

Informe semestral 2017

MODELO HIDRODINÁMICO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL DEL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR Y ZONAS ALEDAÑAS

Mayo 2017



Índice

1. Introducción general.....	4
2. Nuevos datos recopilados.....	4
3. Estado de desarrollo del modelo hidrodinámico.....	7
3.1 Estado actual, deficiencias y mejoras.....	7
3.2 Test de sensibilidad batimetría y cambio climático.....	9
3.3 Test de descargas de la presa de Alcalá.....	13
3.4 Modelado preliminar de fenómenos extremos.....	14
3.5 Resultados preliminares del modelo baroclino.....	18
4. Estado contractual y desarrollo del proyecto.....	21
5. Anexo 1.....	25

Índice de figuras.

- Figura 1.** En el panel de la izquierda, ubicación de las nuevas estaciones de El Majuelo, Gelves, La Esclusa y El Marmol. Recientemente se ha incorporado una estación en SanLúcar de Barrameda. En el panel de la derecha muestra con los valores registrados de salinidad entre Enero de 2007 y Febrero de 2009. Se incluyen las descargas desde la presa de Alcalá del Río. p6
- Figura 2.** Evolución del rango de marea medio a lo largo del estuario para distintos valores de la batimetría. La simulación con la batimetría de referencia se representa con la línea azul; por encima (colores verdosos) se representa dragados; por debajo (colores rojizos) se representa cegados. Dentro de un círculo y marcados con un aspa se encuentran las estaciones más fiables (Bonanza, Sevilla y Alcalá); con un aspa más pequeña se encuentran otras observaciones del rango de marea medio. p11
- Figura 3.** Series temporal de la marea donde se aprecian los cambios acaecidos por los impulsos de agua desembalsada en una estación cercana a la presa (Z11) siendo los valores desembalsados entre 50 y 1000 m³/s . p13
- Figura 4.** Mapas de la dirección y velocidad del viento y la presión atmosférica durante el día 28 Noviembre 2014.
- Figura 5.** Series temporales de la dirección y velocidad del viento y la presión atmosférica durante el periodo modelado Noviembre 2014. p15
- Figura 6.** Series temporales obtenidas del modelo NIVMAR (Puertos del Estado) de elevación del mar (azul), marea astronómica (verde) y el residuo (rojo) en Bonanza , Sevilla y en la presa de Alcalá. p16
- Figura 7.** Series temporales de los residuos reales (puntos azules) y modelados obtenidas en los diferentes escenarios (Lineas negro, rojo, verde y magenta) en Bonanza , Sevilla y en la presa de Alcalá. p17
- Figura 8.** Series temporales en los días de tormenta de los residuos reales (puntos azules) y modelados (Lineas negro, rojo, verde y magenta) obtenidas en los diferentes escenarios en Bonanza , Sevilla y en la presa de Alcalá. p18
- Figura 9.** Valores preliminares de temperatura y la salinidad en los nodos 2 y 4 calculados con el modelo de baja resolución LR. p19
- Figura 10.** Valores de temperatura y salinidad en diferentes resoluciones espaciales. HR (alta resolución) LR (baja resolución). p20
- Figura-anexo 1.** Muestra de tabla de evolución de la superficie libre del 2017 con respecto a la superficie de no movimiento en las ubicaciones indicadas en la Fig-anexo 2. Se presenta un valor cada 10 minutos. La extensión de la tabla de unas 100000 líneas. p25
- Figura-anexo 2.** Ubicación de las estaciones utilizadas para las salidas de las tablas Fig-anexo1 y Fig-anexo3. La estación 2 y 9 no se utiliza en esta salida. Las estaciones 10, 11 y Alcalá del Río no se muestran en esta figura puesto que se encuentran fuera del canal de navegación aunque se mantienen en las tablas por cuestiones de validación con los catos de la confederación hidrográfica del Guadalquivir. p26
- Figura-anexo 3.** Tabla con los instantes de pleamar y bajamar así como la altura alcanzada en cada una de las estaciones (ver Fig-anexo 2) con respecto a la superficie de no movimiento. El número de líneas del documento se reduce a unas 3000 líneas. p26
- Figura-anexo 4.** Tabla con los instantes de pleamar y bajamar así como la altura alcanzada en cada una de las estaciones de la Fig-anexo2. El número de líneas del documento se reduce a unas 3000 líneas. p27
- Figura-anexo 5.** Tabla con los instantes de pleamar y bajamar así como la altura alcanzada en cada una de las estaciones de la Fig-anexo2. El número de líneas del documento se reduce a unas 3000 líneas. p28
- Figura-anexo 6.** Programa de ayuda a la navegación Visualización de la lámina de agua. Básicamente se tienen tres paneles, dos a la izquierda y uno a la derecha, y un conjunto central de botones, desplegados y deslizadores que permitan seleccionar la información a representar en los paneles. p29
- Figura-anexo 7.** Salidas actuales del programa de ayuda a la navegación Planificación de la navegación. En el panel superior se representa como evoluciona la posición del buque en el estuario con el tiempo, con información en la parte inferior izquierda sobre el tiempo que el barco está navegando, el tiempo que necesita estar fondeado y el tiempo total empleado en abandonar el estuario (pasar por Bonanza). En el panel inferior se representa en cada momento el fondo que el barco estaría registrando así como una línea roja que da cuenta del calado del mismo. p30

Índice de tablas.

