

Erosión en la desembocadura del río San Pedro (Cádiz): Estudio de la problemática y propuesta de soluciones

MUÑOZ PÉREZ, JUAN JOSÉ (*); DE LA CASA, ÁNGEL (*); ENRÍQUEZ, JAVIER (**)

RESUMEN Se describe la situación actual de la desembocadura del Río San Pedro, haciendo hincapié en las modificaciones ambientales experimentadas tras una serie de actuaciones antrópicas durante los últimos 30 años. Se muestra una metodología para recopilación de la información precisa en casos parecidos. Tras el análisis de la misma, mediante modelos numéricos, se presenta la valoración de diferentes alternativas de actuación, las cuales no llegan a corregir el impacto causado, pero mejoran sustancialmente el medio ambiente.

EROSION ON THE SAN PEDRO RIVER MOUTH (SW, SPAIN): A STUDY OF THE PROBLEM AND A PROPOSAL FOR SOLUTIONS

ABSTRACT *The present situation at the San Pedro River Mouth is described herein. Emphasis is made on environmental modification undergone as resulting from anthropic works carried out during the last 30 years. A methodology for the recolection of precise data is exposed to be used in similar cases. Data were analyzed through the application of numerical models. subsequent solutions and comments made are hereby presented. Though the impact caused would not be completely corrected, the environment would substantially improved.*

Palabras clave: Erosión costera; dinamita sedimentaria; desembocadura; impacto ambiental; revestimiento de orillas; gestión costera.

INTRODUCCIÓN

La desembocadura del Río San Pedro se ha visto sometida en las últimas décadas a actuaciones urbanísticas, costeras y portuarias, las cuales han modificado su estado natural y han generado nuevos problemas en su entorno. Así, los temporales de 1990 hicieron retroceder de tal modo la orilla, que quedó al descubierto parte del colector que conduce hasta la Estación Depuradora las aguas residuales del casco urbano de Puerto Real y de su polígono industrial.

La Dirección General de Costas realizó en 1991 el "Proyecto de defensa de la margen izquierda del Río San Pedro y aporte de arena", con el objeto de recuperar y proteger parte de la antigua playa de la margen del río, cerca de su desembocadura. En 1997 hubo de redactarse por el procedimiento de emergencia el "Proyecto de reparaciones en el río San Pedro", destinado a restablecer la estructura de la escollera que recorre esta misma margen en su último tramo, y que se había visto afectada por la erosión del cauce.

Recientemente, el avance de la erosión en la margen izquierda del último tramo del río, junto con la necesidad de llevar a cabo actuaciones que permitieran recuperar su entorno natural, indujeron la realización de un estudio de di-

námica litoral destinado a identificar las causas de la erosión y las medidas a tomar para su protección. Este estudio fue abordado a lo largo de 1998 y 1999 por la empresa HIDTMA, S.L., y a la vista de sus resultados se elaboraron una serie de alternativas de actuación destinadas a la mejora del entorno de la desembocadura, entre las cuales se consideraron algunas tan radicales como la necesidad de eliminar tramos escolleros de la margen izquierda del río y parte de los rellenos del Muelle de La Cabezuela.

TOMA DE DATOS Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Ante la complicada mezcla de fenómenos hidrodinámicos y sedimentarios que se dan en toda zona de marismas, no es posible obtener un grado adecuado de precisión en los análisis si no es mediante el uso de herramientas de modelización numérica bidimensional adecuadas. Por ello, el estudio realizado ha incluido la utilización de una serie de modelos matemáticos que permiten tener en cuenta todos los fenómenos de transformación que afectan a oleajes, corrientes y sedimentos.

Se ha dispuesto de la información de base contenida en el "Estudio de actuaciones en la zona marismal de los Toruños y Pinar de la Algaida" (OMICRON, 1997; Muñoz Pérez et al 1999). Además, la Dirección General de Costas ha llevado a cabo en los últimos años una campaña de seguimiento de la evolución de los fondos del río, que ha sido completada con una nueva batimetría de los fondos interiores y los bajos exteriores.

(*) Demarcación de Costas de Andalucía-Atlántico, Marianista Cubillo n. 7, 11071, Cádiz

(**) HIDTMA, S.L. Avenida de Europa 16, Chalet 2, 28226 Pozuelo de Alarcón (Madrid)

Se ha efectuado una campaña de medidas de la propagación de la onda de marea, que ha permitido la correcta calibración de los modelos numéricos hidrodinámicos. En esta campaña se han medido velocidades con correntómetro fijo, trayectorias mediante biplano y niveles de marea mediante mareógrafos y regletas graduadas. También se han recogido un total de 40 muestras de sedimento repartidas entre la zona exterior de la desembocadura, la playa exterior y el tramo final del río.

Igualmente, se ha llevado a cabo un análisis del clima marítimo en la costa de Cádiz y un estudio completo de la propagación de los principales oleajes hasta el frente de la desembocadura del río. Asimismo, se ha efectuado un estudio de la evolución histórica de la zona mediante la comparación de fotografías aéreas desde los años 50 hasta nuestros días. Una descripción de la metodología aplicada y de la información existente puede consultarse en Muñoz Pérez y Enríquez (1998).

Con el objeto de tener una base adecuada para el análisis de las alternativas de actuación, se ha realizado una revisión general del estado ambiental de la zona de marisma y playa exterior, centrada en la descripción de las diversas unidades que componen la marisma, estado actual y grado de conservación de la flora y fauna, el estado del flujo en los caños y sus alteraciones recientes.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

El río San Pedro desemboca en el límite entre los denominados sacos interior y exterior de la Bahía de Cádiz (ver figura 1). Una explicación de su génesis puede consultarse en Gavala (1927) o Gutiérrez Mas et al (1982). Igualmente, puede recurrirse a Gutiérrez Mas et al. (1991) para una visión global de la dinámica sedimentaria y una introducción a la geología de la zona. En lo referente a su dinámica mareal, se trata de una zona con variaciones medias del nivel del mar, no superando la carrera de marea máxima los 4 metros de oscilación. Las arenas que forman las playas tienen una naturaleza silícica en su mayor parte (85-95%) contando, en menor medida, con fragmentos conchífero o bioclastos (5-15%). El tamaño medio de los granos es de unas 250 micras.

El Río San Pedro se configura como un caño de entrada y salida de corrientes mareales de la zona marismosa de Los Toruños, antiguo delta del Río Guadalete. Toda la zona ha estado sometida a profundas transformaciones en las últimas décadas, viéndose afectada por actividades urbanísticas, industriales y agrícolas que han modificado en buena manera su estado original. En su entorno se mezclan terrenos arenosos, de playas y dunas, con caños de fango, pinares y marismas, con profusa vegetación autóctona en magnífico estado de conservación. La fauna que habita este entorno es

