

Metodología para el diseño hidráulico de la restauración ecológica de la marisma de la Algaida (Sanlúcar de Barrameda, Cádiz)

JUAN JOSÉ MUÑOZ PÉREZ (*), ANTONIO BORRERO VILLALÓN (**),
JAVIER GOLDARACENA MUÑOZ (***), JUAN BAUTISTA GALLEGO FERNÁNDEZ (****),
FRANCISCO GARCÍA NOVO (*****), y GREGORIO GÓMEZ PINA (*****)

RESUMEN Se ha llevado a cabo la restauración ecológica de 52 Has de la marisma mareal de la Algaida por parte de la Dirección General de Costas con la colaboración del Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla. Las marismas habían desaparecido debido al depósito de sedimentos limoso-arenosos procedentes del dragado del río Guadalquivir en los años 80. La restauración, que perseguía recuperar la biodiversidad de organismos y las funciones y procesos de un ecosistema mareal, precisaba de una herramienta matemática que modelase las características de régimen hidráulico del proceso de inundación, fijando los parámetros hidráulicos, las cotas de coronación de diques de rebase y muros perimetrales, etc. Se empleó un modelo matemático de la hidrodinámica del estuario y recinto interior en régimen transitorio. Una gran ventaja de este modelo es su posible uso futuro para estudiar otros problemas, como la evolución de la sedimentación o procesos de calidad de aguas. El modelo se pasó para distintas hipótesis de cota de coronación de los muros perimetrales y de los diques. La solución elegida fue la que cumplía que el flujo mareal era suficientemente grande y periódico como para garantizar los umbrales de caudal necesarios desde el punto de vista biológico y, por otra parte, que las velocidades de la corriente no eran tan grandes como para inducir erosiones importantes. Por último, y aunque fuera del objetivo de este artículo, cabe destacar que, de los datos obtenidos en el seguimiento de la restauración ecológica de la marisma, la diversidad tanto de la flora como de la fauna está aumentando muy rápidamente, acercándose a los valores estándar del resto de las marismas de la zona. El programa de seguimiento ha demostrado no sólo la fiabilidad del modelo sino que los primeros resultados indican además que la colonización animal y vegetal de la marisma restaurada está siendo muy rápida.

A METHODOLOGY FOR THE HYDRAULIC DESIGN OF A MARSH RESTORATION IN ALGAIDA (SPAIN)

ABSTRACT *The Spanish Coastal Directorate has carried out the ecological restoration of 52 hectares of salt marshes in the Algaida (Sanlúcar, Spain). These marshes had disappeared due to the muddy-sandy sediment deposit coming from the dredging of the Guadalquivir river in the 80's. The aim of the restoration was to recover the biodiversity and processes of a tidal ecosystem. Design needed a mathematical tool to model the characteristics of the hydraulic regime of the flood process, fixing the hydraulic parameters and the levels for overtopping perimetral dikes. For this purpose a transitory hydrodynamic mathematical model of the estuary has been used. Its great advantage is its future use to study other problems, like the evolution of the sedimentation rate or water quality changes. The model was used for different hypotheses of coronation level of the perimetral dikes and the overtopping inlets. The chosen solution fulfilled periodic and sufficient tidal water from the river to guarantee the necessary thresholds of flow the biological point of view and, on the other hand, limited the speeds of the current to avoid erosions. Finally, it is noteworthy to emphasize that data collected in the monitoring program has demonstrated the reliability of the mathematical model, reaching the ecological objectives. The biodiversity, as much of the flora as of the fauna, is increasing very quickly, approaching the standar values of the rest of the salt marshes of the zone.*

Palabras clave: Restauración de marismas, Flujo hidráulico, Modelo hidráulico, Evaluación de impacto ambiental.

(*) Ingeniero Jefe del Servicio de Proyectos y Obras. Demarcación de Costas de Andalucía-Atlántico.(M.M.A.)

(**) Jefe del Área de Agua y Medio Ambiente de AYESA.

(***) Jefe del Servicio de Modelística Hidráulica de AYESA

(****) Profesor Asociado del Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla

(*****), Catedrático de Ecología, Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla

(*****), Ingeniero Jefe de la Demarcación de Costas.- A.A.- Cádiz.

ANTECEDENTES

Las marismas mareales se presentan en zonas de costa protegidas de la acción directa del mar, como estuarios, albuferas, bahías, etc., variando entre marismas saladas y de agua dulce en función de sus características hidrológicas. Son ecosistemas donde la inundación periódica es la característica física dominante. Las marismas mareales son uno de los ecosistemas más productivos del mundo (Ranwell 1972), que mantienen una elevada biodiversidad y poseen numerosas e importantes funciones ambientales.

De acuerdo a las cifras de Casado y Montes (1995), los humedales costeros han visto reducida su superficie a menos de la mitad debido a actuaciones antrópicas.

Un ejemplo de regresión lo ofrecen las marismas del Río Guadalquivir que hasta mediados del siglo XX se extendían sobre unas 225.500 ha en ambos márgenes. Las modificaciones del cauce para facilitar la navegación mediante la realización de numerosas cortas en los brazos principales del río, acometidas a partir de 1875, y una amplia transformación de gran parte de la marisma para uso agrícola y ganadero, iniciada en los años 20 e incrementada en los 40 y 60, han sido los responsables de la práctica destrucción de estas marismas, mediante la construcción de diques y sistemas de drenaje que evitan la inundación, tanto por mareas como por cursos de agua tributarios (Del Moral Ituarte 1991, González Arteaga 1993). Actualmente, si bien el efecto de la marea penetra por el curso del Guadalquivir 108 km río arriba, hasta la presa de Alcalá del Río, el flujo mareal sobre la marisma se limita a una estrecha franja paralela al cauce principal en los últimos 25 Km próximos a su desembocadura.

Por otra parte, la utilización del Puerto de Sevilla precisa de una canal en el cauce del río Guadalquivir que, en estos momentos, presenta un calado de seis metros con bajamar escorada (su aumento a ocho metros está ya proyectado). El mantenimiento de esa canal implica la retirada de importantes volúmenes de sedimento areno-limoso con cierta periodicidad. Como ejemplo baste señalar los dragados efectuados en las últimas campañas: 1.190.000 m³ en 1994 (CEDEX, 1994) y 1.225.000 m³ en 1999-2000 (Nereilab, 1999). El conseguir una disminución del coste del transporte ha hecho que, durante la década de los 80, se depositará dicho sedimento sobre las orillas, destruyendo parcialmente la marisma mareal de la margen izquierda del estuario. El espesor de sedimento variaba entre 0,5 y 5 m. El humedal fue eliminado desarrollándose un pastizal pobre en especies y pequeños bosquetes de taraje (*Tamarix canariensis*).

