



GEOMETRÍA DE LAS UNIDADES SUPERIORES DEL RELLENO HOLOCENO DEL CANAL ESTUARINO DEL ODIEL (HUELVA, SO DE ESPAÑA)

Geometry of the upper units of the Holocene sedimentary infilling in the Odiel estuarine channel (Huelva, SW Spain)

M. Eugenia Aguilar¹, Juan A. Morales¹, Raquel Morales-Mateo¹, M. Carmen Feria²,
Miguel A. González³ y Diego González-Batanero⁴

¹ Grupo de Geociencias Aplicadas e Ingeniería Ambiental (GAIA), Universidad de Huelva, 21071 Huelva.
maria.aguilar@dct.uhu.es; moralesmateoraquel@gmail.com; jmorales@dgeo.uhu.es

² IGME, c/ Calera, 1, Tres Cantos, 28760 Madrid; maria.feria@uteplanageo.com

³ Navios de Aviso S.L., Avenida de Andalucía, 9, 21006 Huelva; miguelgonzalez@naviosdeaviso.com

⁴ ANFORA G.I.P, Avda. Alameda Sudheim 28, 7-E, 21003 Huelva; diego@anforagrup.com

Abstract: Since the 90s decade, the authority of Huelva harbor located on the estuary of the Odiel River, has made numerous vibracores in the port channel. These data are available in their files. In this study 258 of these vibracores were analyzed, along with other 72 vibracores carried out by the research team of authors since 1992. In addition, 15 drilling cores were obtained and analyzed from a sedimentological point of view. The record of each core was represented under standards criteria and introduced in a GIS, to synthesize and facilitate the analysis of geological data. On the other hand, 38 seismic profiles were obtained during September 2013 in order to make a three-dimensional model of the sedimentary units constituting the most recent filling of the system. All these stratigraphic and sedimentological information was used to develop 33 geological profiles and to obtain three-dimensional facies models of central and marine domains of the Odiel river estuary. This model used the combination of information on the sedimentary units and their facies offered by cores and the geometry of the lithosismics units observed in seismic profiles. The study of the sedimentary records allowed distinguishing 9 Holocene lithological units deposited on upper Pleistocene basal bodies which in turn are erosively overlaying Upper Miocene blue marls. The total thickness of the entire Holocene succession reaches more than 30 m in the deepest part of the estuary. The 3 lower units represent a transgressive sequence deposited under conditions of sea-level rise, while the upper 3 units constitute a regressive (prograding) sequence deposited under a more or less stable sea level. The disposal of reflective surfaces allowed characterizing the geometry of different sedimentary units, which are separated by erosive discordances.

Keywords: Odiel estuary, Holocene sedimentary sequence, reflective seismic, facies architecture.

Resumen: Desde la década de los 90, la Autoridad Portuaria de Huelva ha realizado numerosos vibracores en los canales del estuario del río Odiel. En este estudio se han analizado 258 vibracores. Por otra parte, 15 sondeos fueron realizados y analizados desde un punto de vista sedimentológico. El registro de los testigos fue representado bajo criterios estándares e introducido en un SIG, para facilitar el análisis de los datos geológicos. Además, se llevó a cabo una campaña geofísica mediante símica de reflexión. Se realizaron 38 perfiles sísmicos de las unidades sedimentarias más recientes. Toda la información estratigráfica y sedimentológica fue utilizada para elaborar 33 perfiles geológicos distribuidos en forma tridimensional. El objetivo de este trabajo es la construcción de modelos de facies 3D de las zonas central y marina del estuario del río Odiel a través de la información sedimentaria sumada al conocimiento de la geometría observada en los perfiles sísmicos. El estudio de las columnas ha permitido distinguir una secuencia de 9 unidades litológicas holocenas depositadas sobre cuerpos basales de edad Pleistoceno superior, que están a su vez depositados erosivamente sobre las margas azules

del Mioceno Superior. Las 3 unidades holocenas inferiores representan una secuencia transgresiva depositada bajo condiciones de subida del nivel del mar, mientras que la parte superior de la secuencia es una secuencia progradante depositada bajo un nivel del mar más o menos estable. La disposición de las superficies reflectoras permitió caracterizar la geometría de las diferentes unidades sedimentarias, que están separadas por discordancias erosivas.

Palabras clave: Odiel, secuencia sedimentaria holocena, sísmica de reflexión, arquitectura de facies.

Aguilar, M.E., Morales, J.A., Morales-Mateo, R., Feria, M.C., González, M.A., González-Batanero, D., 2019. Geometría de las unidades superiores del relleno holoceno del canal estuarino del Odiel (Huelva, SO de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32 (1): 127-142.

Introducción

Un estuario constituye un sistema sensible a variaciones climáticas e hidrodinámicas, que controlan junto con otros factores, su evolución. Este hecho, asociado a la intensa actividad portuaria del entorno, justifica la importancia de este estudio. Como principales causas que condicionan la transformación a corto plazo de este medio sedimentario se combinan la acción de los agentes naturales (mareas, oleaje, y descargas fluviales) y la acción antrópica sobre el medio para el desarrollo de las actividades humanas (industria, pesca, turismo y comercio), mientras que a largo plazo, son el nivel del mar, la tectónica y las condiciones de aporte sedimentario los factores que ejercen un mayor control.

En el sector central de la costa onubense se encuentra el sistema conocido localmente como Ría de Huelva, constituido por la desembocadura de los estuarios de los ríos Tinto y Odiel. A pesar del nombre local de ría, no se trata de un sistema de ría en sentido estricto, sino de un sistema estuarino mesomareal cuyo desarrollo está condicionado por la marea, el oleaje y los aportes detríticos que recibe de ambos cauces fluviales. El estuario del río Odiel presenta una alta tasa de sedimentación, algo que dificulta el tránsito hacia los puertos a través de su canal mareal. La principal causa que dificulta dicho tránsito es la falta de calado útil, por lo que se precisa de dragados para garantizar condiciones óptimas de navegación.

El interés científico de este tipo de sistemas, unido al interés económico de este sistema en particular justifican un estudio detallado de la sedimentología del estuario. El presente estudio incluye la caracterización de los sedimentos del relleno, así como las variaciones espaciales y temporales de facies. Por otro lado, se analizan las pautas del transporte y depósito del sedimento superficial y su movilidad entre los diferentes sectores del estuario, a fin de explicar el origen de las relaciones entre los distintos dispositivos estratigráficos. Este planteamiento, además de tener una motivación puramente científica tiene un interés claramente aplicado. Por una parte, la aplicación de los conocimientos adquiridos sobre el registro sedimentario, el análisis de la geometría de los cuerpos sedimentarios observados en registros sísmicos de alta resolución se enfoca hacia a una mejor gestión y conservación del medio costero. Por otra parte, y teniendo en cuenta la intensa actividad portuaria desarrollada en este estuario, el conocimiento generado por este estudio es también aplicable a una mejor gestión de la zona portuaria.

Marco fisiográfico del estuario

El estuario de los ríos Tinto y Odiel se localiza en la costa SO de la Península Ibérica, en el sector noroccidental del Golfo de Cádiz. Los cursos fluviales de ambos ríos atraviesan la provincia de Huelva constituyendo un sistema estuarino en su zona de desembocadura en el Océano Atlántico (Fig. 1). Este sistema estuarino se desarrolla sobre un sustrato constituido por materiales detríticos de edad neógeno-cuaternaria pertenecientes a la etapa más tardía del relleno de la Cuenca del Guadalquivir. Los cursos bajos de los ríos que desembocan en esta franja litoral comenzaron a ser invadidos por el mar hace aproximadamente 10.000 años (Borrego *et al.*, 1999) alcanzándose un nivel del mar estable y similar al actual sobre los 4.500 años A.P. (Delgado *et al.*, 2012)

El río Odiel nace en la Sierra de Aracena y, con 140 km de longitud de cauce, tiene una cuenca de drenaje de 2330 km² (Sarmiento *et al.*, 2005). Atraviesa los materiales de la zona de Ossa Morena que incluyen rocas metamórficas e ígneas con edades comprendidas entre el Precámbrico y el Devónico. En su cuenca de drenaje se encuentran enmarcados los materiales de la zona Surportuguesa, que incluye la Faja Pirítica Ibérica (FPI) y la unidad más meridional del Macizo Ibérico Varisco (Julivert *et al.*, 1974). La Faja Pirítica incluye al Complejo Pizarroso-Cuarcítico (PQ), de edad devónica, el Complejo Vulcanico-Sedimentario y el grupo Culm, ambos de edad carbonífera (Fig. 1A). La naturaleza metálica de estas formaciones confiere al río unas características geoquímicas especiales que se hacen notar en el modelo de mezcla de su estuario. El estuario del Odiel se puede clasificar como un estuario-barrera o *bar-built estuary* según los criterios de Fairbridge (1980), afectado con un régimen mesomareal semidiurno (Borrego *et al.*, 2000). Su desembocadura está constituida por tres barreras (Flecha de Punta Umbría, Isla Saltés y Flecha de Punta Arenillas) separadas por dos canales (Canal de Punta Umbría y Canal del Padre Santo; Fig. 1B) (Morales *et al.*, 2004), siendo este último la principal vía de navegación hacia el Puerto de Huelva. Dicho canal se extiende en dirección SE con una longitud de unos 13 km desde la Punta del Sebo hasta la costa de la localidad de Mazagón y sobre él se centra el presente estudio. La zona interna de este estuario está constituida por llanuras mareales y marismas desarrolladas sobre cuerpos de acreción estuarina de origen fluvio-marino (Borrego, 1992; Borrego *et al.*, 1999).

De acuerdo con las clasificaciones clásicas (*e.g.*, Roy 1984; Dalrymple *et al.*, 1992; Flor, 1995) los estuarios se dividen longitudinalmente en tres zonas: zona de dominio fluvial o canal superior, zona central o llanuras mareales y zona de dominio marino o complejo de desembocadura. Sin embargo, en el caso del estuario del Odiel, la dinámica sedimentaria, condicionada por la interacción de las mareas y descargas fluviales, ha permitido subdividir el sector central del estuario en dos tramos, de tal manera que se diferencian cuatro sectores dentro de este sistema estuarino (Borrego, 1992) (Fig. 1B):

- Zona de dominio fluvial o estuario fluvial. Presenta un sistema de canales trenzados cuya dinámica sedimentaria está dominada por las mareas, mientras que los depósitos están constituidos por gravas y microconglomerados fluviales.

- Zona central, subdividida en tramos alto (estuario alto) y bajo (estuario bajo). Ambos tramos presentan cuerpos de marisma separados por canales mareales distribuidores. En el tramo alto tiene lugar la mezcla de aguas; por su parte, el tramo bajo está claramente dominado por las mareas. Los cuerpos de marisma en el tramo alto presentan una clara morfología fusiforme, separados por canales de baja sinuosidad, mientras que en el tramo bajo los canales son meandriformes y las islas más irregulares, dando lugar a la

aparición morfológica de un sistema anastomosado. En ambas zonas los sedimentos más abundantes son limos arenosos de origen mareal, afectados por una intensa actividad orgánica.

- Zona de dominio marino o estuario marino. Está dominada por la energía mixta del oleaje y las mareas y formado por una serie de islas-barrera progradantes y un sistema de *cheniers* con una morfología típica en gancho. En la llanura de *cheniers* se desarrollan cuerpos de marisma salada separando los cordones arenosos. Los sedimentos que caracterizan este sector del estuario son de tipo arenoso o limo-arenoso de origen marino.