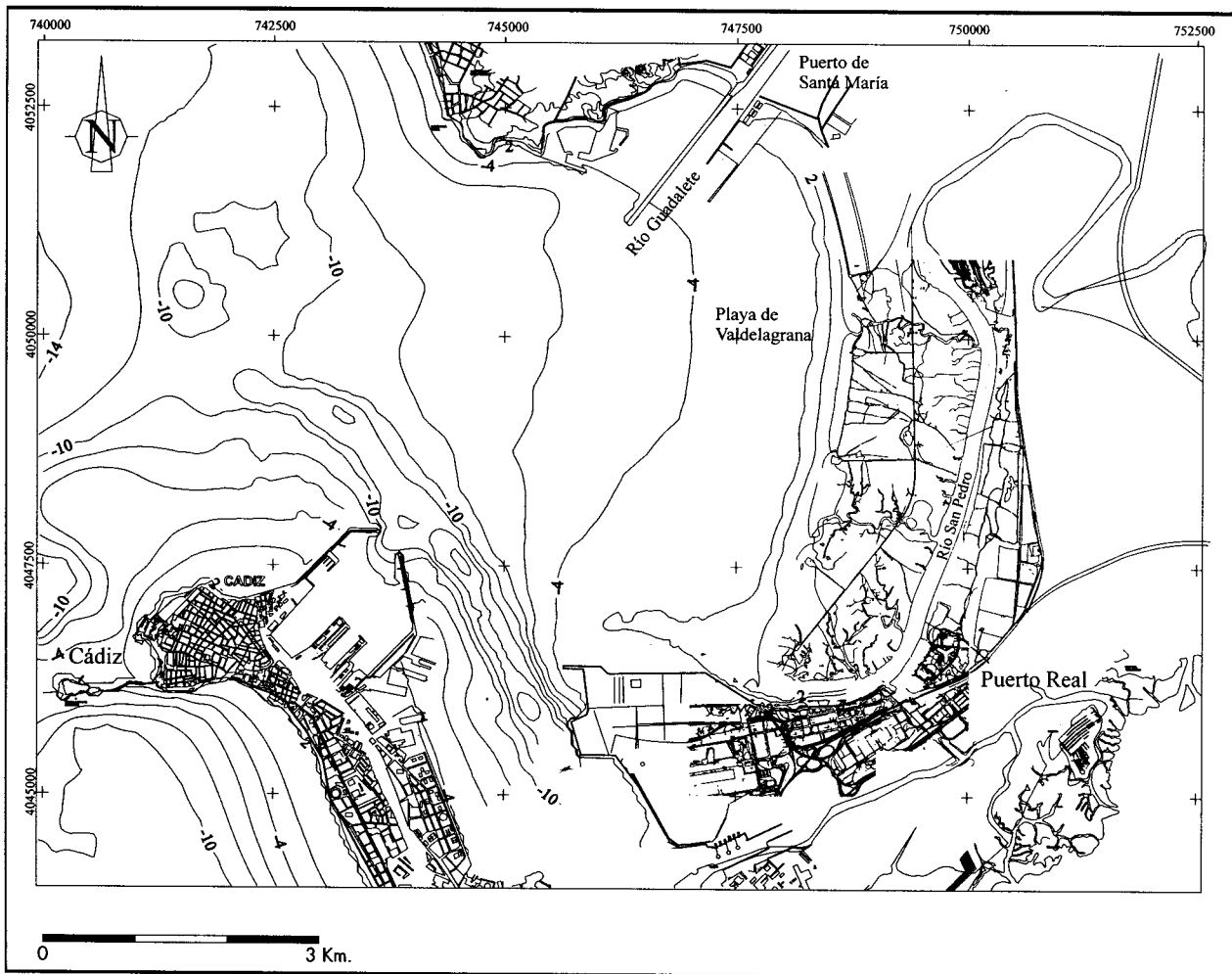


FIGURA 1. Planta general de la Bahía de Cádiz y desembocadura del Río San Pedro.

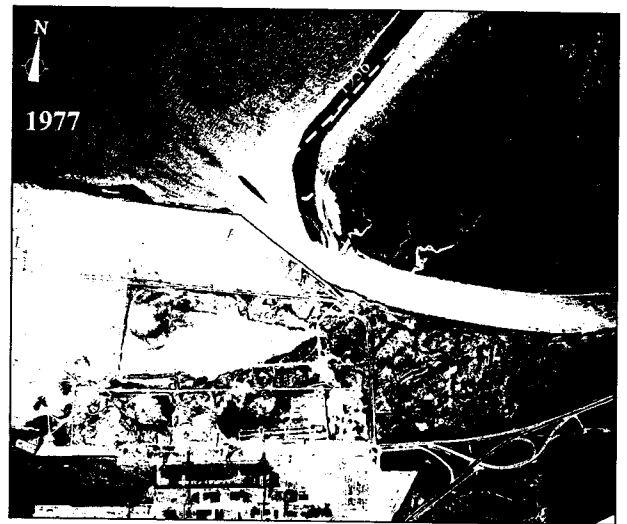


FIGURA 2. Fotografías de la desembocadura del Río San Pedro, antes y después de los rellenos del bajo de La Cabezuela.

muy abundante, en especial en lo que respecta a peces, aves y reptiles protegidos como el camaleón.

La dinámica litoral ha conformado en el exterior de esta zona una playa en forma de flecha que se ha introducido hacia la desembocadura, empujada por las diversas actuaciones en el cauce del río. Estas mismas actuaciones han deteriorado gradualmente la margen izquierda, cuya ribera es utilizada como playa por los ciudadanos de Puerto Real, y que se ha visto sometida a un proceso acelerado de erosión. Desde el caño de Cortadura hasta la salida del río únicamente existe ya un pequeño tramo de 20 metros de ribera sin escollerar, mientras que aguas arriba de este punto la margen izquierda sufre un proceso de erosión apreciable.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA DESEMBOCADURA

TRANSFORMACIONES OCASIONADAS POR LOS RELLENOS EN LA CABEZUELA

La estructura reciente de la desembocadura del río San Pedro ha estado marcada por la construcción en los años 70 de los rellenos para nuevas superficies portuarias en el Bajo de La Cabezuela. En la figura 2 se aprecia la situación de la margen izquierda de la desembocadura en 1956, destacando la existencia de una amplia playa en continuación hacia el sur de las playas más septentrionales de Valdelagrana y Levante. Frente a esta playa existía un amplio bajo constituido, probablemente, por arena fina y sedimentos fangosos. En el año 1977 el relleno del Bajo de La Cabezuela ha invadido el antiguo canal, obligando a que el flujo de salida y entrada se encauce a lo largo de la nueva defensa lateral del relleno, lo que provoca el desplazamiento del eje del cauce hacia la obra.

El cambio de dirección del canal a lo largo de la escollera se propaga hacia ambos lados de la misma, provocando dos efectos característicos. En primer lugar, se produce un cambio de dirección del eje principal de salida, orientándose hacia el NW en su último tramo y rectificando el antiguo giro hacia el norte; este efecto puede haber sido provocado también por el cambio de las corrientes generales de la bahía, modificadas por la presencia del nuevo relleno portuario. En segundo lugar, hacia el interior del río, el flujo principal tiende a prolongarse siguiendo la alineación de la propia es-

collera, lo que provoca un fuerte retroceso de la margen izquierda del río. Esta erosión ha tenido que ser finalmente detenida mediante obras de defensa y revestimientos de escollera.

La figura 3 presenta la batimetría actual de la desembocadura del río, sobre la que se han superpuesto las líneas aproximadas de pleamar, límite de la vegetación y eje del canal principal de salida del río en el año 1956. Puede observarse cómo antes de la construcción del relleno la playa estaba mucho más avanzada que en la actualidad, orientada hacia el NW y con un canal de salida más ancho. Se ha estimado un retroceso medio de la margen izquierda del río de 60 m en la proximidades de la escollera de La Cabezuela (frente a la playa artificial actual), mientras que, en la zona interior del río, este retroceso ha sido de unos 30 m aproximadamente.

Por tanto, la consecuencia principal de la construcción de los terrenos portuarios en La Cabezuela ha sido el desplazamiento del eje del río hacia la margen izquierda, provocando la aparición de erosiones en la misma.

TRANSFORMACIONES OCASIONADAS POR LAS ACTUACIONES EN LAS MARISMAS

Las marismas del río San Pedro se han visto sometidas en las últimas décadas a intensas transformaciones; así, una antigua presa de tierra limita el alcance de la marea a unos 1500 metros aguas arriba del puente de la carretera N-IV, es decir, a unos 15 Km de la desembocadura. Por otro lado, es de destacar la reducción del prisma de marea del cauce derivada de las transformaciones de la marisma en Salinas (Las Aletas y Cetina, Los Desamparados, San Carlos y San Jaime).