Tras la creación de la Secretaría de estado y posteriormente, el Ministerio de Medio Ambiente, el cambio de sensibilidad detectado en la sociedad llegó a la Administración del estado. Fruto de esta nueva perspectiva fueron diferentes proyectos y actuaciones (estudiadas en unos casos y llevadas a cabo en otros) en la provincia de Cádiz (De la Casa et al, 2001 y Muñoz Pérez et al., 1999, 2000 y 2002).

La Demarcación de Costas de Andalucía-Atlántico y el Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla, tras la realización de estudios previos por la empresa Progemisa, redactaron un primer proyecto de restauración (MOPTMA, 1994) que contemplaba la recuperación de 600 Ha de marisma. Diferencias surgidas por la no aprobación en aquel momento del nuevo deslinde del Dominio Público Marítimo Terrestre, impidieron la ejecución de dicho proyecto y propiciaron la redacción de uno nuevo, menos ambicioso, que cubría únicamente una anchura de 250 metros (MIMAM, 1998). El área restaurada se restringe ahora a 52 Ha a lo largo de 2 km de orilla (Figura 1).

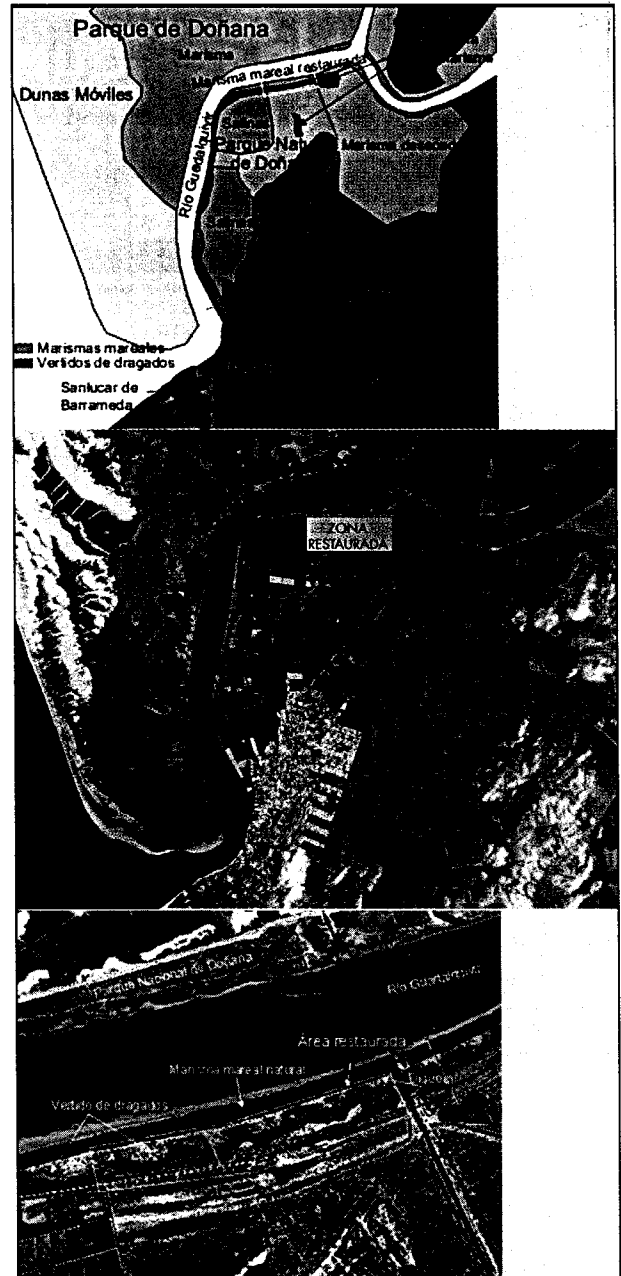


FIGURA 1. Foto aérea de la desembocadura del río Guadalquivir con esquema explicativo y acercamiento a la zona de trabajo.

DESCRIPCIÓN DE LA ACTUACIÓN

El objetivo de la actuación ha sido el de restablecer el ecosistema existente antes de los vertidos de sedimento. Además, se buscó la máxima biodiversidad mediante la implantación de gran variedad de hábitats (Gallego Fernández y García Novo 2002a,b).

Tras la excavación de algo menos de 600.000 m³ de terreno, que se utilizaron en su mayor parte para la mejora del suelo de parcelas de una cooperativa agrícola cercana, se dividió la superficie en dos zonas (Figura 2).

En la norte se han excavado hasta 2060 m de canales con profundidades diversas para crear hábitats apropiados para el mayor número de especies. Para el establecimiento de comuni-

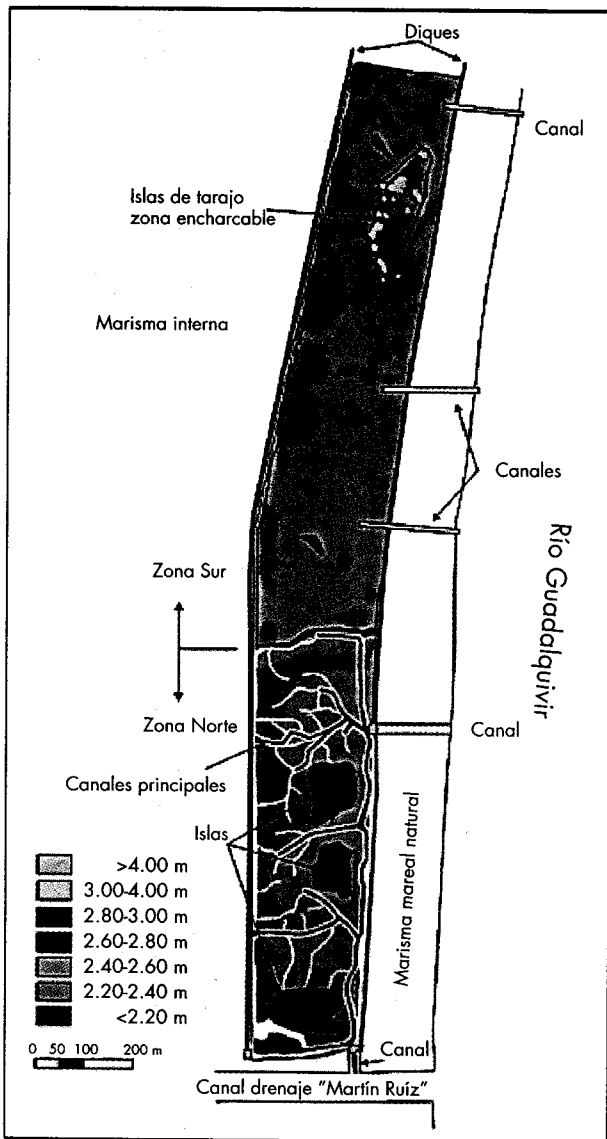


FIGURA 2. Esquema del área a recuperar donde se distinguen dos zonas, la norte con excavación antrópica de corrales y azudes que regulen la entrada de agua, y la sur donde se persigue que el flujo y reflujo mareal excave la red de drenaje de manera natural.

dades acuáticas permanentes, las canales debían gozar de una lámina de agua en todo momento. La comunicación con el estuario se realizó mediante la construcción de dos canales en los que fue precisa la construcción de dos azudes de escollera, cuya cota vendría fijada por el número de veces que deseábamos que el flujo de marea inundara la marisma restaurada.