Este estudio se centra en las dos zonas más externas del estuario, estuario bajo y estuario marino, y dentro de estas zonas se han diferenciado distintas áreas que presentan una disposición geométrica de las unidades sedimentarias diferente al resto. En este sentido, se han diferenciado (Fig. 1):

- Muelle de Levante: corresponde al canal estuarino del tramo más interno del estuario bajo.

- Zona industrial: corresponde al tramo externo del estuario bajo.

- Punta del Sebo: corresponde al tramo más abierto del canal estuarino del Odiel en su confluencia con el canal estuarino del Tinto y la transición con el estuario marino.

- Canal del padre Santo: corresponde al canal estua-

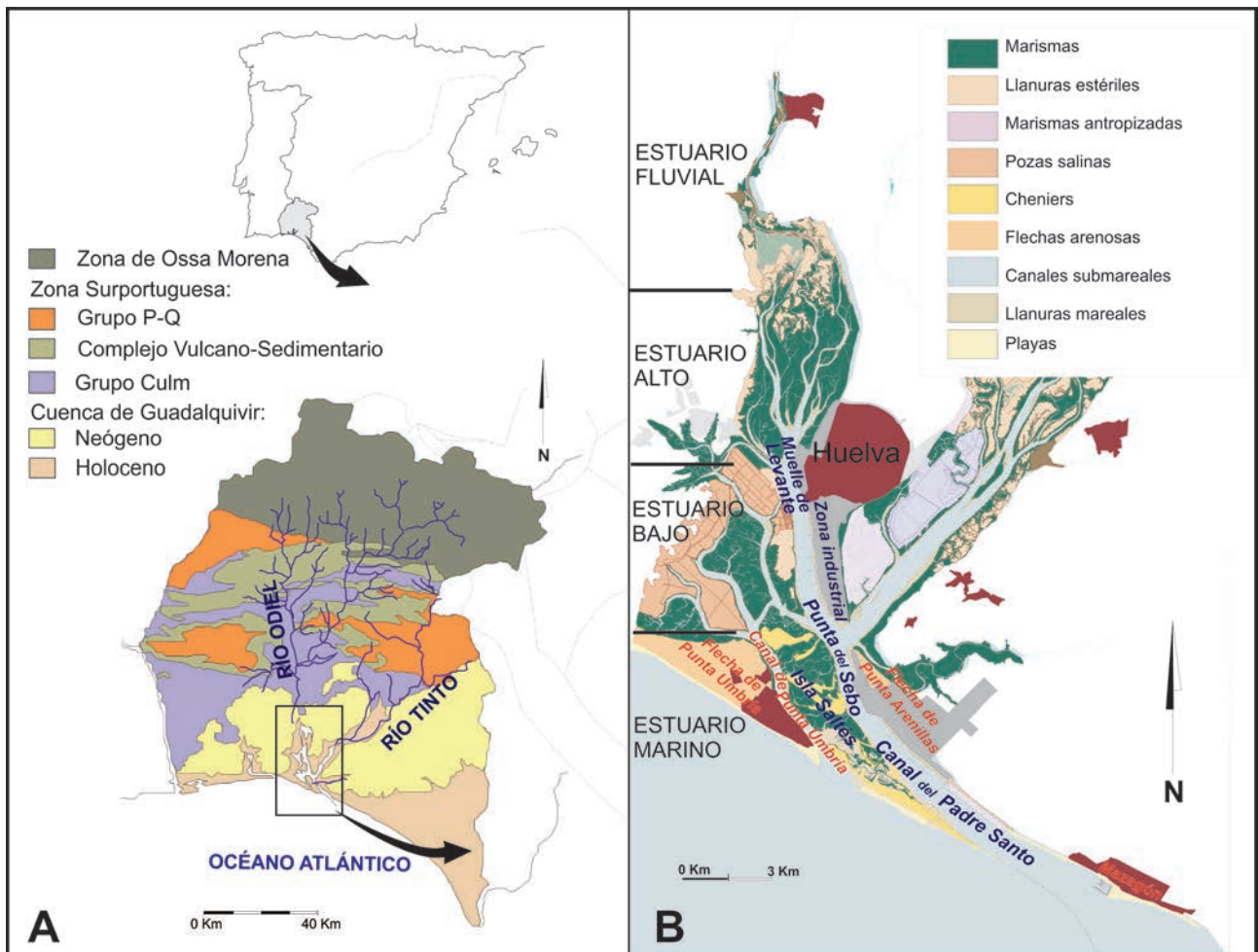


Fig. 1.- A. Localización geográfica y marco geológico del estuario de los ríos Tinto y Odiel. B. distribución de los diferentes sectores del sistema estuarino distinguidos para facilitar la interpretación (modificado de Carro, 2002).

rino del estuario marino, en este caso común para los ríos Odiel y Tinto.

- Isla Saltés: se trata del sistema de cierre en la parte central del estuario marino, que separa el estuario de la zona costera abierta. Está descrita como una llanura de cheniers (Borrego *et al.*, 2000; Morales *et al.*, 2014).

Marco hidrodinámico

El sistema estuarino del Odiel es un medio costero que conecta los caudales fluviales con mar abierto. Su dinámica y sedimentación se ven afectadas por los principales agentes hidrodinámicos marinos y continentales, como son el régimen mareal, la acción del oleaje y las descargas fluviales, todos ellos influenciados por el clima.

El volumen y naturaleza de las descargas fluviales condicionan de forma directa la evolución del sistema estuarino al influir sobre la velocidad de relleno, la naturaleza físico-química de los sedimentos y las condiciones ecológicas del mismo. Dichas descargas fluviales presentan una ciclicidad, tanto estacional como interanual, con una gran irregularidad en las precipitaciones, como es típico de un clima mediterráneo. El flujo medio del ríos Tinto y Odiel es de 49,8 Hm³/mes, aunque puede oscilar entre los 100 Hm³/mes durante los periodos húmedos (desde octubre a marzo), y menos de 5 Hm³/mes durante los meses más secos, desde mayo a septiembre (Borrego, 1992). De acuerdo con Sáinz *et al.* (2004), durante los años secos (precipitaciones <400 mm/año) la descarga media anual del río Odiel es de 79×10⁶ m³/año, mientras que en los años húmedos (precipitaciones >1200 mm/año) los valores medios son de 1670×10⁶ m³/año. La precipitación media anual en el entorno del sistema estuarino es de 520,04 mm/año y la temperatura media anual es 18,17°C (datos de la estación de Huelva 605, para 1984-2010).

El régimen mareal que caracteriza al estuario del Odiel es mesomareal semidiurno, con una leve desigualdad diaria debido a la existencia de una pequeña diferencia en las alturas alcanzadas por las pleamares y las bajamares correspondientes a los dos ciclos mareales diarios (Borrego y Pendón, 1989). El rango mareal medio en la entrada de la Ría de Huelva es de 2,10 m, aunque puede variar entre 1,63 m durante las mareas muertas y 2,90 m durante las mareas vivas (Borrego, 1992; Borrego *et al.*, 1995). La propagación de la onda de marea en el interior del estuario del Odiel sigue un modelo levemente hipsincrónico debido al dominio del efecto ejercido por el estrechamiento de sus canales frente a la pérdida de profundidad (Borrego, 1992). El prisma de marea en el estuario (volumen de agua de intercambio en cada ciclo de marea), varía entre 37,34 Hm³ durante una marea muerta media y 81,75 Hm³ durante una marea viva media (Grande *et al.*, 2000).

Esta área costera está afectada por una baja energía de oleaje, siendo más frecuentes las olas constructivas que las destructivas, siendo la altura significativa (Hs) media de 0,6 m y la máxima de 3,1 m (Borrego, 1992). El oleaje que afecta a este sector de la costa de Huelva está directamente vinculado al régimen de vientos. Los vientos predominantes provienen del SO con un 22,5% de los días del año; aunque también son destacables los vientos procedentes del

NO, NE y SE que soplan el 18,5%, 12% y 14% de los días, respectivamente (Borrego, 1992). Así el 75% del tiempo actúan sobre la costa olas con una altura significativa (Hs) inferior a 0,5 m, y se aproximan a la misma con dirección N140-145°O (M.O.P., 1991; Borrego, 1992). Se ha determinado que el oleaje de viento (*sea*) actúa durante el 51% del tiempo, mientras que el oleaje de mar de fondo (*swell*) lo hace durante el 48,21% (Borrego, 1992). La deriva litoral en la costa de Huelva sigue una dirección de O a E, favorecida por la orientación oblicua de la costa respecto a las direcciones de aproximación de los trenes de olas dominantes (SO o de poniente, y SE o de levante). Este efecto origina una componente de aporte paralela a la costa con un balance positivo hacia el E, debido a la mayor frecuencia de actuación del oleaje procedente del SO (Morales, 1993), haciendo crecer las flechas litorales que cierran el estuario en este sentido.

De acuerdo con la clasificación de Davies (1964) que considera la magnitud de los procesos, se trata de una costa mesomareal (rango mareal medio comprendido entre 2 y 4 m), de energía mixta dominada por las mareas (entre 2 y 3,5 m de rango), según los criterios establecidos por Hayes (1979). Sin embargo, y debido al desarrollo en esta franja costera de numerosas flechas litorales, se podría clasificar con criterios morfológicos como costa dominada por la acción del oleaje. Esta aparente contradicción se debe a la evolución que ha experimentado la costa de Huelva, en la que se ha pasado desde unas condiciones dominadas por la acción de la marea hacia otras en las que la actuación del oleaje ha sido el proceso principal, debido a la disminución del prisma de marea por el progresivo relleno de los sistemas mareales como *lagoons* y estuarios (Borrego, 1992; López-González, 2002).

Metodología

Este estudio ha comprendido la recopilación de datos de vibrocores, de sondeos de rotación y de sísmica de reflexión.

- Vibrocores. Se llevó a cabo una intensiva recopilación de toda la información existente en los archivos de la Autoridad Portuaria de Huelva, analizando un total de 258 vibrocores (Fig. 2). Se realizó una labor de homogeneización de la información geológica y geotécnica incluida en cada uno de los testigos estudiados, que fue representada en columnas estratigráficas mediante la utilización del *software* geológico profesional Winlog 4.0 desarrollado por GAEA TECHNOLOGIES Ltd. Desde el punto de vista geológico, los vibrocores aportan una información superficial útil para identificar las facies que constituyen las unidades litosísmicas. Para sistematizar la información, se elaboró una base de datos en un Sistema de Información Geográfica, desarrollada en el *software* GEOMEDIA. Una vez procesados e incluidos todos los testigos en esta base de datos, se procedió al análisis geológico y geotécnico de los mismos.

- Sondeos. Durante los meses de septiembre de 2007 a septiembre de 2008 se realizaron 15 sondeos de rotación con recuperación de testigos en camisas de PVC.



Fig. 2.- Localización de los puntos de información con sondeos y vibrocores.

Con esos sondeos pudo realizarse una labor de reconocimiento y análisis sedimentológico de las facies, a fin de identificarlas con aquellas descritas en los testigos recuperados de los archivos. Algunos de estos sondeos superaron los 40 m de profundidad, atravesando todas las unidades estuarinas holocenas.