Todas estas transformaciones tienden a disminuir los caudales de entrada y salida del río y, en consecuencia, provocan la disminución de la sección de la desembocadura, que se ha visto lentamente invadida por los sedimentos de la playa de Levante. Este progresivo estrechamiento de la desembocadura es claramente visible en las figuras 2 y 3.

Asimismo, la construcción de viales por encima del Caño de Cortadura (ver figura 1) ha provocado la reducción del flujo mareal a lo largo del mismo, de manera que la circulación efectiva de corrientes se produce únicamente durante mareas vivas y con un caudal notablemente infe-

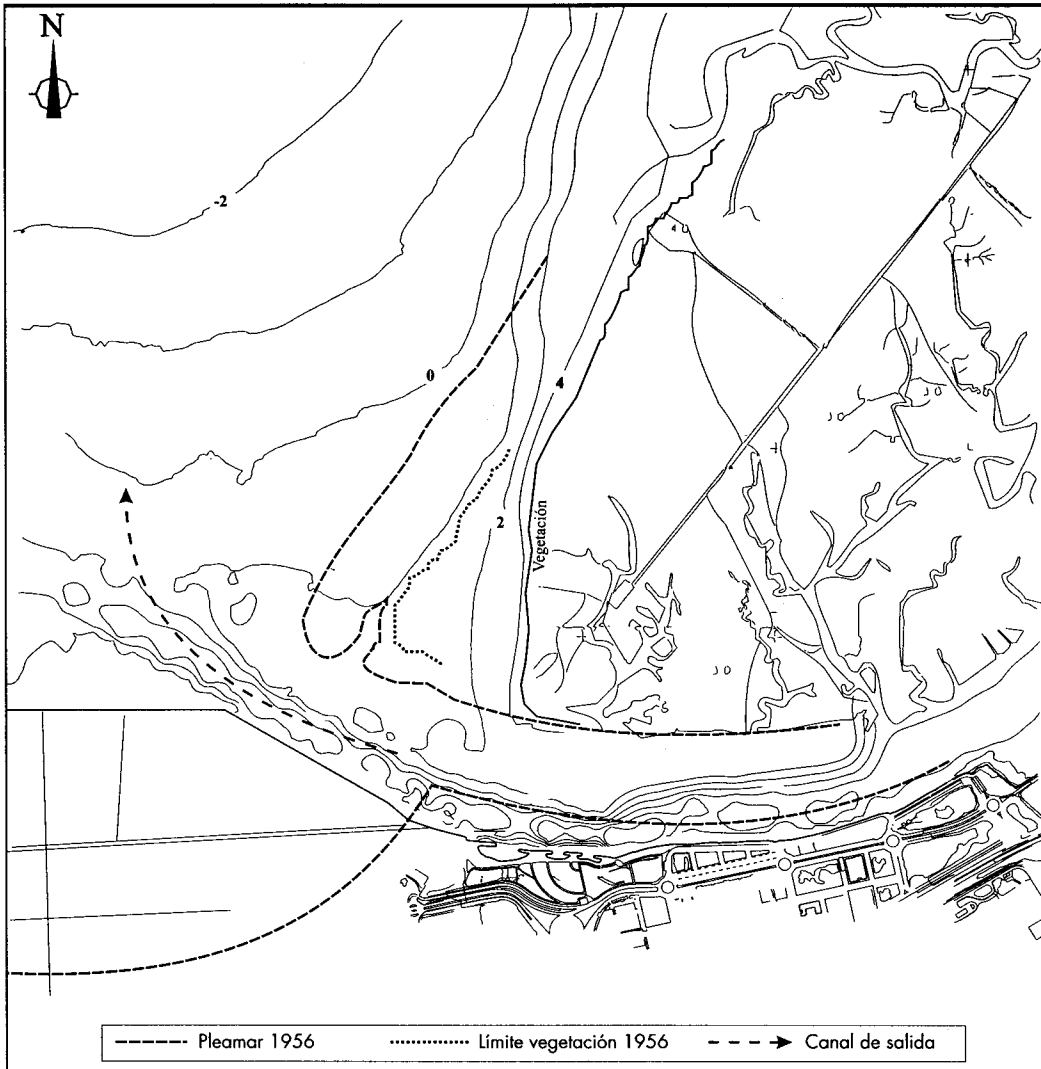


FIGURA 3. Línea de costa de 1956, comparada con la situación actual.

rior al natural. La comunicación entre los diversos tramos en los que el canal ha sido dividido por los viales se realiza a través de tubos, los cuales están frecuentemente obturados, lo que reduce notablemente la circulación total a través del caño.

Durante la marea vaciante, momento en el que se producen en el sistema las mayores velocidades de corriente, el caño vierte sus aguas hacia el río. Por tanto, en condiciones naturales, sin las obstrucciones generadas durante las últimas décadas, esta salida de flujo tenía su influencia en la configuración del canal principal del río. La reducción sensible de este flujo de salida ha podido contribuir a la deriva del canal principal hacia la margen izquierda.

CAMBIOS RECIENTES EN LA SECCIÓN DEL CANAL

En la figura 4 se han representado los perfiles extraídos a lo largo del río durante el periodo agosto-94 a noviembre-98. Puede observarse cómo en el perfil nº 1 se produce un brusco acercamiento del canal hacia la escollera de protección, con un avance superior a los 30 m en ese tramo. Todo el canal se desplaza hacia el sur, produciéndose un avance de los sedimentos que bordean la marisma en la margen derecha. Este avance se intuye en el periodo 1994-96, pero se acelera de

forma clara en los dos últimos años. Este acercamiento del canal a la escollera se repite en perfiles sucesivos, con ajustes de su posición del orden de 20-30m.

A lo largo de la primera alineación del relleno de La Cabezuela (perfil nº 2) el canal se ha mantenido bastante estable, con ligeros desplazamientos (5-10 m) de la barra intermareal de la playa de levante hacia el río. Esta barra, situada en la margen derecha de la salida, parece haber ganado cota en los últimos años, habiéndose desplazado su superficie desde el nivel +1 m aproximadamente hasta el nivel +2 m.

En la segunda alineación del relleno de La Cabezuela, el canal se despega gradualmente de la escollera, y su trayectoria parece haberse visto también invadida por el avance del bajo, con desplazamientos de hasta 50 m hacia el sur. En este último tramo, en el que el canal principal discurre libremente, sin encauzamiento natural, se pueden producir oscilaciones estacionales o hiperanuales relevantes.

SITUACIÓN AMBIENTAL

Por su situación actual, sin apenas cuenca vertiente efectiva, el río San Pedro es considerado como un caño más por