- Tabla 1 .** Datos sobre las diferentes observaciones nuevas disponibles. p5
- Tabla 2 .** Observaciones disponibles para la calibración/validación del modelo baroclino. p7
- Tabla 3.** Estado de desarrollo del modelo hidrodinámico (barotrópico y baroclinico). p8
- Tabla 4.** Objetivos prioritarios y estado de desarrollo del modelo barotrópico/Baroclinico. p21
- Tabla 5.** Futuras actuaciones en el tercer semestre y finalización de tareas. p23

I. Introducción general.

Cumpliendo con las estipulaciones en el contrato de colaboración entre la Universidad de Málaga (UMA) y la Autoridad Portuaria del Puerto de Sevilla (APS) concretamente la tercera, el grupo de oceanografía física de la UMA presenta este segundo informe de seguimiento con periodicidad semestral donde se exponen los trabajos realizados, se comentan los aspectos más relevantes, se realiza un breve índice de las actividades que se desarrollarán durante el siguiente trimestre y se termina con un apéndice con la descripción de la ayuda a la navegación programada en MATLAB.

Concretamente, en este segundo semestre se han trabajado e incorporado en el modelo nuevos datos de diferentes instituciones; en el texto se trata brevemente este aspecto. También se exponen diferentes estudios de sensibilidad realizados sobre el modelo: cambios en la resolución espacial de la malla (alta y baja resolución), cambios en la batimetría y test sobre posibles descargas desde la presa de Alcalá del Río. Se presentan los primeros resultados del modelo baroclino, esto es, se simula temperatura y salinidad en todo el dominio y se permite que los cambios en el campo de densidad afecten los movimientos de las masas de agua. Completa este informe detalles sobre el estudio realizado con ayuda del modelo de un fenómeno extremo; particularmente se quería probar las capacidades del modelo ante situaciones con variaciones importantes de la presión (forzamiento atmosférico de la superficie libre) acompañado de episodios con fuertes precipitaciones.

2 Nuevos datos recopilados.

Se han incorporado datos de la boya integrada en la red exterior REDEXT (Código 2342). Se han incorporado series del modelo NIVMAR en Chipiona, Cadiz y Mazagón (códigos: 1070075, 1071075, 1068074); básicamente consisten en valores de nivel del mar, presión atmosférica y velocidad y dirección del viento. Se ha obtenido toda la serie temporal de descargas (presas de Alcalá del Río, Gergal, el Agrio y Torre del Águila) y nivel de la superficie libre en las estaciones M09 (isla de la Cartuja) y H09 (cerca de la presa de Alcalá del Río) de la confederación hidrográfica del Guadalquivir. Ver más detalles en la tabla 1.

LUGAR	PARÁMETRO OBSERVADO	FRECUENCIA MUESTREO (minutos)	PERIODO DEL REGISTRO	Fuente de los datos
Estación Alcalá del Río H09_ALCALA_RIO	<i>Caudal desembalsado</i>	60	01/09/1993 (continúa midiendo)	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
	<i>Nivel aguas abajo (Radar)</i>		01/01/2010 (continúa midiendo)	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Estación Gergal E65_GERGAL	<i>Caudal desembalsado</i>	60	01/01/1992 (continúa midiendo)	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Estación Sevilla M09_SEVILLA_G	<i>Nivel aguas abajo (Radar)</i>	60	01/01/1999 (continúa midiendo)	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Estación Agrio E67_AGRIO	<i>Caudal desembalsado</i>	60	01/01/1993 (continúa midiendo)	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Estación T del águila E68_TORRE_AGUILA	<i>Caudal desembalsado</i>	60	01/01/1992 (continúa midiendo)	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
Boya REDEXT (Código 2342)	<i>Oleaje, corrientes, temperatura, salinidad, viento y presión atmosférica</i>	60	27/08/1996 (continúa midiendo)	Puertos del Estado
Modelo NIVMAR Cádiz, Chipiona, Mazagón	<i>Nivel del mar, marea o componente astronómica, residuo o componente meteorológica, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento.</i>	60	1/08/2012 31/12/2014	Puertos del Estado

Tabla 1. Datos sobre las diferentes observaciones nuevas disponibles.