- Sísmica de reflexión. Durante el mes de septiembre de 2013 se llevó a cabo una campaña de prospección del

subsuelo de la Ría de Huelva mediante sísmica de reflexión. Se empleó un perfilador paramétrico de subsuelo INNOMAR SES2000 trabajando entre 6 y 8 kHz, con una penetración en el subsuelo superior a los 3 m. Con el fin de realizar un modelo tridimensional de las unidades sedimentarias que constituyen el relleno más reciente de la Ría de Huelva, se realizaron cortes paralelos entre sí (25 perfiles longitudinales y 38 transversales; Fig. 3).

El *software* de navegación utilizado en ambas campañas es el Hypack Hydrographic Survey conectado a un GPS diferencial submétrico TRIMBLE agps132. Dicho GPS muestra datos de posición corregidos de forma instantánea mediante emisoras de radiofrecuencia. Esto es debido a que rectifica la medición obtenida con el GPS mediante una corrección calculada en base al resultado obtenido para una medición conocida. Para la adquisición de registros del sub-fondo se utilizó el *software* SES-WIN que permite visualizar los registros sísmicos e introducir filtros para la mejora de su resolución, facilitando así su interpretación en términos geológicos.

Sobre los perfiles sísmicos se localizaron los testigos de sedimento correspondientes y se identificaron diferentes cuerpos sedimentarios desde los puntos de vista genético y geotécnico. Para la diferenciación de los cuerpos sedimentarios se siguieron dos criterios: que el cuerpo sedimentario tenga una forma definida y una extensión por toda la zona y que tenga características más o menos homogéneas desde el punto de vista litológico, o al menos que las posibles variaciones sean de un orden menor y no representen grandes contrastes en las propiedades geológicas.

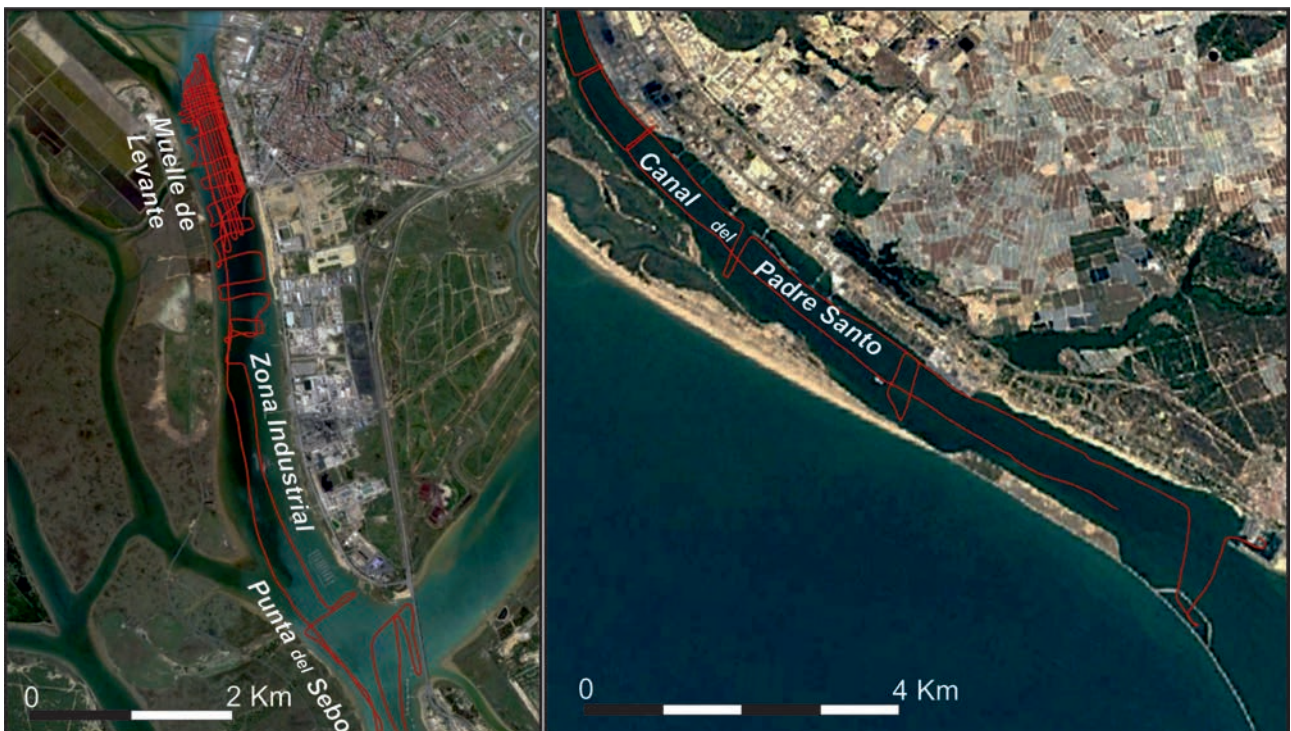


Fig. 3.- Trayectorias de navegación longitudinales y transversales para la realización de los perfiles sísmicos.

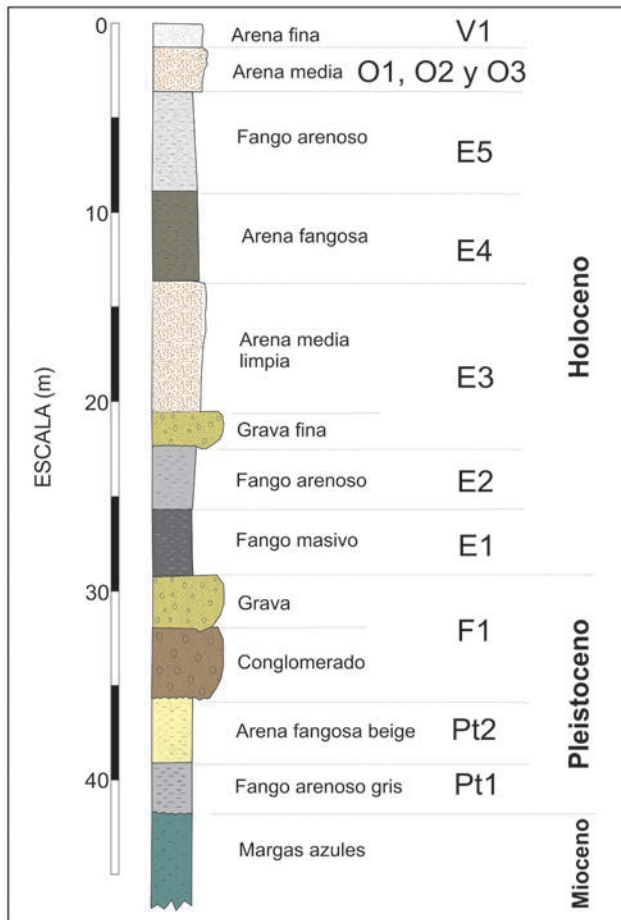


Fig. 4.- Columna tipo donde se observan las unidades estratigráficas descritas.

Caracterización sedimentológica de las unidades lito-sísmicas

La secuencia estratigráfica tipo está conformada por 13 unidades estratigráficas (Fig. 4) excluyendo diferentes tipos de relleno artificial que se encuentra a veces en superficie. Esta secuencia tipo aparece íntegra en el sondeo SPP-07-2 de la tanda de sondeos tomados en 2007 y coincide en gran medida con la secuencia descrita y datada por Borrego *et al.* (1999). Las 4 unidades inferiores forman parte del sustrato de los sedimentos holocenos (Mioceno superior, y unidades Pt1, Pt2 y F1 del Pleistoceno superior), mientras que las 9 unidades restantes constituyen la secuencia holocena de relleno del estuario (E1–E5), las formaciones superficiales generadas por el oleaje que cierran parcialmente el estuario (unidades O1, O2 y O3) y la unidad eólica que se dispone sobre ellas (V1). En la mayor parte de los vibrocores solo están representadas las litofacies de las unidades superiores, que son a su vez las que conforman la mayor parte de los registros sísmicos, dada su baja capacidad de penetración. Solo en aquellos sectores del estuario donde las potencias son menores, se han podido alcanzar las unidades basales, tanto en sondeos de vibración, como en el registro sísmico.

El sustrato de los sedimentos holocenos

La mayor parte del sustrato en la zona central corresponde al techo de la Formación Arcillas de Gibraleón (Mio-

ceno superior), constituido por margas, limos y arcillas con una composición carbonatada variable y niveles decimétricos de conchas. Esta unidad está separada de las unidades suprayacentes por una importante discordancia erosiva. Sobre esta unidad suele situarse la primera de las unidades del Pleistoceno superior (Pt1), compuesta por fangos arenosos y arenas fangosas de color gris azulado con algunas intercalaciones de gravas bioclásticas con clastos de cuarcita, también de color gris oscuro. Sobre esta, y a través de un contacto deposicional gradual o neto, se deposita la segunda de las unidades del Pleistoceno superior (Pt2). Se trata de arena limosa fina de color anaranjado o amarillento, con laminación paralela y frecuentes niveles de gravilla.

Es necesario destacar que estas dos unidades pleistocenas están presentes solo en las zonas situadas en los márgenes del estuario, estando ausentes en las zonas centrales de los canales donde la incisión fluvial fue mayor durante el último período glacial. Justo en esas zonas se dispone la unidad F1 del Pleistoceno superior, de características netamente fluviales, constituida por conglomerados rojizos con matriz arcillosa, que deben su color a su alto contenido en óxidos de hierro, y por gravas con matriz arenosa. Ninguna de estas unidades pleistocenas aflora en superficie y no se encuentran caracterizadas geológicamente en la bibliografía.

La secuencia holocena

Se trata de una secuencia donde dominan las facies fangosas y, en menor medida, arenosas y constituyen cuerpos de acreción estuarina. La secuencia está constituida, de muro a techo, por las siguientes unidades (Figs. 4 y 5):

Unidad E1 (fangos y fangos arenosos negros inferiores). Sobre los cuerpos fluviales que componen el sustrato, descritos anteriormente, se disponen de forma discordante los primeros cuerpos estuarinos de geometría fundamentalmente canaliforme y progradantes hacia la zona marina del estuario. Estos cuerpos presentan una litología muy variable. En el Muelle de Levante se trata de un cuerpo de entre 10 y 13 m de espesor de fangos (limos arcillosos) de color negro, gris muy oscuro o verde-grisáceo que suele presentarse masivo y con un carácter bastante compacto y plástico.

Unidad E2 (fangos arenosos y arenas fangosas grises intermedios). Esta unidad alcanza los 10 m de potencia en las zonas más profundas del estuario y se genera como resultado del relleno del canal y conforme progresa hacia el estuario marino va adquiriendo anchura. En el interior de E1 y E2 se observan a grandes rasgos facies acústicas paralelas de baja continuidad e irregular, que se interpretan como resultado de depósitos marinos de baja energía y como depósitos de progradación respectivamente, encontrándose de forma más acentuada en el margen del canal adosado al muelle. E2 se dispone sobre los fangos del cuerpo E1 mediante un contacto neto. Se trata de arenas finas y medias con un contenido variable de matriz fangosa y color gris oscuro o gris claro. Suelen presentar intercalaciones decimétricas de fangos arenosos, y gravas bioclásticas, así como un contenido variable en clastos cuarcíticos, cantos blandos y fragmentos de conchas estuarinas dispersas.