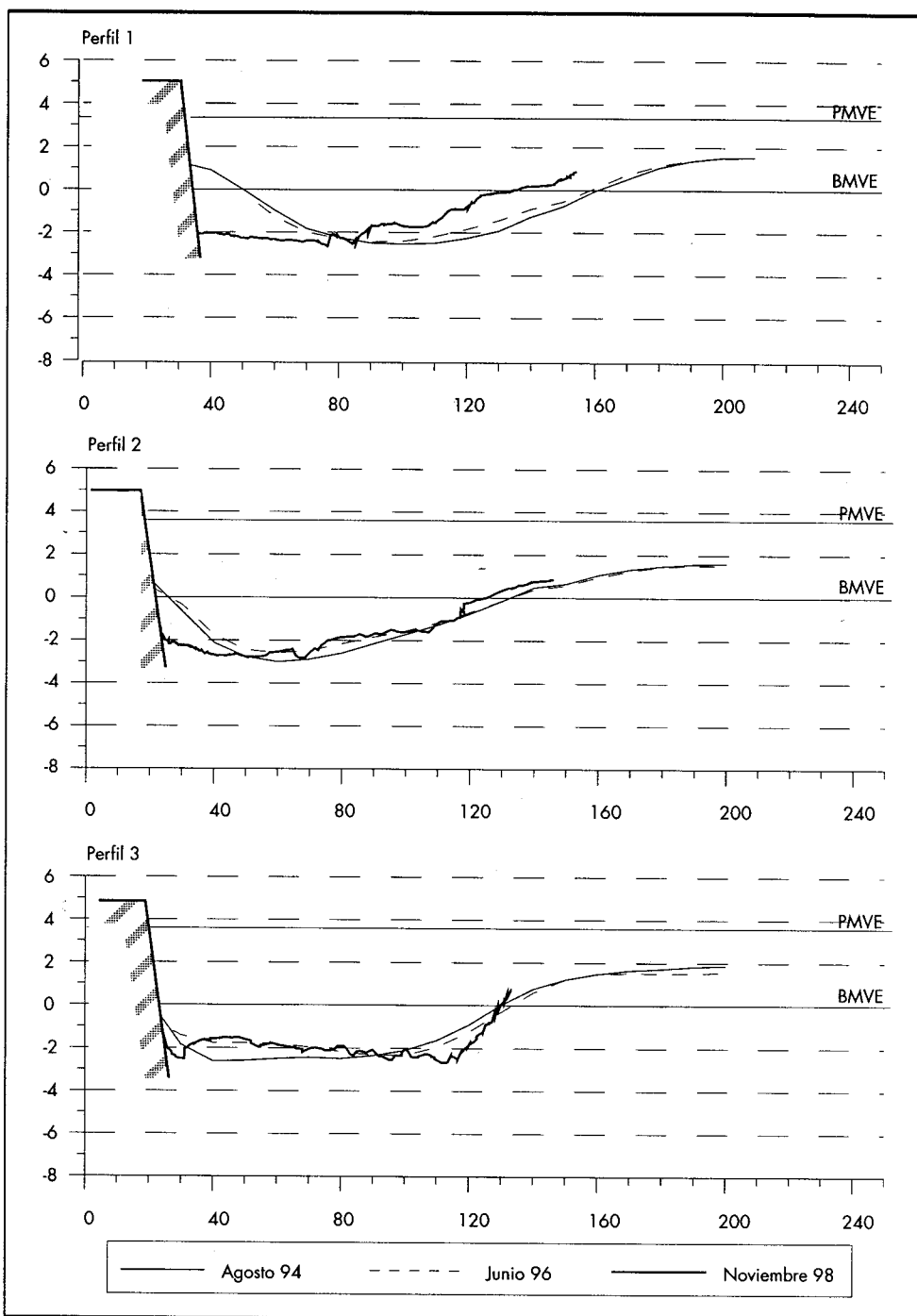


FIGURA 4. Variación de la sección del río en las proximidades de la desembocadura.

diversos autores (Fernández Palacios, 1988). La circulación de las aguas sobre un perfil prácticamente llano es plenamente mareal y únicamente en ocasión de grandes lluvias pueden producirse aportes de agua dulce, que no son especialmente importantes y afectan en escasa medida a las condiciones de salinidad general de las aguas. Así, los valores mínimos de salinidad detectados aguas arriba de la carretera nacional es de unas 13 partes por millar, con lluvias intensas, y el máximo en torno al 40 por mil con mareas muertas y pleno verano. Como consecuencia de todo ello, y en especial por la escasa cuenca vertiente, los aportes de mate-

riales sedimentarios a la desembocadura han de ser relativamente escasos.

La carrera de marea se encuentra limitada a unos 1500 metros aguas arriba del puente de la carretera N-IV, en una antigua corta, hoy en desuso, pero funcional.

Por otro lado destaca la toma de agua en el río San Pedro de las salinas de La Tapa, situadas entre éste y el río Guadalete. Asimismo, son destacables las antiguas transformaciones de la marisma del entorno del caño, como las de Las Aletas y Cetina, desecadas aguas arriba, o las de Los Desamparados, San Carlos y San Jaime, aguas abajo de la corta, en la margen izquierda.

IMPORTANCIA PARA LA AVIFAUNA

Es manifiesta la importancia de la Bahía de Cádiz para el contingente de aves limícolas que utilizan la ruta de vuelo migratoria Atlántico-Oriental. Así, se considera la Bahía de Cádiz como la primera zona en nuestro país, y la segunda de la Península Ibérica, en cuanto al tamaño poblacional de las especies de limícolas invernantes. Al alcanzar los 25.000 limícolas invernantes, cumple los requisitos para atribuirle el grado de importancia internacional, de acuerdo con los criterios de la Convención de Ramsar, con algunas especies como el Chorlitojo Patinegro, Chorlitojo Grande, Cigüeñuela, Avoceta y Aguja Colinegra, que sobrepasan el 1% de sus totales en la vía de vuelo del Atlántico Oriental.

En este marco, el río San Pedro, con sus hábitats asociados de salinas, marisma transformada, marisma natural, playas y bajos arenosos de la desembocadura, constituyen un sector clave, que soporta una parte importante del conjunto avifaunístico censado.

Durante los trabajos de campo en la zona se han realizado observaciones de la avifauna acuática así como del uso de los diferentes hábitats. Destaca la importancia numérica del Ostrero, ya que representa el 65% del total de aves limícolas observadas. Esta especie se alimenta en los bajos intermareales con su pico largo y especializado y su abundancia puede darnos una buena idea de la enorme densidad de moluscos como el verdigón que mantienen los bajos arenosos. También se localizaron dormideros de limícolas en pleamar en diversas zonas del río, destacando los grandes bandos de Chorlito gris, Archibebe común, Chorlitojos, Correlimos y Zarapito real y trinador. También destaca la observación de un ejemplar de Aguila pescadora en el interior del río.

CALIDAD DE LAS AGUAS

En general, la calidad de las aguas en la zona es aceptable con unas concentraciones de metales, aceites y grasas relativamente bajas. La baja transparencia de las aguas y las elevadas concentraciones de partículas son características de las aguas de la Bahía de Cádiz y junto con los elevados niveles de nutrientes son en buena medida los responsables de su elevada productividad biológica.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA DESEMBOCADURA

METODOLOGÍA

Para analizar las condiciones del transporte de sedimentos en la desembocadura del Río San Pedro se ha procedido a la modelización de los fenómenos hidrodinámicos y sedimentarios que tienen lugar en su entorno debido a la acción combinada de oleajes y corrientes de marea mediante la siguiente metodología:

- Se propaga el oleaje exterior hasta la playa. Estos oleajes exteriores proceden del clima marítimo elaborado mediante observaciones visuales y datos de la boya de medida instalada frente a la costa de Cádiz.
- A partir de la distribución de altura de ola sobre las playas se calcula el tensor de radiación, y éste se introduce como fuerza actuante en el modelo hidrodinámico Mike 21-HD (Danish Hydraulic Institute) que calcula así las corrientes generadas por el oleaje especificado.
- Con la altura de ola y la corriente calculada en cada punto del modelo se calcula la tasa de transporte de sedimentos ocasionada por el oleaje, aplicando para ello el modelo de transporte sedimentario de Deigaard, Fredsoe y Hedegaard (1986).

