras de esta fuente potencial.

En general, los elementos de interés económico en el fosfoyeso de Huelva se encuentran por debajo de las leyes comúnmente publicadas para depósitos convencionales (Fig. 3). Sin embargo, el enorme tonelaje almacenado constituye una fuente secundaria de elementos a tener en cuenta. Alrededor de 30,400 toneladas de B, 28,000 toneladas de tierras raras, 1800 toneladas de U, 1400 toneladas de Cr, 1300 toneladas de V y menores cantidades de otros elementos de interés económico (p.e. Cu, Ni, Sc y Ga) se encuentran

albergados en el fosfoyeso sólido, mientras que menores cantidades se encuentran en el agua de proceso (1360 toneladas de Zn, 760 toneladas de V, 630 toneladas de U y Cr, 225 toneladas de Cu, 160 toneladas de Ni, 190 toneladas de tierras raras).

Considerando los precios del mercado actual, las reservas contenidas en el fosfoyeso de Huelva tienen un valor potencial de alrededor de 8937 millones de dólares estadounidenses. La recuperación de estos elementos es técnicamente posible; aunque se requiere más investigación en los procesos de refinado para aumentar la pureza del producto final. Los resultados de este estudio podrían ser de interés en otras balsas de fosfoyesos del mundo con la idea de proporcionar una gestión más sostenible y rentable de estos residuos.

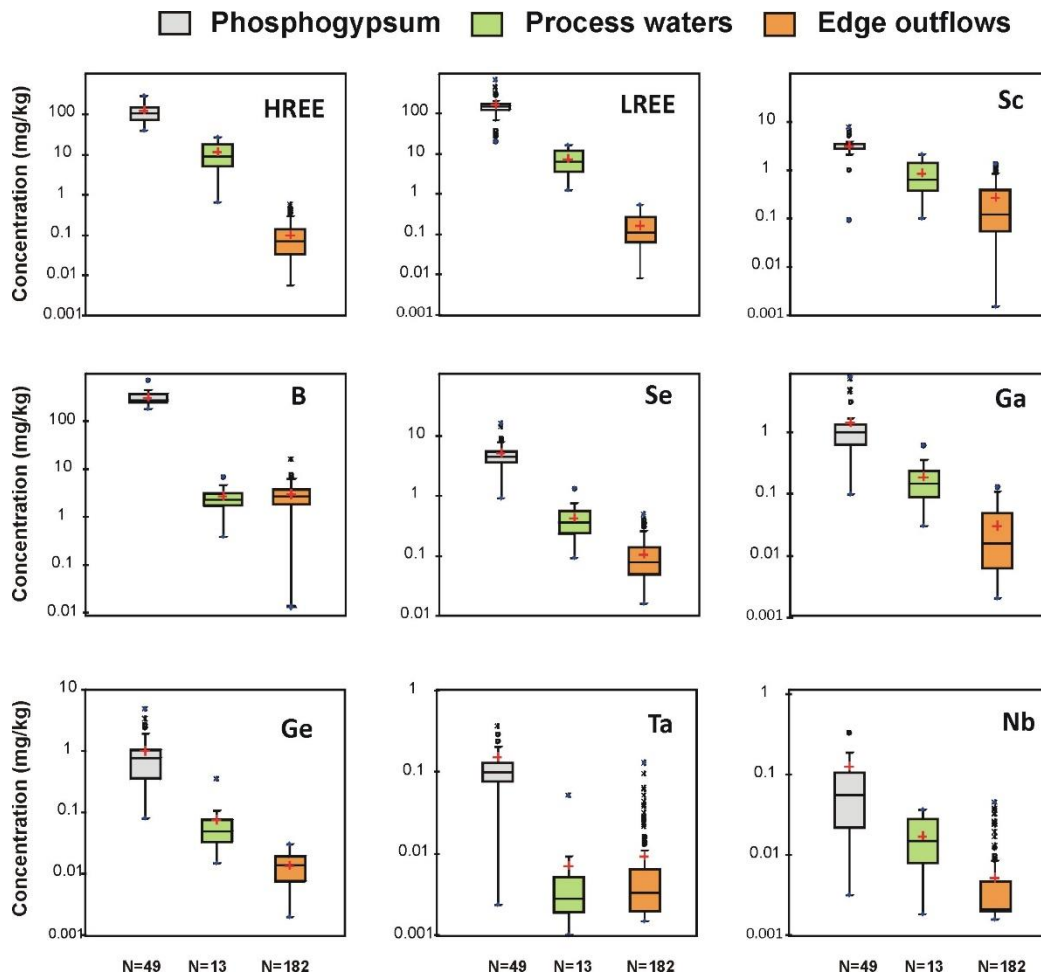


Figura 3. Concentración de algunos elementos de interés económico contenidos en el fosfoyeso sólido (en mg/kg), y en el agua de proceso y las salidas de borde (mg/L).

Los resultados de este trabajo se han publicado en el siguiente artículo internacional:

C.R. Cánovas, R. Pérez-López, F. Macías, S. Chapron, J.M. Nieto, S. Pellet-Rostaing (2017). Exploration of fertilizer industry wastes as potential source of critical raw materials. *Journal of Cleaner Production*, 143, 497-505. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.083>