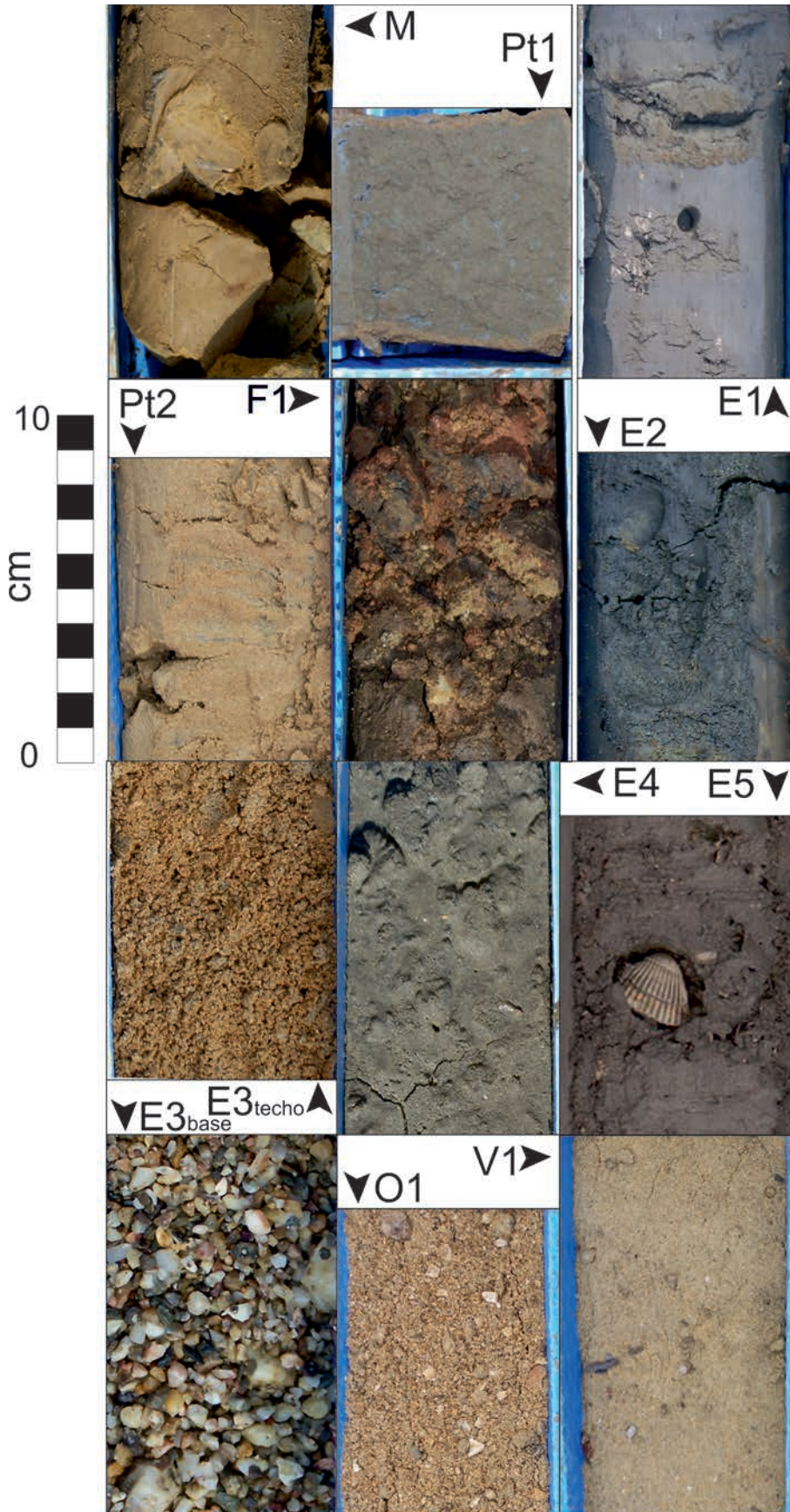


Fig. 5.- Aspecto de las facies de las unidades que constituyen el sustrato de la sucesión holocena así como de las que constituyen el relleno holoceno. Facies del sustrato Mioceno: M; facies del Pleistoceno: Pt1 (Unidad inferior), Pt2 (Unidad intermedia), F1 (unidad fluvial superior); Facies holocenas de las unidades estuarinas: E1 a E5; Facies holocenas de oleaje (O1); Facies eólicas (V1).

Unidad E3 (arenas limpias).
Esta unidad de geometría canaliforme igual que las anteriormente descritas, va adquiriendo mayor potencia y extensión conforme va progradando hacia el estuario marino, y presenta facies acústicas internas paralelas de alta continuidad horizontal, no horizontal, e irregular. Esto refleja que en dicha unidad existe alternancia de materiales de propiedades físicas bien diferenciadas, es decir, aparece intercalada entre las arenas fangosas de las unidades E2 y E4. Se trata de un cuerpo de espesor variable de arenas que puede alcanzar hasta los 7 m. Desde el punto de vista litológico puede describirse como arenas limpias, sueltas, bien clasificadas, de color beige claro, que en la base son gravas finas y arenas medias y progresivamente son reemplazadas hacia techo por arenas finas.

Unidad E4 (arena fangosa y fango arenoso gris superior).
Se define acústicamente como un cuerpo de geometría canaliforme y progradante al igual que las unidades anteriormente descritas. Por otra parte, las facies acústicas internas paralela de alta continuidad, a veces con disposición horizontal, y otras irregular no horizontal reflejan una alternancia de niveles de propiedades físicas notablemente diferenciadas. Litológicamente la unidad está compuesta por arenas finas de color gris oscuro con una matriz limo-arcillosa que puede llegar a ser mayoritaria y algunos clastos de cuarcita centimétricos, cantos blandos y fragmentos de conchas dispersos. A lo largo de la zona de estudio, este cuerpo presenta espesores variables, alcanzando más de 10 m en el Muelle de Levante y estando ausente en las zonas más próximas a los actuales canales mareales. Presentan abundantes niveles decimétricos de gravas conchíferas que no siempre son descritas por

los sondistas, pero cuya presencia se deduce de los datos geotécnicos.

Unidad E5 (fangos negros superiores). Se trata de una unidad de geometría canaliforme que podría interpretarse como relleno de un canal distributivo lateral, al superponerse sobre las unidades anteriores (E1–E4) con una relación geométrica lateral que va ganando anchura conforme se produce la progradación hacia la zona marina del estuario. Esta unidad está compuesta por cuerpos de limos arcillosos grises a negros con abundantes intercalaciones decimétricas de fangos arenosos, arenas fangosas y gravas conchíferas, que conforman una secuencia regresiva que culmina con fangos rojizos bioturbados por raíces.

Cuerpos superiores arenosos (O1, O2, O3 y V1). Los cuerpos O1, O2 y O3 constituyen las grandes formaciones arenosas superficiales que cierran actualmente el estuario como son los *cheniers* de la Punta del Sebo (O1), las flechas de Punta Umbría y de Torre Arenillas (O2) y los *cheniers* de Isla Saltés (O3). Poseen baja reflectividad, aunque se observan en ellos facies acústicas interna paralela horizontal de baja continuidad resultante de depósitos marinos de baja energía, así como también están presentes los dispositivos oblicuo paralelo y caótico, asociados a la presencia de lóbulos deltáicos y cordones litorales, respectivamente. Estos cuerpos presentan extensión limitada y su composición es de arena media a muy gruesa, incluso alcanzando el tamaño grava, cuyos componentes dominantes son los granos de cuarzo, junto con fragmentos bioclásticos de conchas marinas, especialmente *Glycymeris variabilis*. Se disponen sobre el cuerpo de arenas fangosas superiores (E4) o incluso sobre el cuerpo de fangos superiores (E5). Se interpretan como producto de la acción del oleaje de tormentas sobre las zonas emergidas en el sector marino del estuario.

Sobre O1–O3 se desarrollan otros de arena fina a muy fina, que se encuentran además bioturbados por raíces y presentan un mayor contenido en materia orgánica, lo que les confiere un color más oscuro, al menos en superficie. Estos cuerpos, denominados VI, son de formación más reciente y se interpretan como cuerpos de origen eólico edafizados y bioturbados por plantas superiores.

Arquitectura de facies 3D

Se entiende por arquitectura de cuerpos sedimentarios la disposición tridimensional de los cuerpos que han sido caracterizados litológicamente en el apartado anterior. Esta arquitectura es diferente en cada una de las zonas estudiadas, de tal forma que en cada una de ellas, el dispositivo de relación tridimensional de los cuerpos sedimentarios, así como el espesor de los mismos y la profundidad a la que aparecen son distintos. Por esa razón, la arquitectura de los cuerpos sedimentarios será analizada por separado en cada una de las zonas estudiadas.

De forma general la disposición de las unidades es progradante hacia mar abierto. Encontrándose las unidades más reflectivas y que presentan mayor alternancia de

dispositivos estratigráficos entre la zona industrial y la zona de Punta del Sebo, a partir de la cual las unidades comienzan a tener menor reflectividad y mayor alternancia de dispositivos debido a la transición de litologías de carácter fangoso de las zonas más internas del estuario hacia litologías más arenosas presentes en las partes más próximas al sector marino del mismo.

Muelle de Levante (zona más interna del estuario bajo)

El muelle de Levante corresponde al sector más interno del estuario bajo, en el que la profundidad del canal oscila entre 2 y 8 m (Fig. 6). En los sondeos se presenta una serie depositada sobre sedimentos miocenos, que comienza con conglomerados fluviales y continúa con gravas y arenas, también de origen fluvial (unidad F1); estos sedimentos fueron depositados por el río durante un momento de nivel del mar sustancialmente más bajo que el actual. Sigue a estos cuerpos fluviales un primer cuerpo estuarino (unidad E1) que en este sector presenta una naturaleza exclusivamente arcilloso-limosa y color negro a gris oscuro. Sobre este cuerpo arcilloso se depositan sedimentos también grises y de carácter fangoso, pero con un mayor contenido en arena (unidad E2).

Sobre la unidad anterior se deposita un nuevo cuerpo de gravas y arenas limpias de base canalizada (unidad E3). Su base está constituida por secuencias de gravas cuarcíticas gruesas sueltas que en este caso mezclan conchas marinas de gran tamaño. Se trata de cuerpos de gran energía que anteriormente han sido interpretados como depósitos de marea de alta energía o depósitos de un tsunami. Estas facies no aparecen distribuidas de manera uniforme a lo largo de toda la unidad y se ciñen al fondo de las morfologías canalizadas. Sobre estas gravas se depositan las facies principales de la unidad, un cuerpo de espesor variable de arenas limpias de granulometría variable desde 1 mm a 125 μm y que suele estar caracterizado por un grado de empaquetamiento bajo y una presión de fluidos bastante alta, de tal modo que suele inyectarse en los sondeos al ser atravesado. La unidad E3 no aparece en todos los sondeos, sino que se encuentra localizada rellenando un antiguo canal que no ocupa la misma posición que el canal estuarino actual, sino que se encuentra bajo las actuales instalaciones portuarias y hacia el S va girando hacia el E.

Sobre las arenas de la unidad E3, o sobre las arenas fangosas de la unidad E2, donde E3 está ausente, se desarrolla un nuevo cuerpo de arenas fangosas y fangos arenosos (unidad E4) y finalmente un cuerpo de fangos en el canal actual (unidad E5) que se interpreta como relleno de un canal mareal lateral (estero de las Metas) y que se superpone a las anteriores con relación geométrica lateral. En los perfiles sísmicos sólo aparecen las tres unidades superiores mostrando un dispositivo sencillo, que en general responde a una superposición agradable con algunas discordancias erosivas que separan las unidades y donde las unidades inferiores presentan una disposición paralela no horizontal. En el esquema tridimensional (Fig. 6) puede observarse que toda la serie presenta una ligera inclinación hacia el S de acuerdo con el gradiente topográfico del fondo del estuario. La superficie topográfica del fondo es neta-

mente erosiva debido a los dragados portuarios, de tal modo que los perfiles sísmicos longitudinales muestran cómo en la zona más interna afloran las unidades inferiores que son cortadas por la topografía actual.