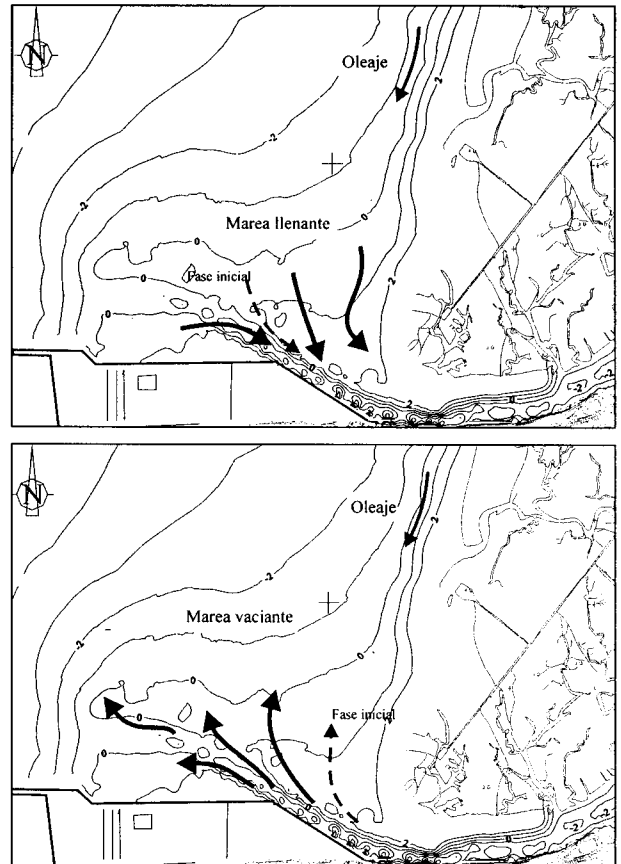


FIGURA 5. Esquema del transporte de sedimentos en la desembocadura del río.

RESULTADOS

Durante el periodo de marea baja, en el cual todavía se produce una salida apreciable de flujo, se produce un transporte de sedimentos hacia el exterior de la desembocadura, transporte que una vez rebasada la barra exterior se dirige hacia el norte. En esta fase los oleajes exteriores provocan un cierto transporte de sedimentos hacia el sur a lo largo de la playa.

A media marea es cuando el flujo saliente más intenso se propaga a mayor distancia a lo largo del canal exterior de salida, con una derivación hacia el norte en su margen derecha, que se une hacia costa a la corriente norte-sur que recorre la playa generada por los oleajes exteriores. Durante la fase de marea alta, el transporte producido por el oleaje en la playa es más reducido, por lo que el flujo toma una orientación más clara en sentido norte. Con marea llenante se produce una entrada general de sedimentos hacia el río procedente de todo el contorno exterior de la desembocadura, siendo la entrada en la fase inicial (nivel bajo) preferentemente por el canal principal, para absorber posteriormente el río el sedimento desde toda la zona de bajos.

Es de destacar que la transferencia de sedimentos entre la desembocadura y el río únicamente se activa de forma relevante cuando actúa un oleaje exterior de cierta intensidad, dado que las corrientes por sí mismas no son capaces de movilizar habitualmente gran cantidad de sedimento. La figura 5 presenta un esquema simplificado de la transferencia de sedimentos entre el río y su desembocadura.

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN

OBJETIVO DE LAS ACTUACIONES

Las futuras actuaciones a realizar en el entorno de la desembocadura del río San Pedro fueron enfocadas a considerar los pros y los contras de los siguientes objetivos tras conversaciones con los responsables de la política de la Dirección General de Costas durante el periodo 1998-1999 :

- Recuperar en lo posible la antigua superficie de playa de la margen izquierda del río, perdida como consecuencia de las actuaciones urbanas en el entorno
- Mejorar la calidad y amplitud de las playas actuales, evitando el progreso de la erosión registrada en los últimos años
- Eliminar la protección de escollera allí donde sea viable, liberando el frente marítimo de obras artificiales, aún a costa de posibles retrocesos de la orilla.
- Crear un acceso a la playa de Levante desde la margen izquierda, de forma que la misma sea más fácilmente accesible para la población de Puerto Real.

ALTERNATIVA 1 - MEJORA DE LAS PLAYAS DE LA DESEMBOCADURA

Las playas situadas en la margen izquierda del río fueron construidas en el años 1991 como parte de un proyecto de defensa frente a la erosión de un tramo de costa de unos 400 m de longitud. Las obras de defensa proyectadas se configuran como una barrera longitudinal del cauce, formada por espigones y diques exentos, los cuales fijan la posición del río y permiten a su resguardo el mantenimiento de una pequeña superficie de playa estable. Estas playas encajadas permitían, por rotura del oleaje incidente, disminuir la reflexión de la energía del mismo frente a una solución muro corrido longitudinal.

Se propone como alternativa de actuación una obra destinada a recuperar una parte de la antigua playa existente en esa zona, mediante un tipo de defensa muy similar al que existe actualmente, y cuyos resultados han sido tan positivos para la estabilidad del tramo regenerado de la margen izquierda.

Las obras de defensa propuestas se presentan en la figura 6 e incluyen la rectificación del primer espigón de cie-

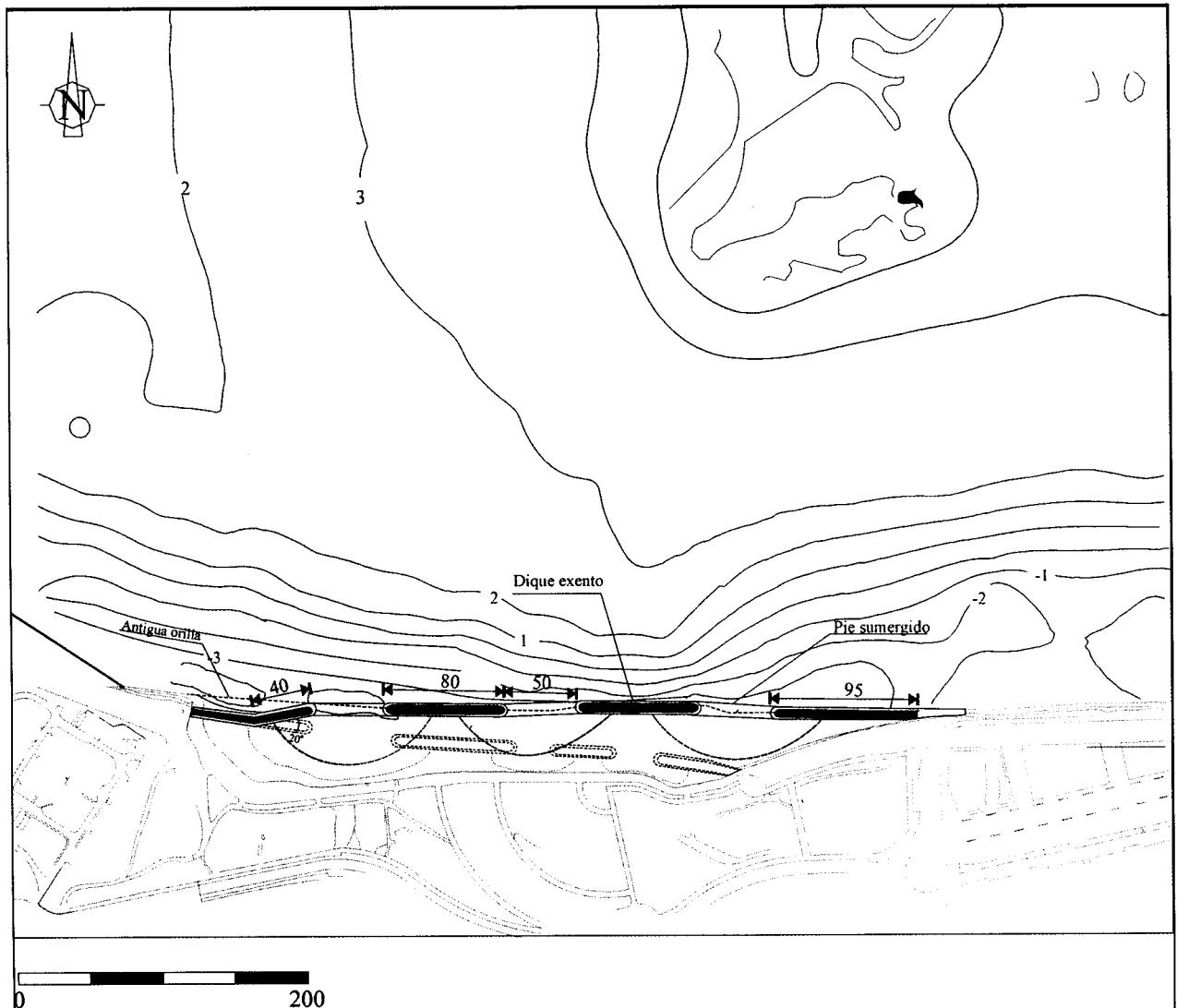


FIGURA 6. Obras propuestas de actuación en la desembocadura. Alternativa 1.

re actual, dos nuevos diques exentos unidos por un pie sumergido, un nuevo espigón de cierre, la retirada de las obras de defensa actuales con reutilización de la escollera y un relleno de 61.700 m³ arena para la creación de nueva superficie de playa.