Recientemente se ha contactado con la Dirección General de Planificación y gestión del dominio público del Territorio de la Junta de Andalucía con objeto de ampliar las observaciones con estaciones automáticas de vigilancia y control de la calidad del agua de diferentes parámetros, particularmente temperatura y salinidad (conductividad), ver más detalles en la Tabla 2. Por el momento se tienen los datos sin procesar (ver serie en el panel derecho de la Figura 1); está pendiente decidir sobre la calidad y la utilidad de los mismos para fines de calibración-validación del modelo baroclino. Es de lamentar que actualmente esta red de medida está desmantelada por falta de financiación para su mantenimiento y que, por tanto, la información que se tiene limita su utilización a periodos comprendidos entre 2006 y principios de 2016.

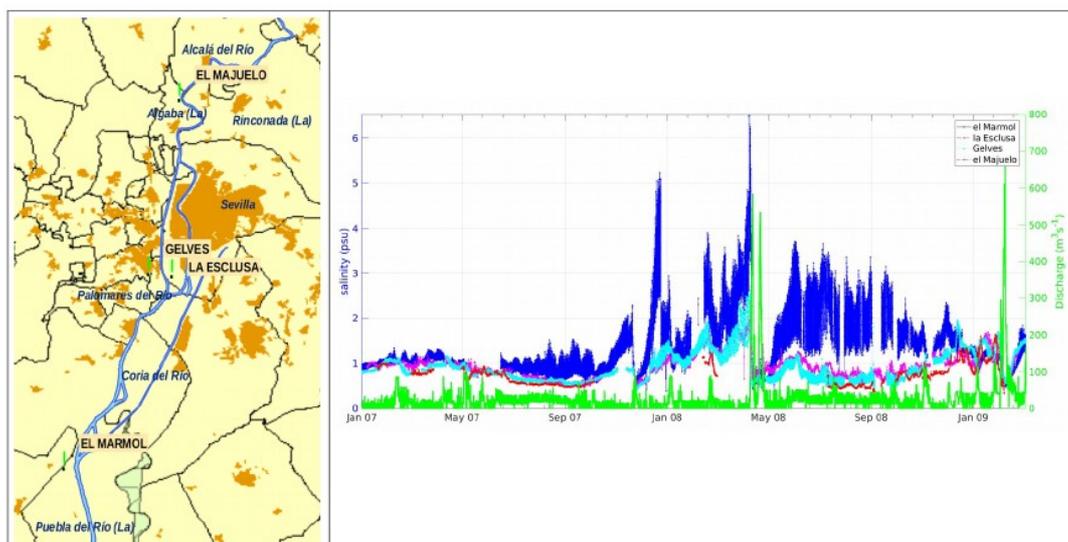


Figura 1. En el panel de la izquierda, ubicación de las nuevas estaciones de El Majuelo, Gelves, La Esclusa y El Mármol. Recientemente se ha incorporado una estación en Sanlúcar de Barrameda. En el panel de la derecha se muestran los valores registrados de salinidad entre Enero de 2007 y Febrero de 2009 en los distintos lugares. Se incluyen las descargas desde la presa de Alcalá del Río para subrayar las fluctuaciones de baja frecuencia (días-semanas) de las series temporales de salinidad.

También se nos ha facilitado las observaciones recientes del programa de vigilancia ambiental que la Junta de Andalucía viene realizando en numerosas estaciones a lo largo del estuario. La cantidad de parámetros físico-químicos medidos es elevado, las estaciones donde se toman también (unas 15 localizaciones) pero la frecuencia de muestreo, 1 dato cada 4 meses aproximadamente, resta utilidad a estas observaciones para la validación del modelo. En cualquier caso, pueden aún resultar interesantes en la fase de calibración del modelo o como medidas redundantes de las estaciones indicadas en la Tabla 2, para contrastar la fiabilidad de las series anteriores.

Todos los datos obtenidos están en formato EXCEL o texto y en variables ©MATLAB a disposición de cualquier interesado dentro del consorcio de grupos que viene realizando trabajos en el estuario del Guadalquivir. No se entra en más detalle sobre el procesamiento de los mismos, los resultados directamente inferibles de ellos o el papel que desempeñan en la fase actual del modelo numérico.

LUGAR	PARÁMETRO OBSERVADO	FRECUENCIA MUESTREO (minutos)	PERIODO DEL REGISTRO	Fuente de los datos
Estación El Majuelo	<i>Parámetros calidad del agua: temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto y turbidez</i>	10	01/01/2006 22/11/2009	Junta de Andalucía
Estación El Mármol	<i>Parámetros calidad del agua: temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto y turbidez</i>	10	01/01/2006 12/10/2015	Junta de Andalucía
Estación La Esclusa	<i>Parámetros calidad del agua: temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto y turbidez</i>	10	01/01/2006 01/01/2010	Junta de Andalucía
Estación Gelves	<i>Parámetros calidad del agua: temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto y turbidez</i>	10	01/01/2006 08/02/2016	Junta de Andalucía
Estación SanLúcar de Barrameda	<i>Parámetros calidad del agua: temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto y turbidez</i>	10	20/01/2014 19/10/2015	Junta de Andalucía

Tabla 2. Observaciones disponibles para la calibración/validación del modelo baroclino.