Zona industrial (tramo externo del estuario bajo)

En esta zona, la arquitectura sigue en su parte norte el modelo sencillo agradable ya descrito en el apartado ante-

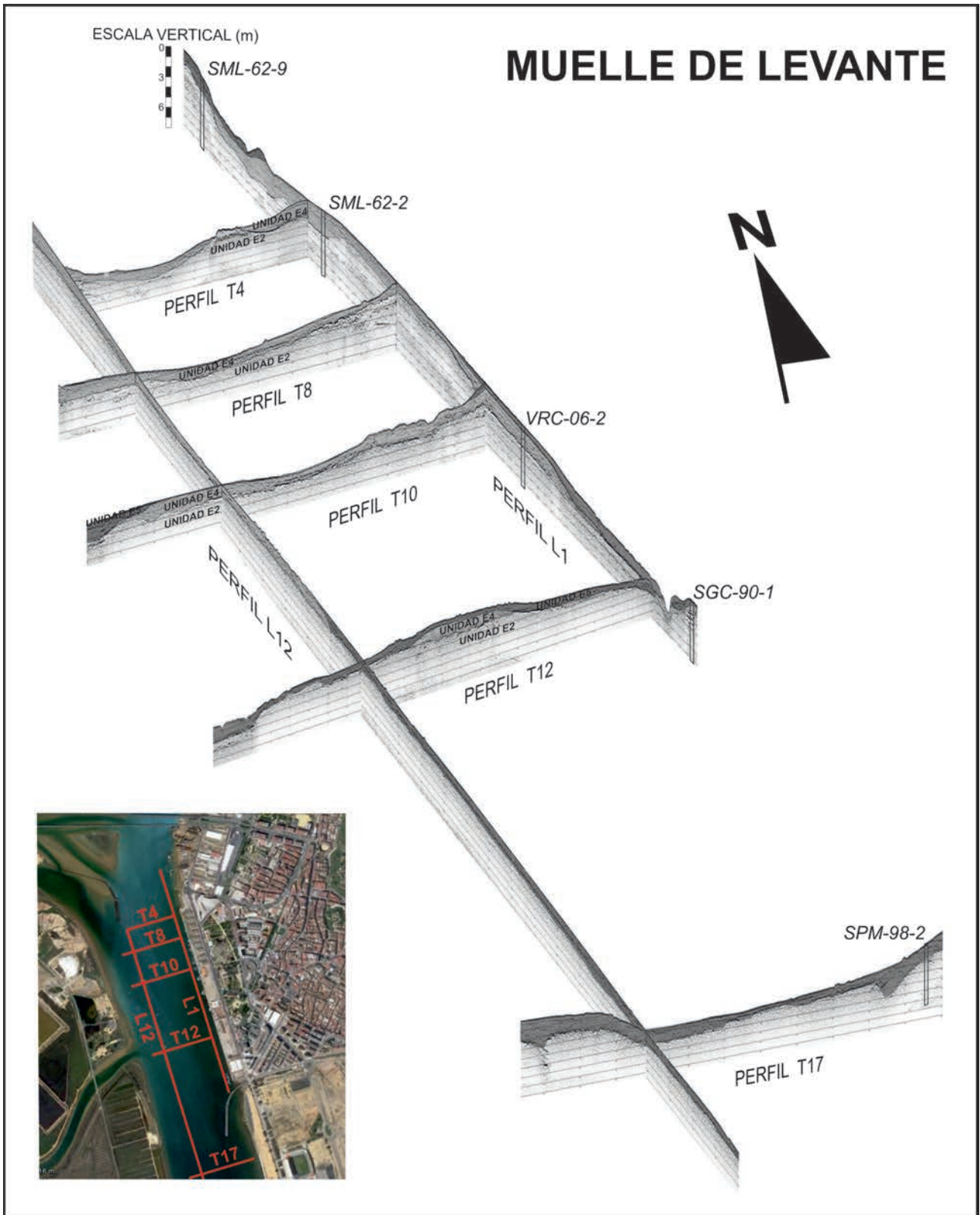


Fig. 6.- Esquema 3D de las unidades presentes en el sector interno del estuario bajo del Odiel (Muelle de Levante) realizado mediante la superposición de la información de sondeos sobre un enrejado de perfiles sísmicos seleccionados. Las siglas de los sondeos son las mismas que estos presentan en los archivos del Puerto de Huelva y corresponden con las iniciales del proyecto, el año de realización y el número de sondeo dentro del proyecto.

rior y se va complicando hacia el S, a medida que nos vamos aproximando hacia el estuario marino.

Bajo el canal estuarino, la unidad E3 está ausente, superponiéndose directamente la unidad E4 sobre la unidad E2 a través de una discordancia erosiva que en el tramo más interno marca la posición de un paleocanal (Fig. 7). En esta zona del canal, el modelo agradante mostrado por una disposición paralela de alta continuidad se complica pasando a la disposición paralela no horizontal. El dispositivo no horizontal sugiere una adaptación de los sedimentos de la unidad E4 a la existencia de movimientos de subsidencia diferencial entre diferentes bloques de la unidad E2 sepa-

rados por fallas normales con saltos de hasta 5 m (Fig. 8). La deformación de las unidades permite interpretar que la subsidencia se ha producido de forma gradual y coetánea a la sedimentación de las unidades superiores. En la zona más alejada del canal, situada hacia el E, vuelve a aparecer la unidad arenosa E3 (Fig. 7), que se dispone con una orientación NE-SW acercándose al canal actual hacia el S. Aquí las unidades E2 y E4 presentan importantes variaciones de facies. Como ejemplo, en el perfil sísmico L15 de la Figura 7 puede observarse que la unidad E4 está conformada por varios cuerpos de morfología sigmoidal. El sondeo SPP-07-2, que corta a este perfil sísmico, permite interpretar que

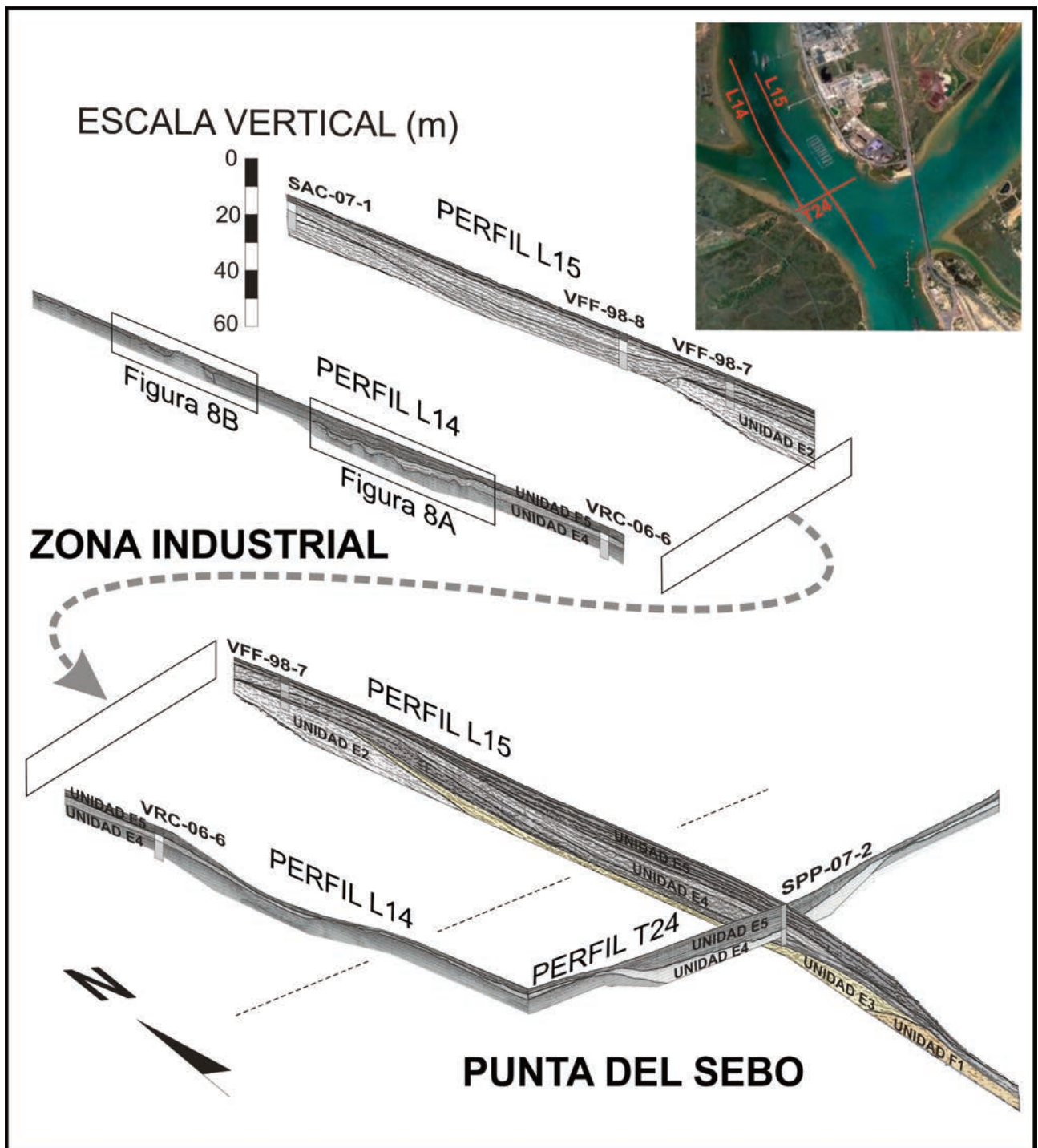


Fig. 7.- Esquema 3D de las unidades presentes en el tramo externo del estuario bajo el Odiel (transición entre Zona Industrial y Punta del Sebo).