Por el contrario, el criterio en la zona sur fue el de excavar únicamente tres canales de comunicación con el río de una anchura muy inferior a los de la zona norte (3 metros frente a 11 m) y sin ramificaciones. Todo ello buscando que sea la propia Naturaleza la que excave la red de drenaje. Las investigaciones a medio y largo plazo permitirán contrastar el éxito de la actuación más dirigida (la zona norte) frente a una más natural (la zona sur) y tomando como referencia la marisma natural de la otra orilla (el Parque Nacional de Doñana). Una vista aérea del aspecto de la zona antes y después de la recuperación puede observarse en la figura 3.

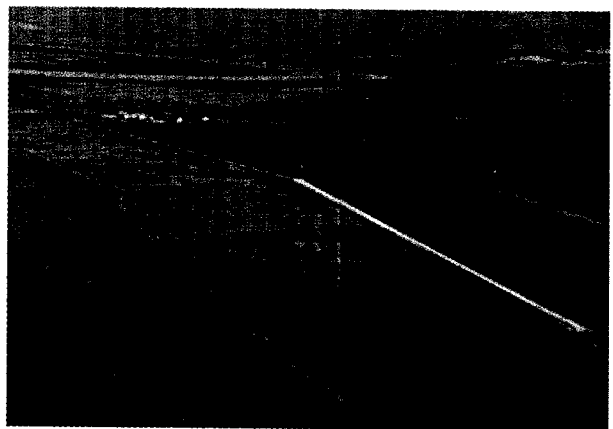


FIGURA 3. La Algaída (antes y después).

NECESIDAD DEL MODELO Y DESCRIPCIÓN DEL MISMO

Dada la sensibilidad de la actuación a los niveles mareales, así como a la propagación de la marea en el interior del recinto de marisma, fue necesario realizar este diseño hidráulico mediante la aplicación de modelos numéricos de gran precisión que permitan refrendar el diseño ecológico propuesto.

A tal efecto se solicitó de AYESA que desarrollara un modelo en régimen transitorio tridimensional de esta marisma, acoplado como condiciones de contorno las correspondientes a la marea en el estuario del Guadalquivir.

Las marismas en regeneración se han compartimentado en dos áreas de 32 Ha. y 20 Ha. La primera de ellas va a tener una actuación poco intensa de control hidráulico, dejándose evolucionar de forma menos intervenida, no siendo objeto de modelización. El segundo compartimento es el que se aborda mediante el modelo numérico.

Esta última zona va a constar de dos entradas artificialmente canalizadas desde el estuario, controladas por sendos diques de escollera (golas) fig 4. El objetivo es que estos canales naturalizados permanezcan permanentemente con una lámina de agua de unos 90 cm., y que la marea penetre en ellos, superando las obras de control o golas, y produciendo los deseables efectos de renovación de agua.

Por otra parte perimetralmente a esta marisma se va a contar con el antiguo dique de tierras, que deberá ser rebasable únicamente por las mareas más vivas. Para favorecer el llenado de esta marisma ante tales mareas, tanto en frecuencia como en volumen, se propone rebajar en cota ciertos tramos del dique.

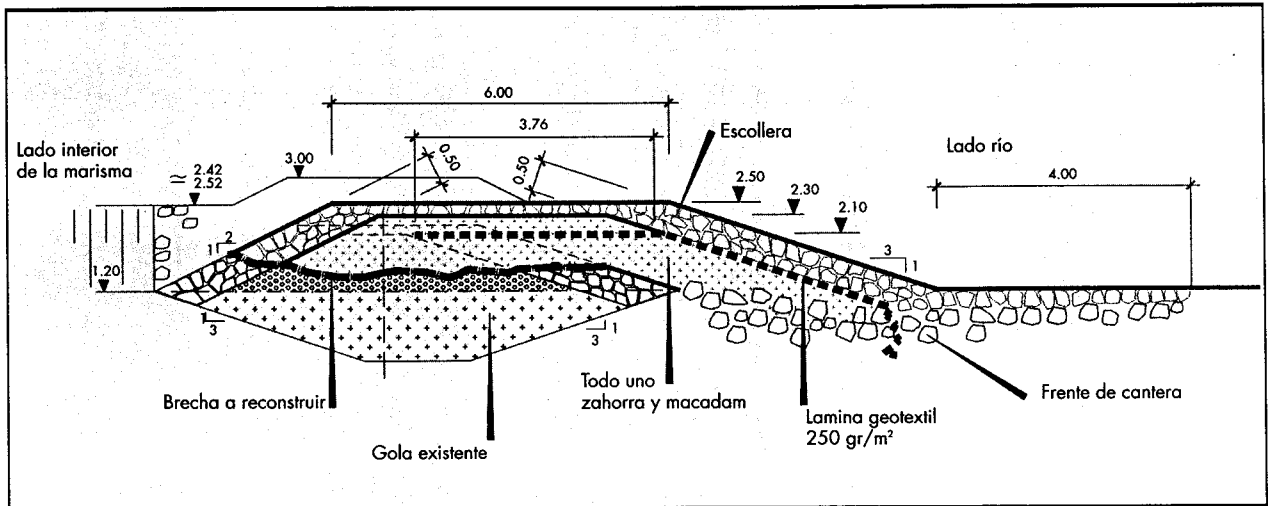


FIGURA 4. Sección tipo de refuerzo de golas con indicación de dimensiones y tipo de materiales utilizados.

Con este funcionamiento se realizó la verificación del diseño bajo dos puntos de vista distintos:

1. Análisis de la frecuencia de superación de niveles mareales sobre las cotas de golas, dique rebajado y dique sin rebajar: Las golas tienen una función de retención de las aguas y a su vez deben permitir con frecuencia la entrada de caudales de agua mareal para la renovación y aporte de nutrientes al interior de la marisma. La cota de implantación de dicha gola debe ser decidida en base a la frecuencia de superación o inversamente por la frecuencia de no renovación de agua en mareas muertas.