3. Estado de desarrollo del modelo hidrodinámico.

A lo largo de los diferentes epígrafes de esta sección se describirá el estado del modelo numérico del estuario del Guadalquivir. Se trata de un proceso actualmente muy avanzado aunque sujeto a continuas revisiones y mejoras a diferentes niveles. En este nuevo informe se describe la versión funcional más actualizada; se hablará de los modelos barotrópico y baroclino de alta y baja resolución del estuario del Guadalquivir.

3.1 Estado actual, deficiencias y mejoras.

El estado actual del modelo en el segundo semestre queda descrito en la tabla 3. La recopilación de la información sobre los diferentes ámbitos implicados en la elaboración del proyecto, las capacidades computacionales necesarias y los diferentes aspectos relacionados con la generación de la malla (por el momento se utilizan dos mallas de diferente resolución), la manipulación de la batimetría (los continuos dragados de mantenimiento obliga a definir una batimetría dependiente del tiempo) y los forzamientos de contorno están concluidos (datos para el forzamiento meteorológico que completen al modelo únicamente forzado por mareas). La calibración-validación está en fase avanzada; se está pendiente de recibir datos de otras instituciones con intereses de distinta índole en el estuario, que aportarán valor añadido a las observaciones actuales. En particular, se espera conseguir en un futuro próximo una

buena batimetría de la parte alta del estuario y observaciones de numerosos mareógrafos desplegados en el estuario por el Instituto Hidrográfico de la Marina. En cualquier caso, hasta el momento se han realizado numerosos ejercicios de calibración, por lo que la tarea está bastante automatizada y suficientemente probada. Por tanto, la actualización y mejora del modelo resulta bastante rutinaria y con una previsible rápida implementación.

El modelo barotrópico, de baja y alta resolución, está ajustado para representar todas las observaciones actuales de la mejor forma posible. Por tanto, en el momento en que se escribe este informe, la ejecución resulta muy satisfactoria a la hora de reproducir la evolución de la onda de marea en el estuario entre Bonanza y Sevilla; se cubren las necesidades básicas del modelo como apoyo a la navegación.

Estado actual Modelo SHYFEM	Estado Inicial	Estado intermedio	Estado avanzado
Capacidades computacionales		X	
Generación de malla y Batimetría			X
Forzamientos de contorno.			X
Calibración-Validación.			X
Descargas			X
Forzamiento meteorológico			X

Tabla 3. Estado de desarrollo del modelo hidrodinámico (barotrópico y baroclino).

El modelo baroclino implementado en una malla de alta resolución resulta poco operativo por su alto coste computacional (al menos por el momento); no así el modelo implementado en una malla de resolución más moderada. La física que incorpora este modelo lo hace más robusto pero la falta de observaciones del campo de salinidad y temperatura no permite la correcta calibración/validación del modelo. Por el momento, los trabajos están iniciados con situaciones ideales y esperamos que los datos recientemente incorporados (Tabla 3) solucionen este problema. Este modelo sirve de base para muchos de los trabajos de investigación iniciados por otros grupos de trabajo y, aunque no tiene la prioridad del modelo barotrópico para ciertos aspectos de estudio (navegabilidad, en concreto), si requiere un esfuerzo adicional que permita tenerlo operativo a la finalización del presente convenio.

3.2 Test de sensibilidad (batimetría y cambio climático).

En el primer informe se comentó la necesidad de, partiendo de las simulaciones presentadas, ir acotando de forma gradual la incertidumbre de las diferentes entradas del modelo con objeto de afinar las predicciones del mismo. Quizás una de las entradas que tienen mayor incidencia en estos momentos es la batimetría utilizada. La parte principal de esta batimetría procede de los estudios que la APS viene desarrollando desde la desembocadura (Chipiona) hasta la Esclusa (entrada al puerto de Sevilla) como apoyo a la navegación por el estuario. Esta información se completa con una reconstrucción de la batimetría en la parte alta basada en, datos proporcionados por la confederación hidrográfica de 1995 (veintena de secciones), y observaciones recientes durante una visita desde Gélves hasta la presa de Alcalá del Río. Ambas actuaciones fijan un orden de magnitud del fondo en la parte central que se completa con una interpolación lineal hacia las riberas que ha sido utilizada en esta parte alta; se trata de una batimetría provisional pendiente de ser reemplazada por una más precisa que está programada para ser adquirida en breve. La batimetría actual no incluye llanos mareales (puede incorporarlos fácilmente) porque no se tienen detalles sobre su existencia, ubicación ni extensión.