La actuación propuesta supone la ampliación de la superficie actual de playa -de unos 5.000 m² de extensión- en unos 6.000 m² adicionales. El ancho medio de playa entre el paseo marítimo y las nuevas obras de defensa quedaría establecido en unos 40 m aproximadamente. Por su parte, la longitud total de playa aumentaría desde los 375 m actuales hasta los 500 m.

ALTERNATIVA 2 - RECUPERACIÓN DEL FRENTE MARÍTIMO

La actuación que se propone se centra en la zona situada aguas abajo del Caño de Cortadura, cuyos pinares y playas son muy utilizados por la población de Puerto Real durante

gran parte del año. Todo el tramo de pinar está actualmente protegido mediante un escollero longitudinal, a excepción de los últimos 75 m que lindan con la entrada al caño.

Esta margen del río ha sufrido un proceso erosivo en los últimos años, frenado por la construcción de la escollera longitudinal de defensa, aunque la misma ha provocado la eliminación de los restos de playa existentes en su frente.

La recuperación del frente marítimo en la margen izquierda del río sería propiciada por la retirada parcial de la escollera de protección. Esta retirada de la defensa iría seguida por nuevas erosiones en la margen, hasta que ésta alcanzara una nueva posición de equilibrio.

El tramo propuesto para la eliminación del frente de escollera es el indicado en la figura 7. Este tramo tiene una longitud aproximada de 210 m y se considera el más adecuado para la recuperación del frente fluvial ya que, una vez eliminados los viales que recorren el borde del río, existe anchura suficiente para permitir el retroceso de la

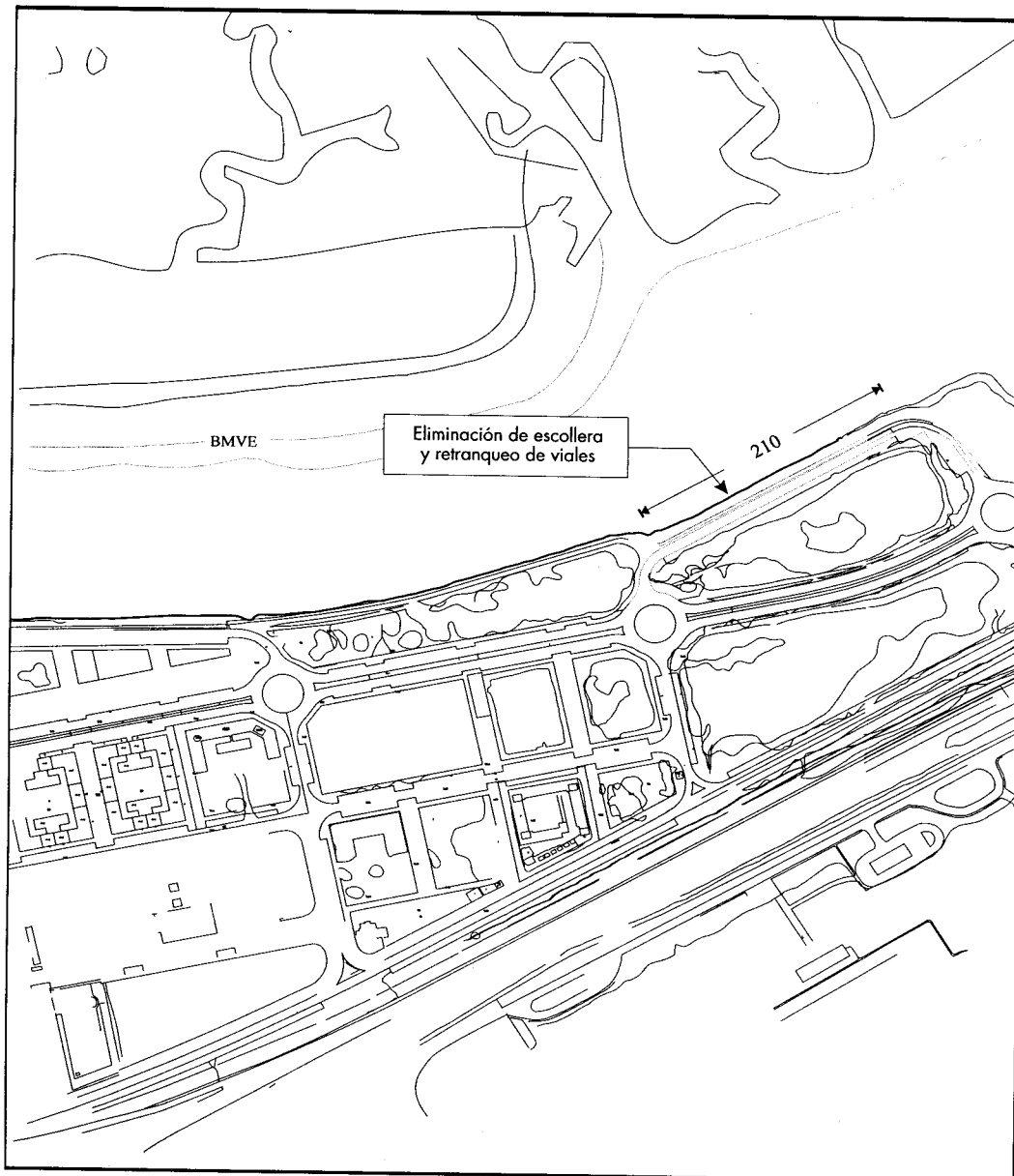


FIGURA 7. Alternativa 2 - Recuperación del frente marítimo.