De igual forma las cotas del muro y su rebaje deben ser establecidas en base a la frecuencia de superación por las mareas vivas.

2. Análisis del funcionamiento hidráulico del sistema frente a mareas extremas: mediante esta simulación y analizando diferentes variables se pueden predecir los niveles que se alcanzan en el interior de la marisma, su evolución y el retraso en el tiempo frente a los niveles del río, velocidades y caudales máximos, láminas de vertido extremas, etc.

Todo ello calculado con diferentes longitudes y cotas de los muros, permitió disponer de datos para la elección del diseño ecológico más idóneo, a la vez que dimensionar el diámetro de escollera de la gola o evaluar el efecto erosivo sobre los diques.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO UTILIZADO

El modelo utilizado en la simulación de la Marisma de la Algaída es el sistema integrado de modelos de flujo y transporte DELFT3D de DELFT HYDRAULICS (1999).

Delft3D es un sistema de modelos flexible, integrado, capaz de simular:

1. Flujos debidos a mareas, vientos, gradientes de densidad y olas.
2. Propagación direccional de ondas sobre batimetrías irregulares.
3. Advección y dispersión de efluentes.
4. Fenómenos de calidad de agua con hasta 140 contaminantes estándar y más de 50 procesos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bajo el primer prisma de diseño y también con el fin de determinar las condiciones de contorno del modelo se ha procedido a calcular la propagación de la marea en las proximidades de la marisma sobre la que se actúa. Para ello se contó con recientes estudios realizados para la Autoridad Portuaria de Sevilla (Ayesa 2000), para la determinación de las bajamares escoradas a lo largo de la ría.

Dos de los puntos en los que se realizó una campaña de campo con emplazamiento de mareógrafos están próximos a la zona de actuación. Concretamente hacia el sur está la Punta de los Cepillos y hacia el Norte la estación de El Yeso (Fig 5). Los resultados de ambos mareógrafos son muy similares en cuanto a los niveles de marea y solo presentan diferencias respecto al retraso en la propagación de la marea.

Constituyente	Frecuencia (c.p.h)	Amplitud (cm)	Fase (°)
Q1	0.03721850	1.2	303.6
O1	0.03873065	6.2	334.7
P1	0.04155259	2.9	77.1
K1	0.04178075	6.7	76.1
N2	0.07899925	13.3	50.8
M2	0.08051140	81.4	79.0
S2	0.08333334	24.7	104.4
K2	0.08356149	7.0	101.7
MN4	0.15951060	1.8	98.2
M4	0.16102280	4.1	125.7
MS4	0.16384470	2.5	154.0
M6	0.24153420	2.3	317.4
2MS6	0.24435610	2.6	355.1

TABLA 1. Amplitud y fase de las distintas constituyentes armónicas de la onda de marea en el tramo de estudio.

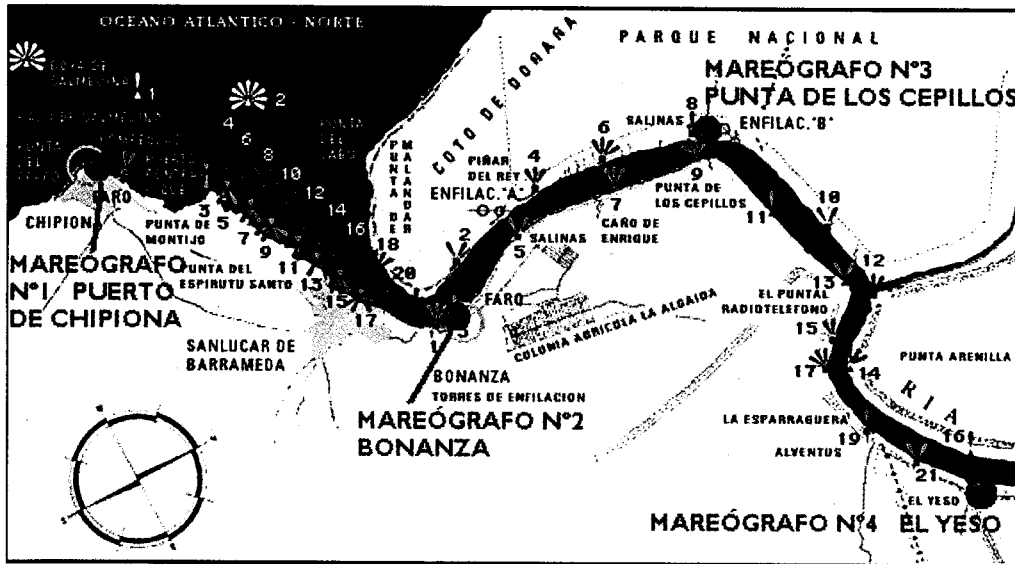


FIGURA 5. Ubicación de los mareógrafos fondeados durante la determinación de las bajamares escoradas a lo largo de la ría.

De este estudio se han inferido las constantes armónicas con amplitudes significativas usadas para simular la marea en el río como condición de contorno del modelo (tabla 1).

Con estas constantes se obtienen en este punto los siguientes valores significativos con respecto al N.M.M.A. (Nivel Medio del Mar en Alicante).

Nivel medio = + 0,38 .

Pleamar viva equinoccial = 1,97 m.

Bajamar Viva equinoccial = - 1,21 .

De acuerdo con estos datos se ha procedido a realizar un análisis de la marea durante un año completo. En concreto se obtuvieron las mareas del año 2000.

Para la actuación de recuperación de la marisma el efecto determinante es la altura que se alcanza en pleamar. En la figura número 6 se presenta la evolución a lo largo del año

de las pleamares en el río. En dicho gráfico también se representan las alturas del labio de las golas, la coronación del muro y los rebajes efectuados en él para aumentar la tasa de renovación del agua de la solución propuesta.

De acuerdo con estos valores se observa que la marea rebasará la coronación del muro en 7 periodos del año de mareas vivas (3 ó 4 veces por período). El período más largo sin que se rebase el muro será de unos 3 meses y medio mientras que, durante el verano, este hecho sucederá aproximadamente cada 15 días.

Los rebajes del muro son superados en cada período de mareas vivas, no transcurriendo más de 10 días sin que la marea alcance este nivel.

Por último vemos que son contados los días que la marea no alcanza el nivel de entrada de las golas y no transcurre más de una marea sin que se vuelva a producir nivel en el río que introduzca agua en el recinto (sí bien poco volumen).