Con objeto de comprobar la sensibilidad del modelo actual frente a posibles variaciones de la batimetría utilizada, se han realizado una serie de simulaciones, similares a las descritas en el anexo C del primer informe. La diferencia principal es que, ahora, el fondo se modifica añadiendo o quitando el mismo valor en todos los puntos en lugar de efectuar un cambio porcentual de sondas. Se ha utilizado la malla depurada de baja resolución, simulado los primeros 42 días del año 2017 de los que se descartan los 5 primeros para permitir el spinup del modelo y fijado una descarga constante desde la presa de Alcalá del Río (descarga ecológica de 50 m³/s). El parámetro de fricción, se modifica por tramos para ajustarse mejor a las observaciones, pero queda fijado para todos los test. Se han abordado escenarios que equivalen a profundizaciones de 1.4 m, 1.2 m, 1.0 m, 0.8 m, 0.6 m, 0.4 m y 0.2 m y cegados de 0.2 m, 0.4 m, 0.8 m, 1.0 m, 1.2 m, 1.4 m. La simulación de referencia es la de no modificación de la batimetría. Nótese que estos experimentos no pretenden simular el efecto real de un dragado, que opera sobre áreas selectivas (únicamente la canal de navegación y en ciertos lugares), o de cegados ocasionados por los depósitos de sedimentos en zonas donde el flujo encuentra un aumento significativo de la sección; se busca analizar la sensibilidad del modelo frente a incertidumbres en la batimetría.

Se han utilizado registros de mareógrafos a lo largo del estuario como referencia para centrar la discusión sobre los test. Se quiere recordar que la calidad de las observaciones es alta para las estaciones de Bonanza, Sevilla y Alcalá del Río, en tanto que para el resto de puntos incluidos en el estudio previo dirigido desde el CSIC,) la calidad no se ha podido contrastar de forma adecuada.

El parámetro utilizado para discutir la sensibilidad del modelo al efecto de la profundidad del estuario ha sido el rango mareal medio en las diferentes ubicaciones donde se tiene información experimental. La Figura 2 indica una respuesta del modelo por debajo del valor real (ver valores en Bonanza) en los primeros km del estuario, que mejora en la parte intermedia del estuario (desde Salinas, km 10, a la Esclusa, km 75). En estas simulaciones, el forzamiento procede de la frontera abierta en la zona de plataforma; la descarga utilizada desde la presa de Alcalá es poco significativa. Las discrepancias en el tramo inicial básicamente proceden de la limitación artificial al 80% del valor observado en la zona de plataforma en las alturas que se imponen en el contorno abierto. La energía que se introduce en el forzamiento, de esta forma, se reduce mejorando la progresión de la señal de marea en el estuario sin grandes artificios sobre el parámetro de fricción. Se está trabajando sobre las condiciones de contorno para resolver esta discrepancia en el tramo inicial; por el momento apuntamos a probar una nueva ubicación del contorno abierto y cambiar la situación dinámica en el ramal del Brazo de la Torre mediante la inclusión de algún llano mareal o la variación del fondo propuesto.

La Figura 2 muestra como los escenarios de profundización aumentan el rango mareal tanto más cuanto mayor es el nuevo fondo y lo contrario se observa para los casos de disminución de profundidad. Esta amplificación/disminución del rango mareal se intensifica a medida que la señal progresa en el estuario, al menos hasta la posición de la Esclusa. Para fondo variando entre 1.4m más somero a 1.4m más profundo que el de referencia, a 20 km de Bonanza el rango mareal varía entre 0.6m y 0.8m en tanto que a 80 km ese rango oscila entre 0.7m y 1.3m respectivamente. Aguas arriba de la Esclusa, las variaciones son más acentuadas, oscilando el rango de marea entre 0.2 y 1.4 m en las inmediaciones de la presa de Alcalá del Río.

La explicación de este comportamiento hay que buscarlo en la fricción con el fondo: el parámetro de fricción es el mismo para todas las simulaciones pero, la contribución del término de fricción cambia de unas a otras dado que, dicho término es proporcional al

propio parámetro de fricción, al cuadrado de la velocidad e inversamente proporcional al espesor de la lámina de agua.