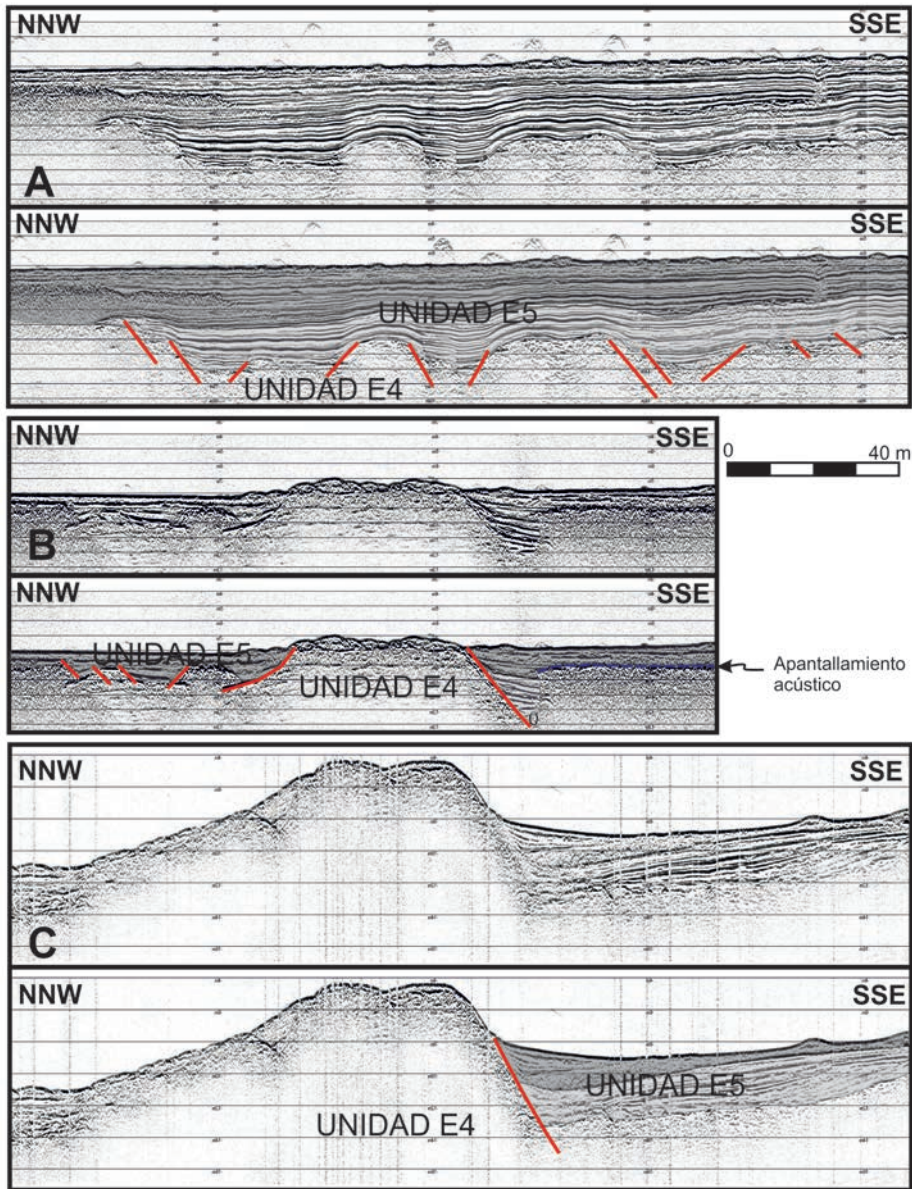


Fig. 8.- Geometrías indicativas de la existencia de movimientos de subsidencia diferencial entre diferentes bloques separados por fallas normales que afectan a la unidad E2, debiendo adaptarse las unidades E4 y E5 al salto de falla.

estos cuerpos presentan además una alternancia litológica entre arenas fangosas y fangos arenosos.

Punta del Sebo (transición entre el estuario bajo y estuario marino)

Hacia el S y más allá de la confluencia con el cauce estuarino del Tinto, la diferencia batimétrica existente entre los canales estuarinos y el estuario marino es acusada, al existir una poza formada por ajuste hidráulico al unirse los dos canales estuarinos en uno solo. En esta zona existe, pues, un gradiente batimétrico alto que condiciona la geometría de las unidades depositadas en este sector. Es aquí donde los perfiles sísmicos muestran una arquitectura de facies más compleja, con desarrollo de unidades oblicuas y sigmoidales, que muestran una progradación frontal de unidades hacia la zona más profunda, desplegando disposiciones internas en forma oblicua y finalizaciones en forma

de biselamientos y solapamientos expansivos (Fig. 7). La unidad E3 continúa teniendo una morfología transversal canalizada que marca la antigua posición del canal estuarino, que ya en esta zona ocupa la misma posición que el canal actual.

Esta zona, al haber sido más abierta, se ha visto además afectada por numerosos eventos de alta energía que han generado contactos erosivos entre las diferentes unidades, de forma que la aparente continuidad sedimentaria que muestran las unidades en la zona anteriormente descrita se ve en este caso rota por la presencia de varias truncaciones erosivas. En la confluencia de los canales estuarinos de Tinto y Odiel (Punta del Sebo), sobre estos cuerpos fangosos se depositó un último cuerpo de carácter arenoso, correspondiente a la acción de olas de alta energía (unidad O1), mientras que en la flecha de Punta Arenillas se desarrolla una unidad arenosa también debida a la acción del oleaje (unidad O2).

Canal del Padre Santo (estuario marino)

A partir de la confluencia de los canales estuarinos de Odiel y Tinto se presenta un esquema de arquitectura de facies muy distinto al observado en las zonas más internas. En primer lugar, se observa que las unidades son menos potentes a medida que nos desplazamos hacia el SE. En segundo lugar, las unidades inferiores están ausentes. Por último, algunos sondeos realizados en Torre Arenillas muestran cómo el sustrato de las unidades holocenas comienza a estar constituido por dos nuevas unidades, Pleistoceno 1 y Pleistoceno 2 (Pt1 y Pt2), que se asientan sobre los materiales miocenos y que son más antiguos que los primeros cuerpos estuarinos y que la unidad fluvial F1. Las características geotécnicas de las mismas dan muestras de que han estado expuestos y compactados antes del depósito de los materiales holocenos (Camacho *et al.*, 2011). La morfología discordante de la superficie de contacto entre Pt2 y las unidades holocenas puede observarse en la Figura 9 y es indicativa de que estos fueron erosionados. La unidad que se dispone sobre este contacto es la unidad E3, que presenta morfologías canalizadas que inciden a estos materiales. Si aceptamos que esta incisión fue realizada por el sistema fluvial durante la úl-

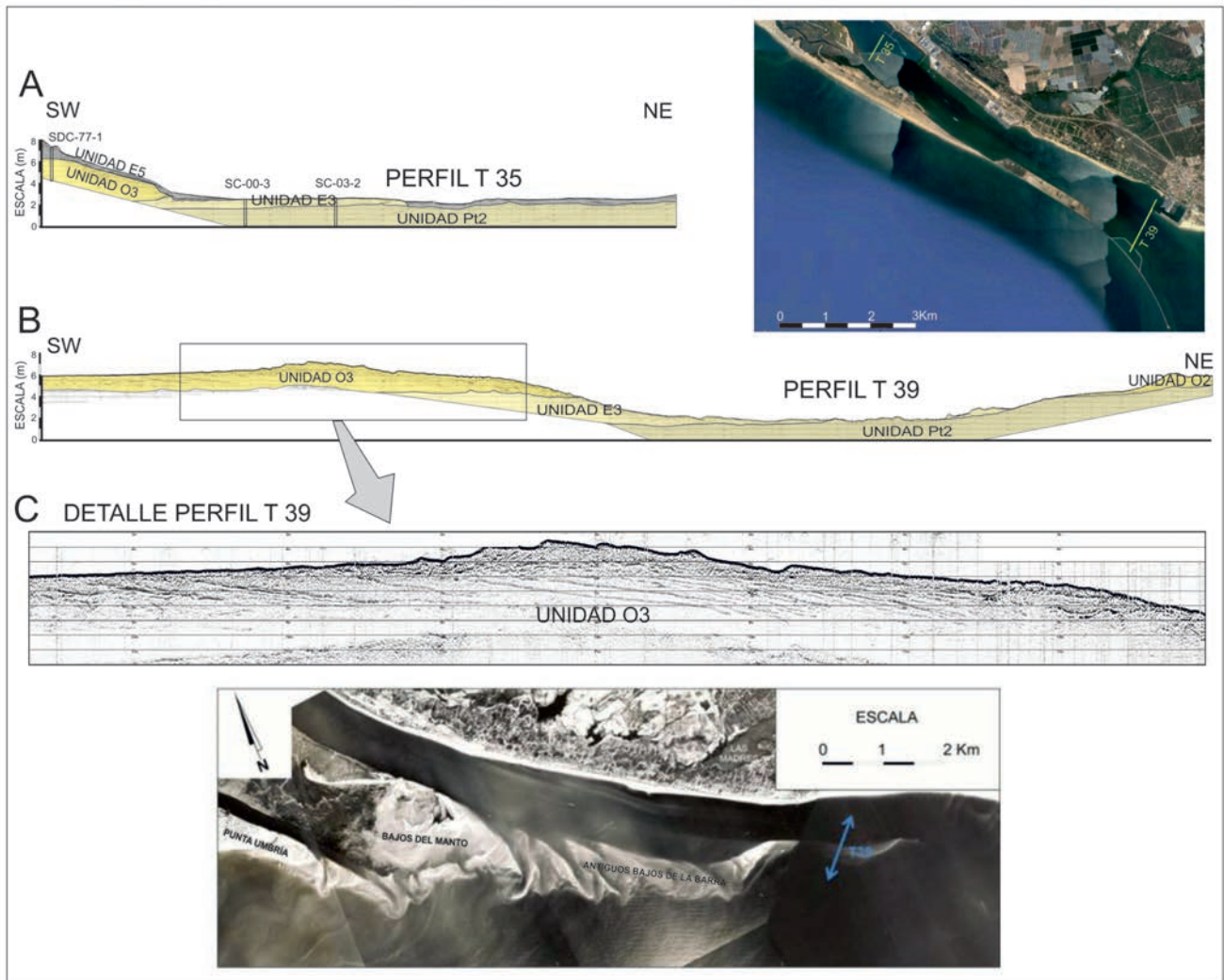


Fig. 9.- Perfiles transversales al canal del estuario marino y detalle de la estructura interna de la unidad de oleaje O3 situada bajo el actual Dique Juan Carlos I y correspondiente a la posición de los antiguos deltas de refluo de la desembocadura.

tima glaciación, esto implica que Pt1 y Pt2 ya estaban depositados durante el último descenso del nivel del mar.

Como se ha comentado anteriormente, hacia el SE la arquitectura de cuerpos sedimentarios se hace más sencilla. La unidad pleistocena Pt2 que constituye el sustrato de las facies holocenas se van haciendo más somera, de tal forma que los cuerpos fluviales inferiores (unidad F1) y los cuerpos estuarinos inferiores (unidades E1 y E2) no se depositaron en esta zona al no haber quedado aún inundada durante la sedimentación de los mismos. Hay que tener en cuenta que este sector ha pasado a formar parte del estuario en tiempos recientes con la progradación hacia el SE del sistema de cierre de Isla Saltés, encontrándose fuera del paleovalle del sistema Odiel-Tinto. De esta forma, sobre los cuerpos pleistocenos, a través de una discordancia erosiva, se depositan directamente los cuerpos superiores E3 y E4, o incluso directamente O2, dependiendo de la cota topográfica a la que se encontrase este sustrato. Concretamente, las facies del cuerpo O2 se superponen directamente sobre el cuerpo Pt2 al NE del perfil T 39 (Fig. 9B), mientras que más al SE, el sustrato se hace más profundo. Este corte transversal al Canal del Padre Santo (perfil T 39, Fig. 9B) muestra como el sustrato Pleistoceno se hunde hacia el S bajo el Canal del Padre Santo.

En la zona central del canal, destaca el carácter erosivo del mismo (seguramente debido a los dragados portuarios), donde las facies estuarinas superiores (unidades E4 y E5) desaparecen, aflorando directamente las facies de la unidad E3. Estas arenas al encontrarse en superficie están siendo actualmente retrabajadas y se mezclan con las arenas superiores del cuerpo O3 en la zona más cercana al Dique Juan Carlos I (perfil T35, Fig. 9A). La estructura interna de estos cuerpos arenosos ha quedado resaltada en los perfiles sísmicos transversales, mostrando *sets* de estratificación cruzada que indican la migración hacia tierra de grandes cuerpos arenosos (detalle inferior del perfil T39, Fig. 9C). Esta migración debe corresponderse con el desplazamiento de las antiguas plataformas de batida de los paleodeltas de marea orientados hacia el NE que se observaban en las fotografías aéreas anteriores a la construcción del Dique Juan Carlos I.