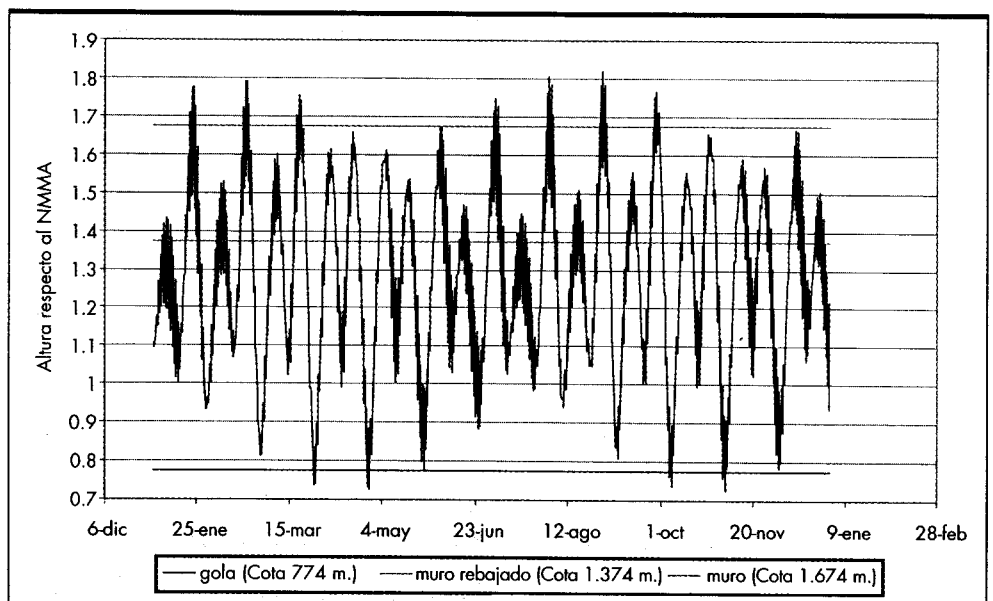


FIGURA 6. Evolución de la marea (valor de las pleamares) a lo largo de todo el año 2000.

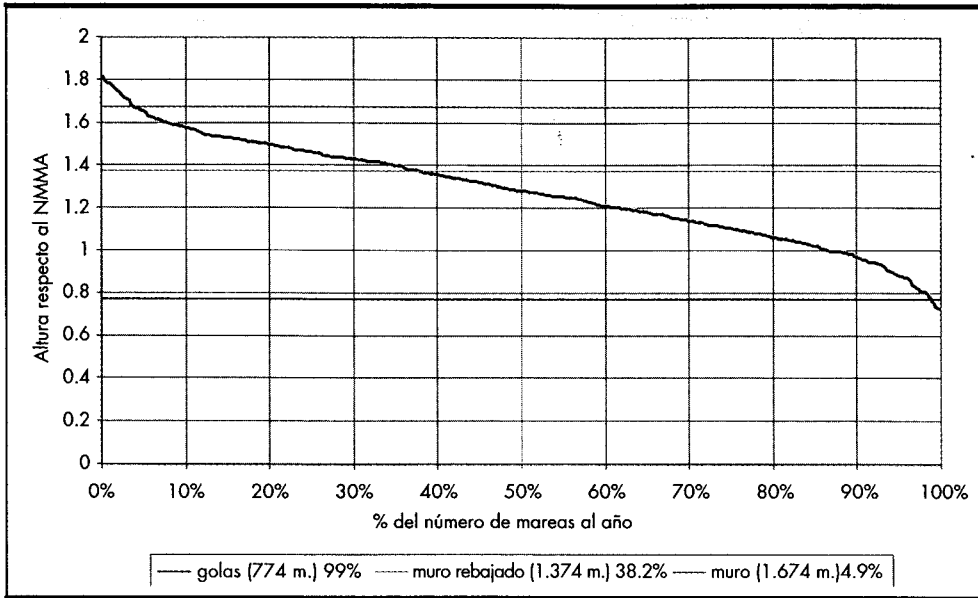


FIGURA 7. Representación estadística de la frecuencia con que una pleamar cualquiera rebasa una determinada cota.

Hay que hacer notar que la marea que se simula es la debida únicamente a los componentes astronómicos. No están consideradas las variaciones de nivel debidas a distintos efectos como la presión atmosférica, avenidas en el Río o el viento. Estos fenómenos pueden afectar en distinta medida a los niveles en el río si bien no es previsible que los dos primeros afecten aumentando niveles del río en verano.

La figura 7 representa una ordenación de las mareas anuales de forma que se pueda cuantificar el número de mareas en que el agua supera un nivel determinado de las 708 mareas que se producen en el año.

Así se comprueba para el diseño propuesto que el agua supera el muro perimetral en 27 mareas (4,9% del total). Los rebajes del muro se superan en 270 mareas, 10 veces más frecuentemente, lo que representa un 38,2% del número de mareas. Por último la entrada de las golas se alcanza en el 99% de los casos (699 mareas) no siendo superada únicamente en 8 mareas a lo largo del año.

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE MAREAS EXTREMAS

Para este análisis se procedió a simular en detalle la entrada y salida de agua en la marisma intervenida con la marea máxima del año 2000 que se correspondió con el día 30 de Agosto. La puesta en funcionamiento definitiva de la obra se realizó el 9 de Noviembre de ese mismo año.

Para el análisis de funcionamiento se han simulado diferentes hipótesis de diseño comparándolas con la finalmente adoptada. Todas las cotas mencionadas en el estudio están referidas al nivel medio del mar en Alicante (N.M.M.A.), o cero geográfico nacional. Las características del diseño adoptado se especifican en la tabla 2:

Sobre este diseño se ha simulado el proceso de llenado y vaciado de la marea.

El funcionamiento hidráulico de desbordamiento sobre las golas y diques, se ha modelizado como vertedero de cresta ancha (Ven te Chow, 1959). Para acotar los errores inherentes al cálculo, se ha realizado un análisis de sensibilidad frente a diferentes coeficientes de vertidos. El resultado de caudales y velocidades extremos en este ciclo de marea sobre la gola es el siguiente:

Características del diseño adoptado

- COTA DE GOLA = 0,774 m.
- LONGITUD DE GOLA = 2 uds. x 11.40 m.
- COTA MURO = 1,674 m.
- LONGITUD MURO = 762,6 m.
- COTA MURO REBAJADO = 1.374
- LONGITUD MURO REBAJADO = 4 uds. X 20 m.

C _r	Q _{máx} (m ³ /s)	V _{máx} (m/s)
2.0	16.44	1.42
1.5	14.07	1.07
1.2	12.68	0.93

TABLA 2. Características del diseño adoptado y resultado de caudales y velocidades máximas sobre la gola con la marea máxima.