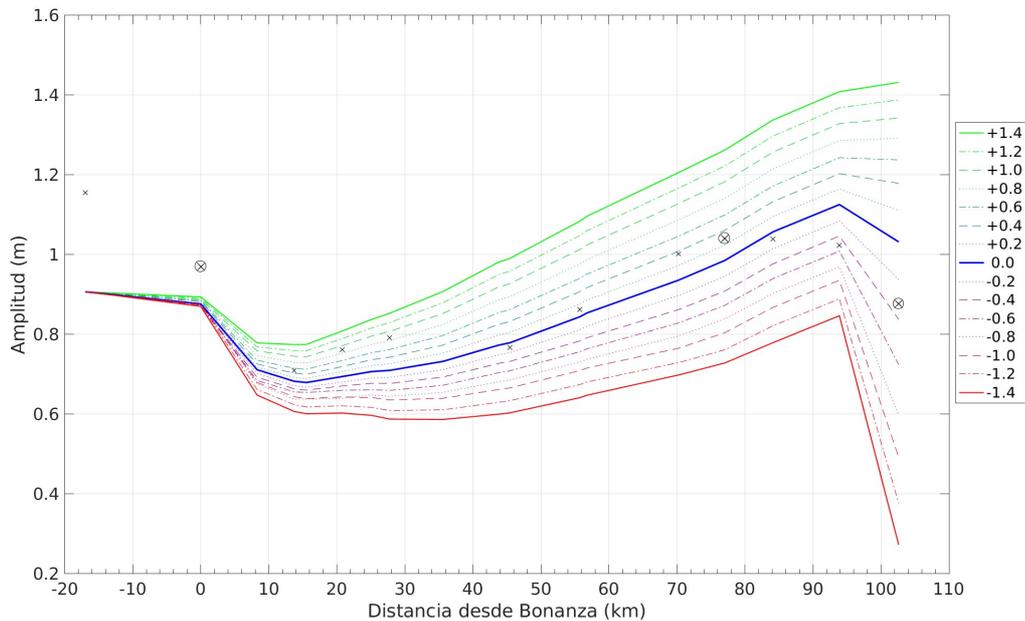


Figura 2. Evolución del rango de marea medio a lo largo del estuario para distintos valores de la batimetría. La simulación con la batimetría de referencia se representa con la línea azul; por encima (colores verdosos) se representan mayores profundidades, por debajo (colores rojizos) menores profundidades. Las aspas en círculos señalan las estaciones más fiables (Bonanza, Sevilla y Alcalá, de izquierda a derecha y las aspas más pequeña las otras estaciones.

Otro factor importante, sobre todo aguas arriba de la Esclusa en la parte alta del estuario, es la batimetría, considerablemente menos profunda que en la parte navegable (en la medida de lo que de ella se conoce actualmente). Las variaciones de profundidad realizadas en los distintos tests son porcentualmente mayores, especialmente al disminuir la profundidad, lo que amplifica el efecto del fricción.

La discrepancia más relevante con las observaciones se produce a partir de la Esclusa: las observaciones dan un máximo local del rango mareal a ~80 km en tanto que en el modelo retrasa este máximo local a 95 km. Esta situación se podría solucionar ajustando localmente un parámetro de fricción pero no hemos incidido más en este ajuste fino puesto que la batimetría de la parte alta será resuelta (o mejorada muy significativamente) en un plazo breve.

Las cotas batimétricas proporcionadas por la APS vienen dadas con respecto al nivel medio en Alicante que para el Golfo de Cádiz no es nivel medio de la superficie de referencia. El modelo evalúa la onda de marea como la oscilación de la superficie libre respecto al nivel medio en cada punto, que se ha tomado por defecto como la cota cero de los datos batimétricos, es decir, el nivel medio en Alicante. Como se indicará en el

Anexo que explica los programas de ayuda a la navegación elaborados, el espesor de la lámina de agua necesita aumentarse ya que ese nivel medio en el estuario debería coincidir con el existente en el Golfo de Cádiz y este a su vez debe estar entre 15-20 cm por encima del nivel en Alicante (Mediterráneo) para mantener el flujo entrante por el Estrecho de Gibraltar. Por el momento el fondo de referencia no incorpora esta corrección (línea azul Figura 2). El parámetro de fricción actual en el modelo se ha modificado ligeramente para que las salidas del escenario 20 cm más profundo ajusten las observaciones en la Esclusa y las intermedias.

Se ha solicitado información a la empresa que realiza los levantamientos batimétricos para la APS a fin de proceder a una estima más ajustada de ese término aditivo que tiene importancia clave en cuestiones de navegabilidad (se ha solicitado el fondo que observa la sonda y la ubicación de la misma respecto al punto de referencia así como la fecha y hora de adquisición de la información).

El ejercicio anterior es aplicable a la simulación del comportamiento del estuario ante variaciones de nivel del mar asociadas al cambio climático. Con referencia a la respuesta en el estuario, un aumento del nivel del mar ΔH es equivalente a una profundización de toda la batimetría del mismo en la misma cantidad, por lo que las líneas de tonos verdosos son representativas de lo que ocurriría en el interior del estuario en los diversos escenarios. Nótese, sin embargo, que la aproximación es excesivamente simplificadora porque ello supone que la morfología y batimetría actual del estuario se verían inalteradas en esos escenarios, situación altamente improbable dada la disparidad de escalas temporales implicadas: los distintos escenarios tienen escalas decadales de tiempo, en tanto que la batimetría cambia en periodos de años o inferiores incluso. El uso antrópico que pueda hacerse del estuario es otra fuente de incertidumbre no previsible a medio-largo plazo, por lo que los resultados deducibles de la Figura 2 deben contextualizarse y tomarse con la correspondiente cautela. Lo que sí parece bien fundado es que el aumento del nivel del mar asociado al cambio climático producirá una mayor oscilación mareal en el interior del estuario. Los detalles de cómo sería resultan bastante especulativos.