Isla Saltés (sistema de cierre del estuario marino)

El sistema de cierre del estuario marino en el sector central situado al S del Canal del Padre Santo presenta una arquitectura de facies compleja que ha sido descrita por Morales *et al.* (2014), en un trabajo que ilustra este esquema de facies.

En general es un dispositivo menos potente que el observado en la zona de canal estuarino, al encontrarse esta isla desarrollada sobre un alto fondo del sustrato.

El citado trabajo muestra como en la base los sondeos más internos han sido observadas las facies características de la unidad Pleistoceno 2 (Pt2), sobre la que se dispone el resto de las unidades holocenas. En este caso, las unidades inferiores (E1 y E2) están ausentes, ya que estas se han depositado en cotas inferiores. De esta forma, la secuencia comienza en la base por las arenas fangosas negras bioturbadas y con estratificación *flaser* de la unidad E4. A techo de esta unidad existen dos posibilidades de superposición. En algunos lugares las facies se vuelven netamente más arcillosas, apareciendo fangos con laminación ondulada (*wavy bedding*) y laminación lenticular correspondientes a la unidad E5. En otros lugares se desarrollan cordones arenosos a techo de la unidad E4; en estos casos, suceden a estas facies de forma neta cuerpos de arenas y gravas de naturaleza bioclástica y/o cuarcítica. Estas facies corresponden a la unidad O1 y han sido interpretadas como facies de *cheniers* (Borrego *et al.*, 2000; Morales *et al.*, 2014).

Interpretación de la evolución sedimentaria holocena

Los estuarios son sistemas receptores de sedimentos de procedencia fluvial y/o marina distribuidos longitudinalmente según la zona de aporte y la interacción de los agentes dinámicos que actúan en ellos. Las características sedimentológicas de las facies presentes en cada una de las unidades descritas, así como su geometría han permitido realizar la reconstrucción del medio sedimentario en el que estas fueron depositadas y con ello, la evolución sedimentaria del sistema (Fig. 10).

Las facies de la unidad Pt1 se interpretan como facies mareales, mientras que las facies de la unidad Pt2 se interpretan como facies de glaciares o abanicos aluviales formados en los márgenes del cauce fluvial por retrabajamiento de las unidades miocenas y pliocenas del SO de la Cuenca del Guadalquivir. Las facies de la unidad F1 se interpretan

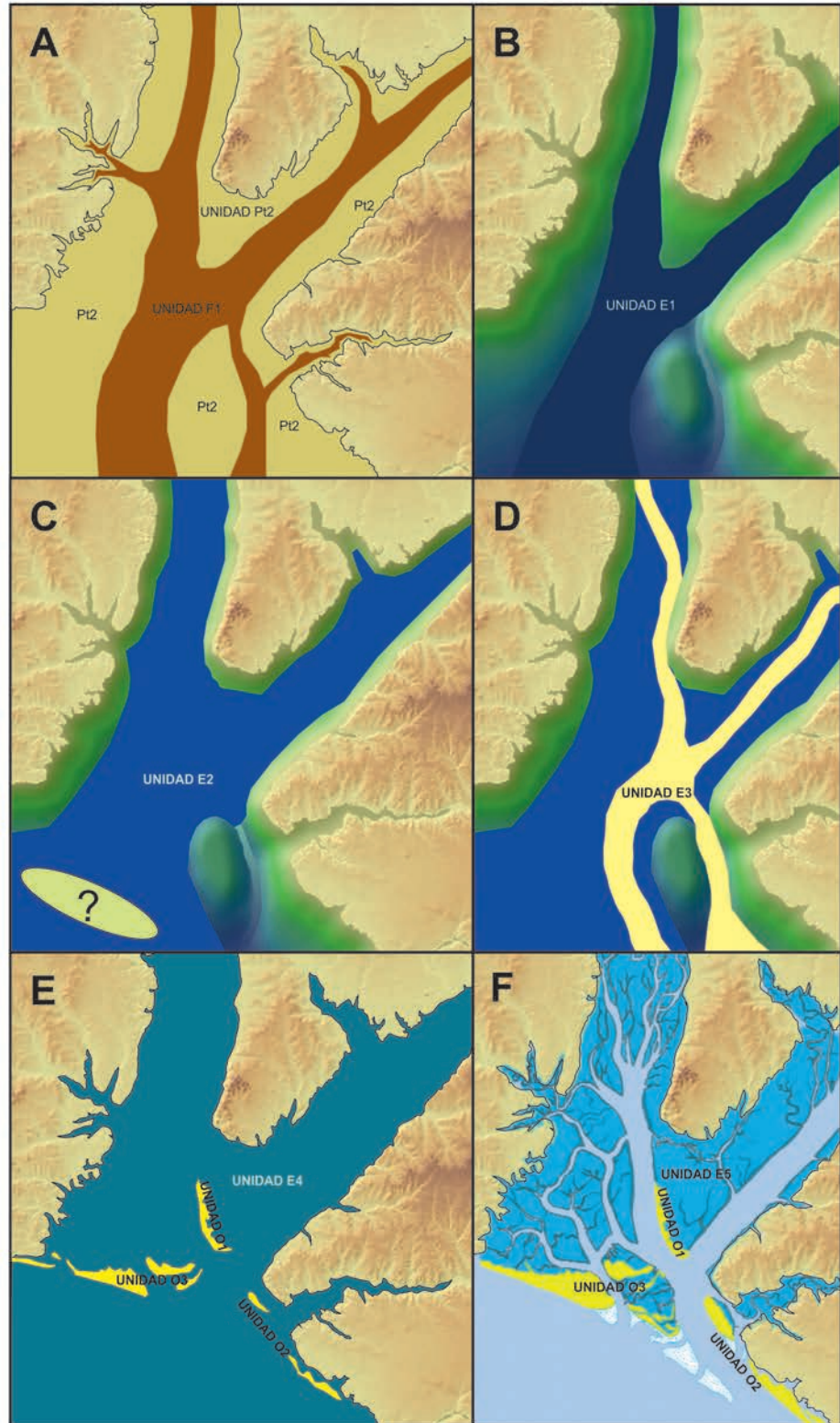


Fig. 10.- Evolución del relleno del estuario deducida de la distribución de facies. A, B y C representan el periodo transgresivo, mientras que D, E y F representan el relleno total del estuario y la progradación ocurrida tras la estabilización del nivel marino.

como facies de terrazas fluviales o fondo de canal. El grado de consolidación de estos sedimentos y la presencia en ellos de minerales diagenéticos permite interpretarlos como facies depositadas durante el Pleistoceno superior, en posiciones de nivel marino más bajo (Fig. 10A). La morfología superficial de los cuerpos pleistocenos queda configurada como el relieve existente antes del comienzo de la última transgresión y condicionó la extensión de la inundación marina causada por la misma.

Las litologías presentes en la unidad E1, así como su geometría, pueden interpretarse como los primeros cuerpos submareales holocenos depositados durante la transgresión (Fig. 10B). La ausencia de esta unidad, coincidente con la presencia de los cuerpos pleistocenos Pt1 y Pt2 indica que las unidades pleistocenas representaban un alto relieve que aún no había quedado inundado durante el depósito de la unidad E1, por lo que esta está ausente en el sector marino del estuario, quedando ceñido a las antiguas zonas de paleocauce en las cuales se superpone directamente a la unidad F1. Las litologías predominantemente fangosas son indicativas de un depósito en las zonas más internas de un sistema estuarino, relacionadas con el máximo de turbidez, lo que sugiere la presencia de cuerpos arenosos cerrando parcialmente el estuario, aunque estos cuerpos no aparecen en los sondeos estudiados.

Las facies de la unidad E2 pueden ser interpretadas como correspondientes a un cuerpo estuarino depositado en condiciones similares a la unidad E1 pero con mayor influencia marina debido a un mayor grado de elevación del nivel del mar (Fig. 10C). Su mayor contenido en arenas y sus constantes cambios de facies sugieren un carácter mucho más somero que el de las facies de la unidad E1, en un medio donde se estaría estableciendo una incipiente red de drenaje mareal que distribuiría el sedimento arenoso de forma diferencial. Esta interpretación se ve avalada por la morfología progradante de esta unidad en algunos sectores.

Las facies de la unidad E3 sugieren varias interpretaciones diferentes, según el entorno geográfico y la geometría del depósito. De esta forma, en la zona central del estuario, donde estas facies se disponen en una geometría canalizada, se han interpretado como el primer cuerpo estuarino arenoso instalado durante la ralentización de la subida previa a la estabilización del nivel del mar (Fig. 10D). En el momento del depósito de esta unidad el trazado del paleocanal discurría por una trayectoria diferente al actual trazado de la red mareal. Por otro lado, la presencia de estas facies arenosas en la zona más somera y abierta del estuario (Canal del Padre Santo) se interpreta como facies de antiguas playas situadas bajo la actual flecha de Torre Arenillas. Se trataría, pues, de las primeras playas transgresivas con sus formaciones dunares depositadas a estas cotas inferiores.

La unidad E4 presenta facies muy similares a la unidad E2 y corresponde a cuerpos submareales de acreción estuarina. Al igual que en el caso de la unidad E2, se trataría de cuerpos someros, con una incipiente red de drenaje mareal que permite la distribución diferencial de las arenas llegadas desde la zona abierta del estuario (Fig. 10E). La morfología sigmoidal (agrandante + progradante) de los cuerpos litológicos que configuran esta unidad sugiere una

subida relativa del nivel del mar después del depósito de la unidad E3. Por otra parte, en los últimos años del desarrollo de esta unidad la topografía del estuario ya ha comenzado a entrar en la zona intermareal y en las zonas internas del mismo se han desarrollado amplias llanuras de marea con una red de drenaje bien definida. Entre las facies presentes en la unidad E4 existen abundantes niveles de acumulación de conchas y fragmentos de conchas que ejercen como apantallamientos de la señal acústica en los perfiles sísmicos y que han sido interpretados como niveles de alta energía. Al existir ya un sistema de cierre del estuario y situarse estos niveles a decenas de kilómetros de la zona marina abierta, han sido interpretados como depósitos tsunamigénicos. La unidad E5 corresponde con facies desarrolladas en la topografía actual y se desarrollan asociadas a geometrías específicas canalizadas y tabulares. Estas facies son interpretadas como el relleno de fondo de canal estuarino en transición a llanuras intermareales y marismas saladas, depositadas ya bajo un elevado grado de colmatación y canalización del sistema (Fig. 10F).

Finalmente se depositan los cuerpos más recientes de dominio del oleaje y que corresponden con formaciones superficiales arenosas actuales. Sobre estas unidades se extienden amplias zonas cubiertas por depósitos artificiales relacionados con las actividades urbana, portuaria e industrial.

El relleno del estuario quedaría, pues constituido por tres secuencias de unidades. La primera secuencia estaría constituida por las unidades depositadas durante el Pleistoceno superior (unidades Pt1, Pt2 y F1) y suponen claramente una secuencia regresiva de incisión fluvial. La segunda secuencia queda constituida por las unidades E1, E2 y E3 que es claramente una secuencia transgresiva en la que cada unidad representa un estadio diferente en la invasión del estuario por un nivel marino ascendente. La última secuencia, que corresponde a la superposición de las unidades E4 y E5, así como de las unidades O1, O2 y O3, supone la secuencia regresiva desarrollada durante el periodo de estabilización del nivel marino que sigue al máximo transgresivo (Fig. 10 E y F).