El primer coeficiente de vertido (2.0) es sumamente elevado, un coeficiente de vertido de 1.5 sería el que de forma lógica se debería de adoptar, y 1.2 es sumamente conservador. Como vemos los resultados obtenidos no son muy discrepantes por lo que se adoptó el coeficiente de vertido de 1.5.

En la figura 8 se recoge la evolución del nivel en el estuario (marea fuera del recinto) y en el interior de la marisma. Como puede observarse en las mareas que se rebasa el muro se igualan los niveles con un retraso muy pequeño, en el caso de mareas que solo alcancen el rebaje no se llegan a igualar los niveles.

La figura 9 refleja una ventana del anterior poniendo de manifiesto el tiempo de vaciado de la marisma, de forma relajada respecto a la marea.

La figura 10 muestra los caudales de entrada y salida por golas, muro rebajado y muro. El caudal punta en gola se

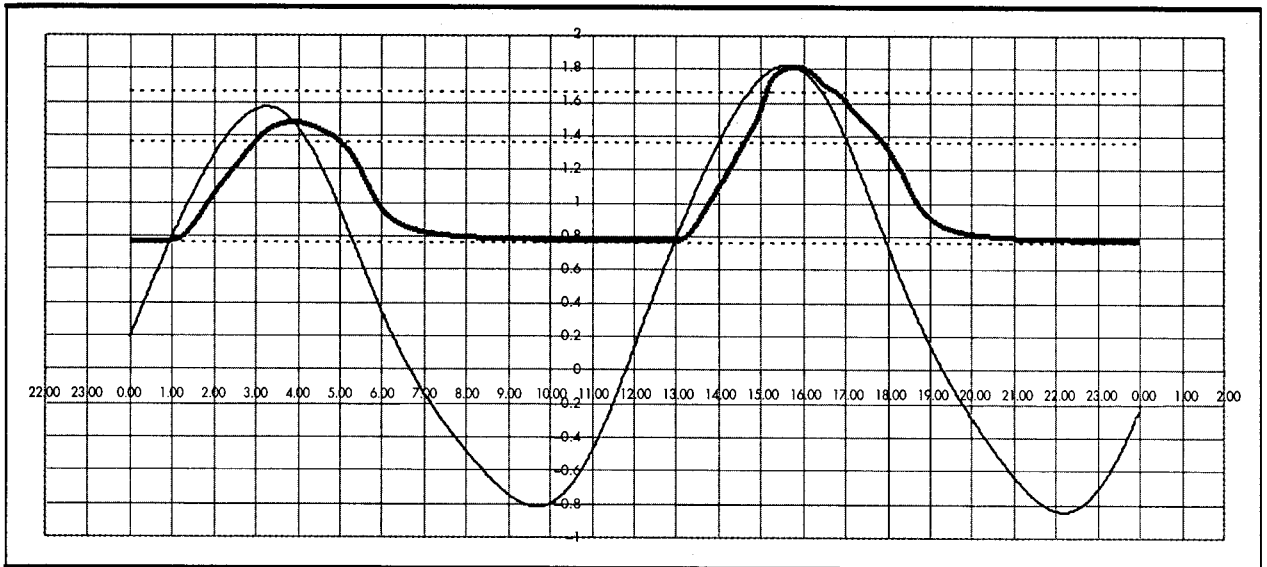


FIGURA 8. Evolución del nivel de la lámina de agua dentro y fuera del recinto.

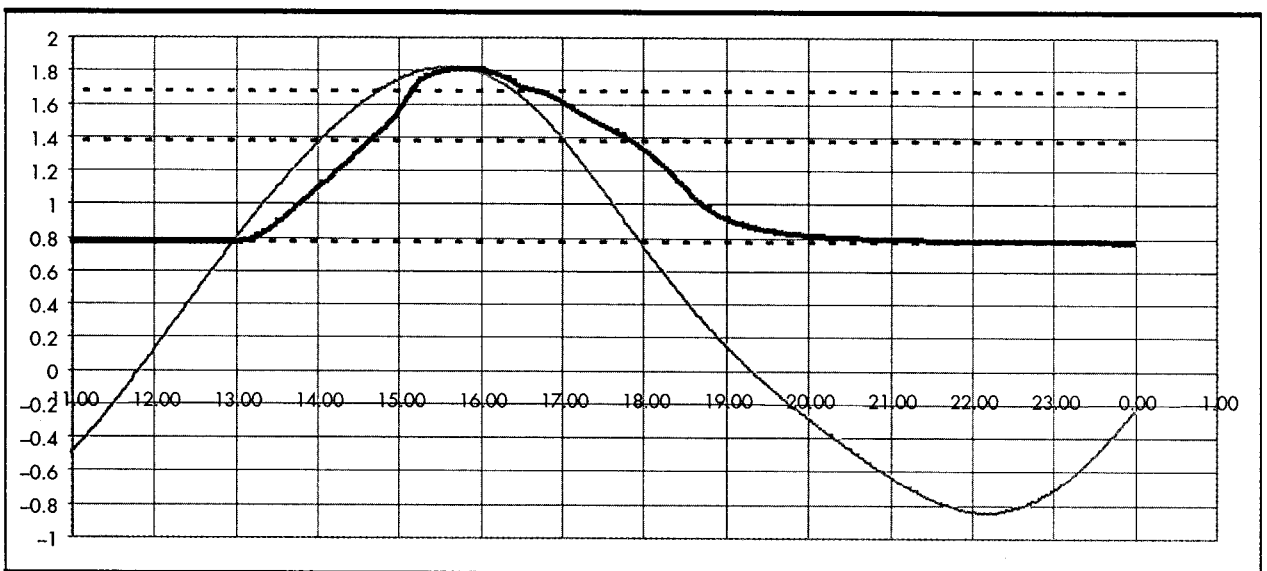


FIGURA 9. Se aprecia como el tiempo de vaciado del recinto es muy superior al de la propia onda de marea.

produce en la vaciante, como es previsible. En el caso del dique el caudal punta se produce en el llenado.

La figura 11 representa las velocidades del agua sobre las golgas y muros. Como puede observarse la velocidad máxima en golgas es de 1,13 m/s. En los diques la velocidad es de 0,71 m. en los rebajes y de 0,34 m. en el muro. Sobre los primeros será conveniente disponer de algún elemento antierosivo, dada la frecuencia y velocidad del paso del agua.

Con el fin de poder analizar la sensibilidad del diseño a diferentes cambios estructurales y poder decidir con criterio sobre cual es la mejor solución, se realizaron distintas simulaciones con variaciones en las dimensiones de los elementos de control.