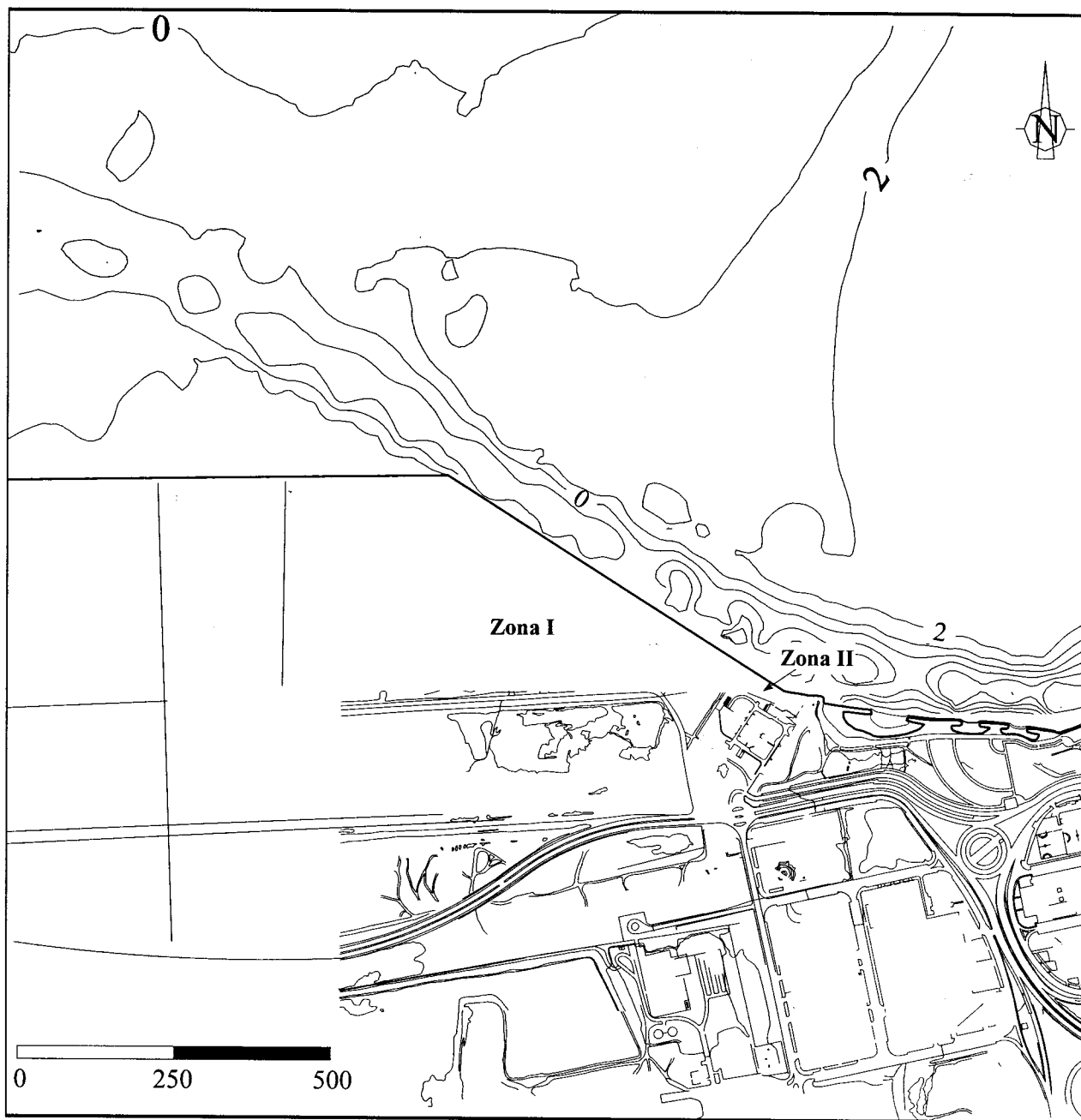


FIGURA 8. Alternativa 3 - Eliminación parcial del bajo de La Cabezuela.

margen izquierda, manteniendo con ello todavía estable una amplia zona de pinar hasta la carretera principal. Dado que a lo largo de este tramo discurre el colector que lleva las aguas residuales hasta la depuradora, sería necesario modificar su trazado para llevar a cabo esta alternativa.

La escollera que se mantiene aguas abajo de este tramo evitará un retroceso excesivo en el sector propuesto para la actuación. La esquina oeste del Caño de Cortadura está poco retranqueada con respecto al revestimiento de escollera, lo que indica que la presión de la corriente sobre esta zona no es excesiva, a pesar de que se hayan producido erosiones y daños en la escollera de protección.

ALTERNATIVA 3 - ELIMINACIÓN PARCIAL DEL BAJO DE LA CABEZUELA

La eliminación parcial de los rellenos de La Cabezuela en el entorno de la desembocadura sería una medida adecuada para permitir la recuperación ambiental de este tramo. La actuación supondría la desaparición de un buen tramo de escollera del frente litoral y, si la retirada de rellenos fuera lo suficientemente extensa, se podría incluso generar un frente de playa sin defensas artificiales adicionales.

La figura 8 define dos zonas diferentes del bajo en las que la retirada de los rellenos artificiales contribuiría a la recuperación del litoral. La Zona I esta situada sobre la antigua desembocadura del río, y su liberación permitiría recu-

perar parcialmente la salida natural antigua, aunque con las restricciones que más adelante se señalan para el conjunto de esta actuación.

La Zona II propuesta en la figura anterior está actualmente ocupada por la planta depuradora, de forma que su eliminación comportaría su traslado a otra zona, con las inversiones adicionales que ello supondría y el consecuente impacto medioambiental en otro lugar. Sin embargo, la proximidad de esta zona a las playas artificiales de la desembocadura permitiría realizar una amplia actuación de recuperación del entorno, incluyendo nuevas superficies de playa, paseo marítimo, áreas de nuevas plantaciones con vegetación autóctona, etc.

EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN

ALTERNATIVA 1

Los efectos sobre las corrientes de marea de las obras de defensa propuestas para las playas de la desembocadura se han estudiado mediante el modelo hidrodinámico Mike 21-HD, el cual señala que, durante la marea vaciante, se produce un incremento sustancial de las corrientes frente a las nuevas obras, debido a que éstas ocuparán buena parte de lo que es el eje principal de canal de salida del río. Así, las corrientes actuales máximas en la situación simulada, que son de un valor aproximado de 0.85 m/s, pasarán en la primera fase a tener un valor superior a 1.0 m/s. Durante la fase de marea llenante se produce el mismo efecto anterior de aumento de las corrientes, que se prolonga hasta una distancia lateral de unos 100 m aproximadamente del frente ocupado por las obras.

Este aumento de corrientes producirá una tendencia a la erosión del canal frente a la obra, con el consiguiente aumento de calados; esto provocará un paulatino descenso de las corrientes hasta valores similares a los actuales, con el nuevo flujo circulante concentrado en la cara exterior de las obras de defensa.

En la margen derecha se podrá producir una cierta erosión de la barra arenosa que penetra desde el exterior hasta la zona de las obras, tal y como se señala en la figura 8. La zona de posible erosión ha sido determinada a partir de las comparaciones entre las velocidades de corriente actuales y las velocidades en la situación con la alternativa construida.

El desvío del eje del canal hacia el frente de las nuevas obras puede producir también un cierto desvío del eje del cauce en el tramo situado al este de la zona de actuación, lugar donde el flujo principal actual no discurre pegado a la escollera. Las nuevas obras podrán hacer que el canal tienda a desviarse hacia la izquierda, lo que traería como consecuencia un avance de la margen derecha sobre la zona señalada en la figura 8.

La actuación propuesta permite garantizar la estabilidad de la playa ampliada a su resguardo. Así, el funcionamiento de estas estructuras es muy similar al actual, ya que se ha mantenido en el diseño las dimensiones de las primeras celdas.

Se ha estimado un coste total de Ejecución por Contrata de esta alternativa de 248,3 Mptas (IVA incluido).

ALTERNATIVA 2

La retirada de la escollera de la margen derecha tendrá como consecuencia la formación de una nueva ribera natural retranqueada. Teniendo en cuenta la posición actual de la salida del caño de Cortadura y la escollera de borde aguas abajo del tramo a recuperar, se puede evaluar que la formación de la nueva ribera natural se produciría a unos 15-20 metros de distancia del límite actual de la escollera.

ALTERNATIVA 3

Al analizar la evolución histórica de la desembocadura se han señalado tres factores como los determinantes en las transformaciones sufridas por el tramo final del cauce en las últimas décadas:

1. Construcción del bajo de La Cabezuela, que provocó alteraciones de dos tipos diferentes:
 - La debida a la invasión de la antigua salida y al encauzamiento artificial de su margen izquierda, lo que modificó las corrientes de entrada/salida del río
 - La debida a la interferencia del relleno con las corrientes generales de marea en la bahía, corrientes que a su vez condicionaban el desagüe del río y la estabilidad de su desembocadura.
2. Avance hacia el interior del río de la defensa de escollera de la margen izquierda, con el consiguiente desplazamiento de la erosión aguas arriba
3. Disminución del prisma de marea por rellenos en la marisma.