Otro aspecto importante relacionado con el cambio climático es la intensificación de eventos extremos, y en este sentido, el problema tendrá un tratamiento muy similar al realizado en los siguientes epígrafes.

3.3 Test de descargas de la Presa de Alcalá.

El efecto de las descargas de la presa de Alcalá se está analizando haciendo variar el valor de caudal desembalsado desde el valor de referencia de 50 m³/s asignado para mantener el caudal ecológico hasta 4000m³/s. Durante los tests se impusieron esos valores en una descarga prolongada en la condición de frontera en la presa de Alcalá para ver como evolucionaba la señal de marea. Para ello se modelaron tres meses manteniendo la descarga ecológica durante el primer y último mes, y aumentando la descarga en el rango de 50-4000 m³/s a lo largo del segundo mes.

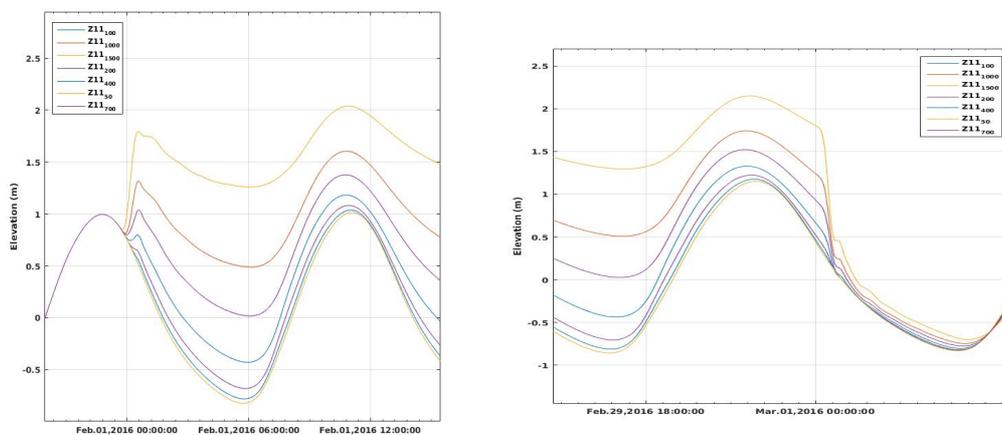


Figura 3. Series temporal de la marea donde se aprecian los cambios acaecidos por los impulsos de agua desembalsada en una estación cercana a la presa (Z11) siendo los valores desembalsados entre 50 y 1000 m³/s .

En la figura 3 se puede observar los cambios acaecidos con estos pulsos de agua desembalsada en una estación cercana a la presa justo en el momento de aumentar el flujo (panel de la izquierda) y justo en el momento de retomar los valores iniciales de descarga (panel de la derecha). En general, en los primeros instantes, la altura del nivel del agua se eleva, la amplitud de la señal de marea decrece, la pleamar se adelanta y la bajamar se retrasa. Al cesar la descarga, la marea tarda menos de seis horas en alcanzar los valores de referencia (aquellos que se dan con la descarga ecológica). Los valores modelados en diferentes sitios aguas abajo siguen este patrón pero los mencionados cambios se van diluyendo hasta la estación de Bonanza en donde son prácticamente inapreciables.

En estos momentos se está estudiando la incidencia en el modelo de descargas reales (próximo epígrafe). Los valores calculados se tienen que tomar con cautela, no se han estudiado las aportaciones de los diferentes brazos a lo largo del estuario ni las implicaciones que puede tener la extracción de agua en diferentes ubicaciones para las labores de cultivo.

3.4 Modelado preliminar de fenómenos extremos

La base del modelo actual reside en un forzamiento mareal desde la zona del Golfo de Cádiz. La ventaja de dicho forzamiento es que conocidas las constantes de marea se puede realizar una predicción en cualquier periodo. Lógicamente las predicciones realizadas con dicho forzamiento, aun cuando son responsables de la mayor contribución a la oscilación de la superficie libre, pierden cualquier detalle sobre las fluctuaciones que no tienen este origen mareal.