SEGUIMIENTO DE LA RESTAURACIÓN

Un último objetivo específico del proceso de restauración consiste en llevar a cabo investigaciones a largo plazo para evaluar y documentar los valores estructurales y funcionales de la marisma mareal restaurada y comparar los resultados con marismas naturales de referencia. Para ello se ha establecido un programa de seguimiento por parte del Departamento de Ecología de la Universidad de Sevilla, parte del cual comenzó desde el mismo instante en que se integró la zona restaurada en el flujo de mareas del estuario. Este programa contempla:

1. Seguimiento y control de la infraestructura construida, canales, diques, y sistema de regulación del flujo de

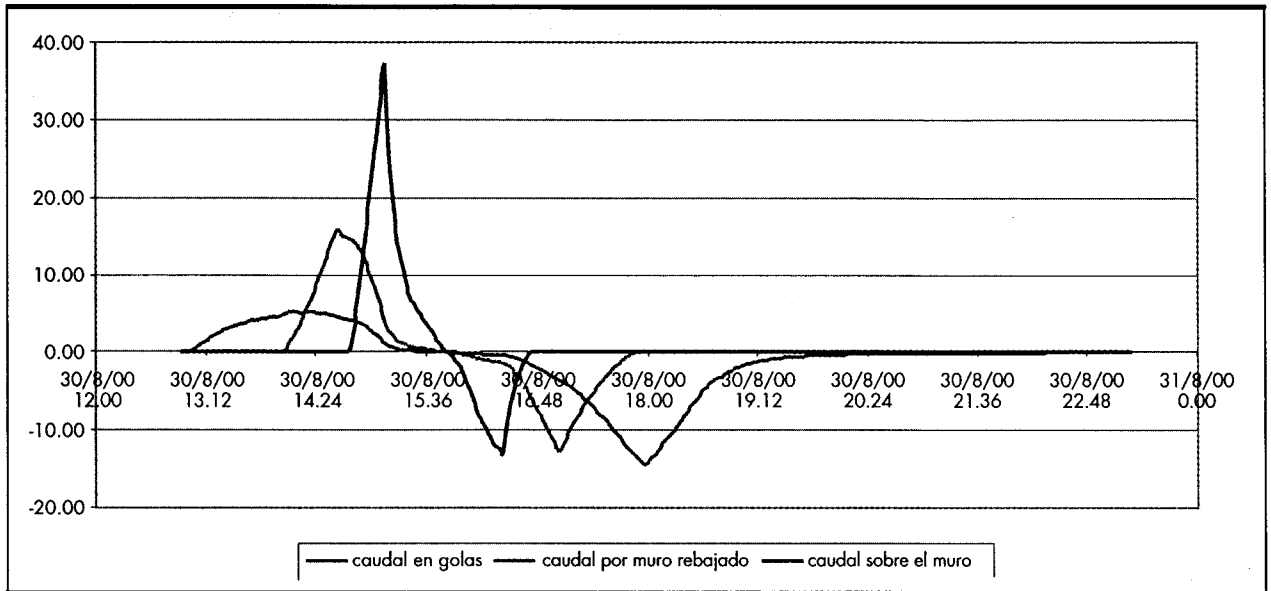


FIGURA 10. Caudales de entrada y salida por golas, muro rebajado y muro sin rebajar.

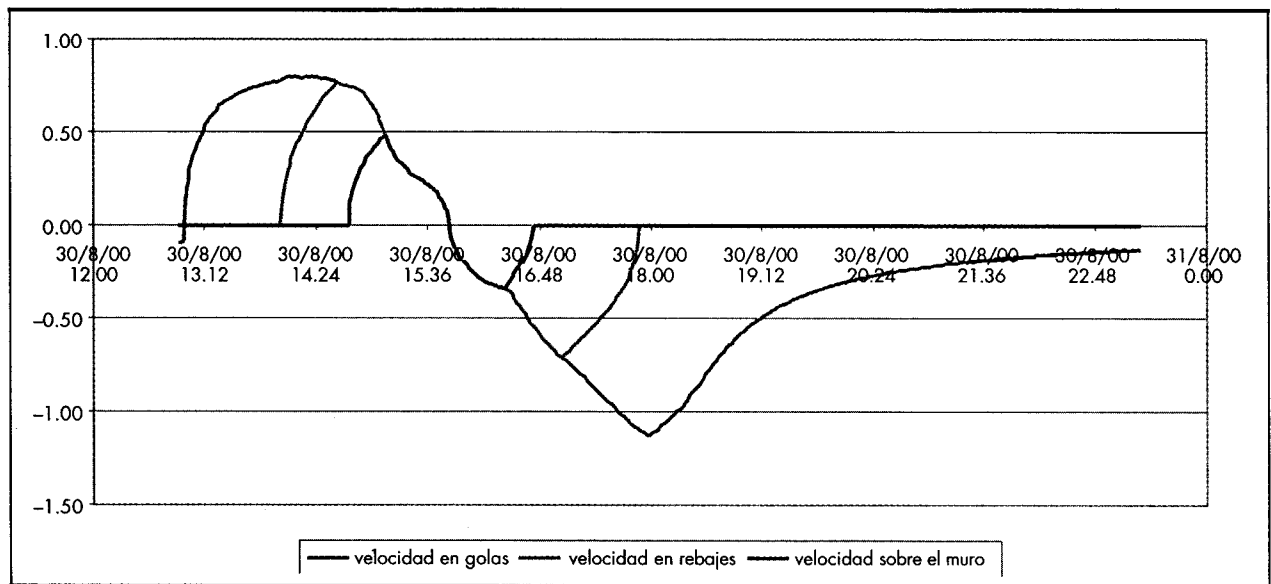


FIGURA 11. Velocidades del agua en entrada y salida sobre golas y muros.

- marea en la zona Norte, y seguimiento de las tasas de sedimentación que se produzcan en el interior de la marisma restaurada;
- 2. seguimiento de frecuencias de inundación, caudales, velocidad de la corriente, con objeto de elaborar un modelo numérico de flujo de marea en la marisma restaurada;
- 3. seguimiento de parámetros físicos, químicos y biológicos del agua en las zonas de aguas libres (canales) y áreas inundables, comparándolo con las características del agua procedente de las mareas;

- 4. seguimiento de la colonización y sucesión vegetal en los diferentes hábitats (producción primaria, riqueza y diversidad de especies); y
- 5. Verificación de la utilización por la fauna de los diferentes hábitats.

RESULTADOS ECOLÓGICOS DE LA RESTAURACIÓN

Desde el verano del año 2001 en que se puso en funcionamiento el sistema de regulación hídrica de la marisma, la estabilidad de diques y canales ha sido absoluta incluso ante episodios de grandes avenidas del río Guadalquivir. La me-

dición de corrientes del flujo mareal se ha ajustado sensiblemente al modelo numérico desarrollado.