Ante el cúmulo de actuaciones, invasiones y transformaciones que esta zona natural ha sufrido en las últimas décadas, la eliminación parcial del borde interior del bajo supondría un avance limitado hacia lo que sería la recuperación de la desembocadura original, puesto que las demás perturbaciones seguirían actuando inalteradas. La eliminación de la Zona I propuesta permitiría que los bajos exteriores de la desembocadura adoptaran una configuración menos forzada por bordes artificiales y más natural, aunque dicha configuración es difícilmente predecible por el momento. Sin embargo, no es probable que se consiguiera disponer de forma natural de una zona arenosa permanentemente emergida en ese sector sin obras adicionales de estabilización.

La eliminación de la Zona II propuesta, aunque más costosa, sí que permitiría disponer de una amplia superficie para recuperar un espacio natural muy valioso, ya que se encuentra a profundidades naturales reducidas y cerca de un paseo marítimo y unas playas artificiales ya existentes. Además, la formación por el río en esa zona de bajos arenosos de forma natural permitiría disponer de nuevos tramos de playa adyacentes a las playas artificiales.

Para evitar que el relleno natural de las zonas de bajo levantadas se hiciera a costa de la playa de la margen derecha del río, sería probablemente necesario aportar sedimento para el relleno inicial de la zona liberada.

En definitiva, la liberación de estas zonas no acercaría a la desembocadura a su situación natural original, ya que la mayor parte de las actuaciones que la transformaron seguirían determinando en buena medida su configuración; por ello, esta medida no puede considerarse como una medida correctora del impacto ya causado. Sin embargo, la eliminación de la Zona I y, en especial, de la Zona II, supondría la oportunidad de adoptar medidas compensatorias para devolver parte de su aspecto natural a la desembocadura, con la generación de un espacio natural en la salida del río diferente al original, en la zona de mayor valor, y con posibilidades de servir de base a un proyecto de recuperación con playa, paseo marítimo y zonas de revegetación.

CONCLUSIONES

EVOLUCIÓN DEL RÍO Y CAUSAS

Las marismas del río San Pedro se han visto sometidas en las últimas décadas a intensas transformaciones, tales como la limitación del alcance de la marea a unos 1500 metros aguas arriba del puente de la carretera N-IV por la construcción de una presa de tierra, o la reducción del prisma de

marea derivado de la desecación de amplias zonas de marisma. Todas estas transformaciones tienden a disminuir los caudales de entrada y salida del río y, en consecuencia, han provocado la disminución de la sección de la desembocadura, que se ha visto lentamente invadida por los sedimentos de la playa de Levante. A su vez, el relleno de La Cabezueta (años 70) fijó en su día el último tramo de la margen izquierda del río, provocando cambios en la estructura y disposición de los bajos exteriores.

La construcción del bajo de La Cabezueta tuvo como consecuencia principal la rectificación del canal natural de salida del río, el cual se desplazó paulatinamente hacia el borde de escollera y provocó la aparición de intensas erosiones en la margen izquierda del río, aguas arriba del extremo final de la escollera. Estas erosiones han sido combatidas mediante una protección longitudinal de escollera, ampliada y reforzada sucesivamente; la propia protección ha intensificado el desplazamiento del canal hacia la margen izquierda, y ha trasladado la erosión aguas arriba, hasta las proximidades del Caño de Cortadura, a lo largo de una distancia aproximada de 1 km.

El proceso de desplazamiento del canal hacia la escollera no ha alcanzado todavía una situación de equilibrio, dado que continúan produciéndose erosiones al pie de la estructura de defensa y aguas arriba del Caño de Cortadura.

El descenso del caudal de salida y entrada del río ha provocado el repliegue de los bajos de la desembocadura hacia el interior, reduciendo la sección de canal y formando un gran bajo arenoso en la margen derecha del río. Este bajo arenoso cubre hoy en día una distancia aproximada de 700 m de margen. La antigua playa emergida de la margen derecha, cuya alineación rectilínea era interrumpida de forma abrupta al llegar al canal de salida, ha sido lentamente absorbida por el río, curvándose hacia su interior.

Además de los hechos mencionados anteriormente, el descenso del flujo circulante por el Caño de Cortadura durante las últimas décadas ha podido tener también su influencia en la deriva general del canal del río y en la erosión de sus márgenes.

PROPUESTA DE ACTUACIONES

Se han propuesto las siguientes alternativas de actuación en la zona de estudio para propiciar una mejora general de su estado actual.

- Alternativa 1: Creación de nueva superficie en el tramo de playa ya estabilizado en la desembocadura, construyendo dos nuevos diques exentos y un nuevo espigón, unidos por un pie sumergido, de forma que se recupere una línea de orilla próxima a la que existía la década pasada.
- Alternativa 2: Recuperación del frente marítimo en la margen izquierda del río mediante la retirada parcial de la escollera de protección en las inmediaciones del Caño de Cortadura.

- Alternativa 3: Eliminación parcial de los rellenos de La Cabezueta en el entorno de la desembocadura, como medida compensatoria para que permitiera la recuperación ambiental parcial de este tramo.

La construcción de la Alternativa 1 provocaría la profundización del canal frente a la obra. Así, en la margen derecha se podría producir una cierta erosión frente a la obra de la barra arenosa que penetra desde el exterior, mientras que en zonas adyacentes podría producirse un cierto avance de la margen derecha hacia el sur, en forma similar a lo que ha ocurrido en los últimos años en este tramo.

En la Alternativa 2, la retirada de la escollera de la margen derecha tendrá como consecuencia la formación de una nueva ribera natural, retranqueada una distancia aproximada de 15-20 metros desde el límite actual de la escollera.

La Alternativa 3 no acercaría a la desembocadura a su situación natural original, ya que la mayor parte de las actuaciones que la transformaron seguirían operando. No se trata, por tanto, de una medida correctora del impacto ya causado, sino de medidas compensatorias para devolver parte de su aspecto natural a la desembocadura, con la generación de un espacio en la salida del río diferente al original, pero con una mejora apreciable de sus valores medioambientales con respecto a la situación actual.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Costas, dependiente del Ministerio de Medio Ambiente, por las facilidades ofrecidas a la hora de utilizar los datos disponibles.

REFERENCIAS

- DEIGAARD, R. ; FREDSOE, J.; HEDEGAARD, I; 1986. "Suspended sediment in de surf zone" Jour. of Waterways, Port, Coast. and Ocean Eng., ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 115-128, 1986.
- GAVALA y LABORDE, J. , 1927 "Cádiz y su bahía en el transcurso de los tiempos geológicos" Bol. Inst. Geol. Min. Esp. N° 49.
- GUTIÉRREZ MAS, J.M.; MARTIN ALGARRA, A y NAVARRETE, A.; 1982. "Itinerarios Geológicos por la provincia de Cádiz" Serv. Public. Univ. de Cádiz.
- GUTIÉRREZ MAS, J.M.; MARTIN ALGARRA, A.; DOMINGUEZ, S. y MORAL, J.P.; 1991. "Introducción a la Geología de la Provincia de Cádiz". Serv. Public. Univ. de Cádiz.
- MUÑOZ PÉREZ, J.J.; DE LA CASA, A.; JOFRE, J.M. y PÉREZ FORTIS, M.J., 1999 "Procesos de Inundabilidad en la zona marismal de Los Toruños (Cádiz)" Tecno Ambiente n° 90, pages 35-38.
- MUÑOZ PÉREZ, J.J. y ENRIQUEZ J., 1998. "Dinámica litoral de una unidad fisiográfica completa : Sanlúcar - Rota". Rev. Obras Pub. n° 3375, abril, pages 35-44.
- OMICRON, S.A., 1997 "Estudio de Actuaciones en la Zona Marismal de los Toruños y Pinar de la Algaida". Informe Técnico de la D.G. de Costas..