Estas unidades son equivalentes a las descritas por Borrego *et al.* (1999), si bien estos autores realizaron la descripción de unidades a partir de un solo sondeo y no pudieron determinar la geometría de las unidades, que en el presente trabajo han sido determinadas para las unidades superiores a través de los perfiles sísmicos. Además, Borrego *et al.* (1999) no determinaron el tipo de contacto que separa las diferentes unidades y que este trabajo demuestra que son discordancias que separan unidades con diferente litología y geometría. El artículo de Dabrio *et al.* (2000) analizó también la secuencia de facies de este estuario, en este caso mediante el estudio de 14 sondeos. La correlación lateral de estos testigos de sedimento permitió a estos autores distinguir dos superficies erosivas diacrónicas (*ravinement surfaces*). La inferior de estas superficies corresponde al contacto entre facies pleistocenas equivalentes a nuestra unidad F1 con las facies holocenas inferiores (definidas en el presente trabajo como unidad E1). La segunda de las superficies correspondería al contacto entre

las unidades inferiores (contacto E1-E2 de este trabajo). Sin embargo, el citado artículo, al analizar solo la litología de los sondeos no logra distinguir las discordancias angulares que separan las unidades superiores, ya que estas discordancias solo han podido ser distinguidas a través del estudio conjunto de los perfiles sísmicos y los sondeos.

Conclusiones

La arquitectura de cuerpos sedimentarios caracterizada en el presente trabajo en la desembocadura del río Odiel es más compleja a la presentada en trabajos anteriores. Las unidades basales del estuario se depositaron en un sistema fluvial (unidad F1) desarrollado durante un descenso del nivel del mar, lo que generó una incisión fluvial sobre unidades pleistocenas anteriores.

Las tres primeras unidades estuarinas holocenas (unidades E1-E3) corresponden con una secuencia transgresiva depositada durante la subida del nivel del mar. Su disposición geométrica no ha podido estudiarse en los perfiles sísmicos debido a que estos no alcanzan las profundidades a las que se encuentran estos depósitos. Las barreras arenosas que probablemente protegían a este sistema estuarino transgresivo no han sido observadas, lo que sugiere que no quedaron preservadas o se situaban aguas afuera de nuestra zona de estudio. El depósito de la unidad estuarina E3, representa la invasión del estuario de las arenas procedentes de la zona costera abierta, que se depositan con una morfología claramente canalizada en perfil transversal y progradante hacia el frente de la antigua línea de costa. El trazado de este antiguo canal estuarino difiere del que existe hoy día. La posición del nivel marino durante el depósito de esta unidad E3 era unos 3 m inferior al existente actualmente. Estas tres unidades están afectadas por fallas normales a las que se adaptan las unidades depositadas con posterioridad. Estas fallas implican una actividad neotectónica que podría estar relacionada con un contexto de elevación postorogénica del margen del antepaís de las cordilleras Béticas, debido a un adelgazamiento cortical extensional.

Las unidades estuarinas superiores (unidades E4 y E5) constituyen una secuencia regresiva, depositada con un nivel marino más o menos estable, aunque con ligeras oscilaciones. Estas unidades suponen el establecimiento de una red de drenaje mareal y la colmatación casi completa del estuario.

El relleno casi total del estuario más interno supone el inicio de un proceso de progradación iniciado hace unos siglos. Los cuerpos arenosos que cierran parcialmente el estuario (unidades O1-O3) comenzaron a depositarse antes de que las unidades estuarinas superiores alcanzaran un alto grado de colmatación del mismo. La presencia de estos cuerpos de oleaje constriñe el sistema condicionando los procesos hidrodinámicos que contribuyen a la colmatación final del estuario. De esta forma, desde la aparición de los cuerpos arenosos de cierre, el interior del estuario queda dominado por la marea. La disposición de los cuerpos de oleaje indica una migración hacia el exterior de la influencia del oleaje y es una muestra más de la progradación del sistema estuarino.

El depósito de esta secuencia con una potencia total de más de 30 m en un periodo inferior a los 10.000 años supone altas tasas de sedimentación. Estas altas tasas de sedimentación ya fueron descritas por autores anteriores (Dabrio *et al.*, 2000; Morales *et al.*, 2003) y desde el punto de vista práctico hacen necesaria una importante continuidad en los dragados de mantenimiento portuario. Son precisamente este tipo de obras de infraestructura portuaria las que requieren el conocimiento de las propiedades del subsuelo. Además de esto, hay que tener en cuenta que este estuario ha sido usado como base portuaria, al menos en los últimos cuatro milenios, existiendo un rico patrimonio arqueológico y cultural contenido en algunas de las unidades estudiadas. La existencia de estos elementos patrimoniales contenidos en las unidades estuarinas ha interferido en el pasado en el desarrollo de las actividades del puerto, de ahí que su localización y estudio se hagan primordiales a fin de evitar que su hallazgo casual durante alguna intervención no interfiera en el desarrollo portuario.

Agradecimientos

Agradecemos a la Autoridad Portuaria de Huelva la financiación de esta investigación a través de diferentes convenios de colaboración con el Grupo de Geociencias Aplicadas de la Universidad de Huelva. Esta financiación permitió, no solo el acceso a la base de datos de sondeos y vibrocores del puerto, sino la realización de nuevos sondeos y de todos los perfiles sísmicos usados en este trabajo. Estos perfiles fueron realizados a través de la asistencia técnica de las empresas Ánfora G.I.P y Navíos de Aviso S.L.U.

Agradecemos la aportación de los revisores, los doctores S. Alliotta y G. Flor-Blanco, y de la editora de la Revista, la doctora B. Bádenas, cuyos comentarios contribuyeron a mejorar el enfoque del manuscrito y su contenido.

Referencias

- Borrego, J., 1992. Sedimentología del Estuario del Río Odiel (Huelva, SW España). Tesis Doctoral, Univ. Sevilla, 308 p.
- Borrego, J., Pendón, J.G., 1989. Caracterización del ciclo mareal en la desembocadura del río Piedras (Huelva). *XII Congreso Español de Sedimentología, Bilbao, Comunicaciones*, 1: 97-100.
- Borrego, J., Morales, J.A., Pendón, J.G., 1995. Holocene estuarine facies along the mesotidal coast of Huelva, South-Western Spain. En: *Tidal Signatures in Modern and Ancient Sediments*, (W.F. Flemming., A. Bartholoma., Eds). *I.A.S. Special Publication*, 24: 151-170.
- Borrego, J., Ruiz, F., González-Regalado, M.L., Pendón, J.G., Morales, J.A., 1999. The Holocene transgression into the estuarine central basin of the Odiel River mouth (Cadiz Gulf SW Spain): lithology and faunal assemblages. *Quaternary Science Reviews*, 18: 769-788.
- Borrego, J., Morales, J.A., Gil, N., 2000. Evolución sedimentaria reciente de la desembocadura de la Ría de Huelva (Suroeste de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (3-4): 405-416.
- Camacho, M.A., García Navarro, E., Morales, J.A. 2011. Study on the consolidation state of sediments in the Huelva Estuary (SW Spain). *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 70: 699-707.

- Carro, B., 2002. Sedimentación reciente en el estuario del río Tinto. Informe DEA, Univ. Huelva, 137 p.
- Dabrio, C.J., Zazo C., Goy, J.L., Sierró, F.J., Borja, F., Lario, J., González, J.A., Flores, J.A., 2000. Depositional history of estuarine infill during the last postglacial transgression Gulf of Cadiz, Southern Spain. *Marine Geology*, 162: 381-404.
- Darlymple, R.N., Zaitlin, B.A., Boyd, R., 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62: 1030-1055.
- Davies, R.A., 1964. A morphological approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphology*, 8: 27-42.
- Delgado, J., Boski, T., Nieto, J.M., Pereira, L., Moura, D., Gomes, A., Sousa, C., García-Tenorio, R., 2012. Sea-level rise and anthropogenic activities recorded in the late Pleistocene/Holocene sedimentary infill of the Guadiana Estuary (SW Iberia). *Quaternary Science Reviews*, 33: 121-141.
- Fairbridge, R.W., 1980. The estuary: its definition and geodynamic cycle. En: *Chemistry and biochemistry of Estuaries*, (E. Olausson, I. Cato, Eds). John Wiley & Sons, 1-36.
- Flor, G. 1995. Clasificación y caracterización de los estuarios asturianos. En: *Actas del IV Coloquio Internacional sobre Oceanografía del Golfo de Vizcaya*, (O. Cendrero, I. Olaso, Eds). I.E.O, Santander, 133-141.
- Grande, J.A., Borrego, J., Morales, J.A., 2000. A study of heavy metal pollution in the Tinto–Odiel estuary in southwestern Spain using factor analysis. *Environmental Geology*, 39: 1095-1101.
- Hayes, M.O., 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. En: *Barrier Islands*, (S.P. Leatherman, Ed). Academic Press, New York, 1-29.
- Julivert, M., Fontboté, J., Ribeiro, A., Conde, L., 1974. *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares 1:1.000.000 (Memoria Explicativa)*. IGME, Madrid, 113 p.
- López-González, N.M., 2002. Caracterización e interpretación de las facies deposicionales del sector interno en el estuario del río Odiel. Trabajo de investigación del programa de Doctorado “Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente”, Univ. Huelva, 118 p.
- M.O.P.U., 1991. Estuario de oleaje para la primera fase del estudio de evolución de la Playa de Castilla (Huelva). Dirección General de Puertos y Costas (informe inédito), 33 p.
- Morales, J.A., 1993. Sedimentología del Estuario del Río Guadiana (SO España-Portugal). Serv. Publ. Univ. Huelva, 1995. Tesis Doctoral, Univ. Sevilla, 300 p.
- Morales, J.A., San Miguel, E.G., Borrego, J., 2003. Tasas de sedimentación reciente en la Ría de Huelva. *Geogaceta*, 33: 15-18.
- Morales, J.A., Borrego, J., Ballesta, M., 2004. Influence of harbour constructions on morphosedimentary changes in the Tinto-Odiel estuary mouth (South-West Spain). *Environmental Geology*, 46 (2): 151-164.
- Morales, J.A., Borrego, J., Davis Jr, R.A., 2014. A new mechanism for chenier development and a facies model of the Saltés Island chenier plain (SW Spain). *Geomorphology*, 204: 265-276.
- Roy, P.S., 1984. New South Whales estuaries: their origin and evolution. En: *Coastal geomorphology in Australia*, (B.G. Thom, Ed). Academic press, 99-121.
- Sáinz, A., Grande, J.A., de la Torre, M.L., 2004. Characterisation of heavy metal discharge into the Ria of Huelva. *Environment International*, 30: 557-566.
- Sarmiento, A.M., Casiot, C., Nieto, J.M., Elbaz-Poulichet, F., Olías, M., 2005. Variación estacional en la especiación y movilidad de Fe y As en aguas afectadas por drenajes ácidos de mina en la cuenca del río Odiel (Huelva). *Geogaceta*, 37: 115-118.

MANUSCRITO RECIBIDO EL 5-10-2019

RECIBIDA LA REVISIÓN EL 14-1-2019

ACEPTADO EL MANUSCRITO REVISADO EL 14-2-2019