La recuperación de la marisma, tanto de flora como de fauna, se está llevando a cabo con gran rapidez. Basta indicar que, en el seguimiento a base de censos mensuales de aves y peces, se ha detectado un incremento tanto del número de especies como de individuos. Se han registrado hasta el momento 84 especies de aves de un total potencial de 200 y 20 especies de peces (Gallego Fernández et al., en prensa). Para una información más actualizada puede acudir a la página web (www.us.es/bioeco) que tiene abierta el Departamento de Biología Vegetal y Ecología de la Universidad de Sevilla.

CONCLUSIONES

Tras el dragado de mantenimiento de la canal del Puerto de Sevilla en el río Guadalquivir y posterior depósito en la margen izquierda, se perdió gran parte de la superficie de marismas mareales existentes en el estuario.

La retirada de 600.000 m³ de ese sedimento, y su aprovechamiento posterior para mejorar la textura de parcelas agrícolas cercanas, ha permitido la recuperación hídrica de 52 Has en una franja de 2.000 m de longitud. Para potenciar una mayor diversidad biológica se ha procurado la existencia de distintos hábitats. Para ello se han dragado canales con ramificaciones a distintas cotas respecto al mismo plano de referencia. Asimismo, se han colocado golas o diques a base de escollera que permitan una inundación mínima permanente de determinadas zonas.

Al tratarse de una actuación experimental, parte de la zona recuperada se ha dejado sin tratar para que la red de drenaje se excave de manera natural y poder comprobar a largo plazo la efectividad de ambos procedimientos.

Se ha desarrollado un modelo hidráulico particular de corrientes y flujo mareal basado en uno más general del laboratorio de Delft. Dicho modelo ha servido para ayudar al diseño hidráulico de la red de canales (ancho y cota de solera).

El modelo se pasó para distintas hipótesis de cota de coronación de los muros perimetrales y de los diques. La solución elegida fue la que cumplía que el flujo mareal era suficiente, grande y periódico como para garantizar los umbrales de caudal necesarios desde el punto de vista biológico y, por otra parte, las velocidades de la corriente no eran tan grandes como para inducir erosiones importantes.

Por último, y aunque fuera del objetivo de este artículo, cabe destacar que, de los datos obtenidos en el seguimiento de la restauración ecológica de la marisma, la diversidad tanto de la flora como de la fauna está creciendo muy rápidamente, acercándose a los valores estándar del resto de las marismas de la zona.

Medidas posteriores de velocidad de corrientes tomadas durante la puesta en funcionamiento de la obra dan fe de la bondad del modelo matemático.

REFERENCIAS

AYESA 2000. Asistencia técnica para la determinación de las bajamares escoradas a lo largo de la Ría del Guadalquivir en su tramo navegable. (Autoridad Portuaria de Sevilla).

Broome, S.W. & Craft, C.B. 2000. Tidal salt marsh restoration, creation, and mitigation. In: *Agronomy Monograph* n°41. Reclamation of drastically disturbed lands. Pp. 939-959. Madison.

Casado, S. y Montes, C. 1995. Guía de los lagos y humedales de España. Ed. J.M. Reyero, Madrid.

CEDEX, 1994. Caracterización de sedimentos y estudio de la influencia del dragado del río Guadalquivir sobre la dinámica litoral y la biosfera marina. Puertos del Estado, 56 págs más anejos.

De la Casa, A.; Fages, L. y J.J. Muñoz Pérez, 2001. Recuperación de marismas: distintas experiencias en el litoral gaditano. VI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. En prensa

DELFT HYDRAULICS 1999 Delft-3D (Release 3.10) Simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimension (manual). WL-Delft Hydraulics, Delft.

Gallego Fernández, J.B. y García Novo, F. 2002a. Restauración ecológica de Marismas de régimen mareal en el estuario del Guadalquivir. Parque Natural de Doñana. Ecosistemas Año XI, N° 1.

Gallego Fernández, J.B. & García Novo, F. 2002b. Restoration of tidal marshes in Guadalquivir river stuary, SW Spain. En: G.C. Zalidis, T.L. Crisman & P.A. Gerakis (eds.). *Restoration of Mediterranean wetlands*. Hellenic Ministry of the Environment, Physical Planning and Public Works, Athens and Greek Biotope/Wetland Centre, Thermi, Greece. 237 pp.

Gallego Fernández, J.B., García Novo, F., Vela de Pablos, I. y Muñoz Pérez, J.J. Dos años de seguimiento de la restauración ecológica de las Marismas de la Algaída en el Estuario del Río Guadalquivir. Monografías del CEDEX. En prensa

González Arteaga, J. 1993. Las marismas del Guadalquivir: etapas de su aprovechamiento económico. Editor Antonio Cuevas. Puebla del Río, Sevilla.

MIMAM, 1998. Recuperación de las Marismas de la Algaída.- Fase I. Proyecto realizado por TRAGSA para el Ministerio de Medio Ambiente.

MOPTMA, 1994. Recuperación de las Marismas de la Algaída. Asistencia Técnica para el Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente. Madrid.

Moral Ituarte, L. 1991. La obra hidráulica en la cuenca baja del Guadalquivir (siglos XVIII-XX). Gestión del agua y organización del territorio. Junta de Andalucía y Universidad de Sevilla.

Muñoz Pérez, J.J.; de la Casa, A.; Lorán, G. y Ávila, M.A., 1999. La regeneración de las marismas del río Arillo. OP n° 47, págs 80-91.

Muñoz Pérez, J.J.; de la Casa, A.; Gómez Pina, G. y A. Acha, 2000. Environmental restoration of the Guadiaro river estuary (Cadiz, Spain). *Periodicum Biologorum*, vol 102, supplement 1, pp: 333-338.

Muñoz Pérez, J.J.; Fages, L.; Asensio, B. y N. Caramé, 2002. Regeneration of salt marshes in Barbate (SW, Spain): a project. *Littoral 2002*, 6th Int. Symp. Vol III, pp: 173-176.

Nereilab, 1999. Caracterización de sedimentos de la ría del Guadalquivir y evaluación del efecto de su dragado y vertido. Autoridad Portuaria de Sevilla, 60 págs más anejos

Ranwell, D. S. 1972. Ecology of salt marshes and sand dunes. Chapman and Hall, London.

Tutin, M.G.; Heywood, U.H.; Burgues, N.A.; Moore, D.M.; Valentine, D.H.; Walters, S.M. & Weeb, D.A. 1993. Flora Europaea. Cambridge University Press.

Ven Te Chow. 1959. Open Channel Hydraulics. Ed. McGraw-Hill, Nueva York .