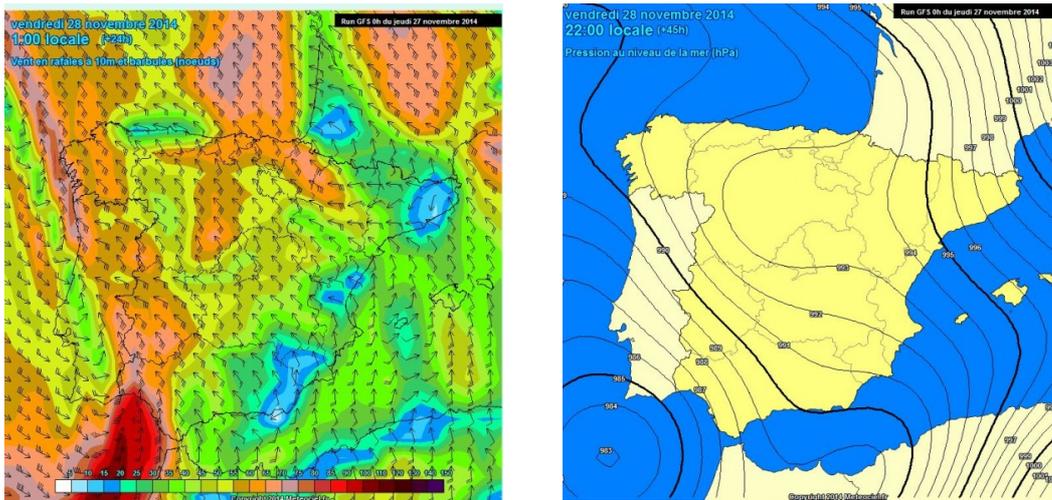


Figura 4. Mapas de la dirección y velocidad del viento y la presión atmosférica durante el día 28 Noviembre 2014.

Con objeto de probar la respuesta del modelo hidrodinámico con un forzamiento realista, tomamos el evento reciente más extremo del que hemos tenido noticia y sobre el que se tienen observaciones: la tormenta que azotó el golfo de Cádiz durante Noviembre del 2014. En una charla informal con D. Luis Ibarrola nos comentó que en aquella ocasión, por primera vez, se tuvo que cerrar la entrada al Puerto de Sevilla. Los resultados han sido presentados en la European Geosciences Union General Assembly EGU celebrada en Viena (Austria) entre los días 23-28 de Abril (2017), concretamente

en la sección “Extreme meteorological and hydrological events induced by severe weather and climate change”.

Durante varios días, del 26 al 30 de Noviembre (2014) se produjo una situación de mal tiempo (fuertes vientos, mala mar para la navegación, precipitaciones) como consecuencia del tránsito de dos depresiones en la parte sur de la península ibérica (ver figura 4). Las rachas de viento llegaron a alcanzar los 90 km/h en algunos puntos y cuando la segunda borrasca se aproximó al Golfo de Cádiz, dejó un registro mínimo de presión de 980 hPa. Se pidió a Puertos del Estado los datos meteorológicos necesarios para recrear la situación en el estuario, concretamente, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y elevación de mar del modelo NIVMAR (ver sección 2) en los puntos cercanos a la frontera abierta en el Golfo de Cádiz del modelo barotrópico. La pluviosidad también resultó considerable en estas fechas, por lo que se incorporó descargas reales desde la presa de Alcalá como forzamiento del estuario (ver más detalles sobre los registros en la figura 5).

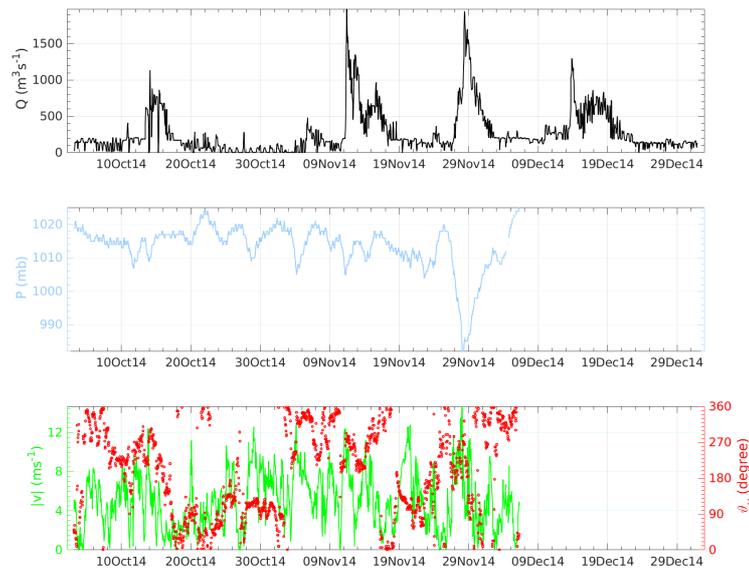


Figura 5. Series temporales de la dirección y velocidad del viento, la presión atmosférica y descargas durante el periodo modelado Octubre a Diciembre 2014.

Con objeto de discriminar la importancia de los diferentes forzamientos sobre los niveles residuales se prepararon diferentes escenarios, combinando descargas constantes y reales, introduciendo o no el efecto del viento y utilizando marea astronómica o niveles reales. Estos niveles reales son una combinación de marea y fluctuaciones de baja frecuencia producidas principalmente por las fluctuaciones en la presión

atmosférica (datos NIVMAR de Chipiona). En la figura 5 se puede observar detalles sobre los forzamientos durante los tres meses simulados, particularmente durante los días de tormenta (26-30 Nov 2014).

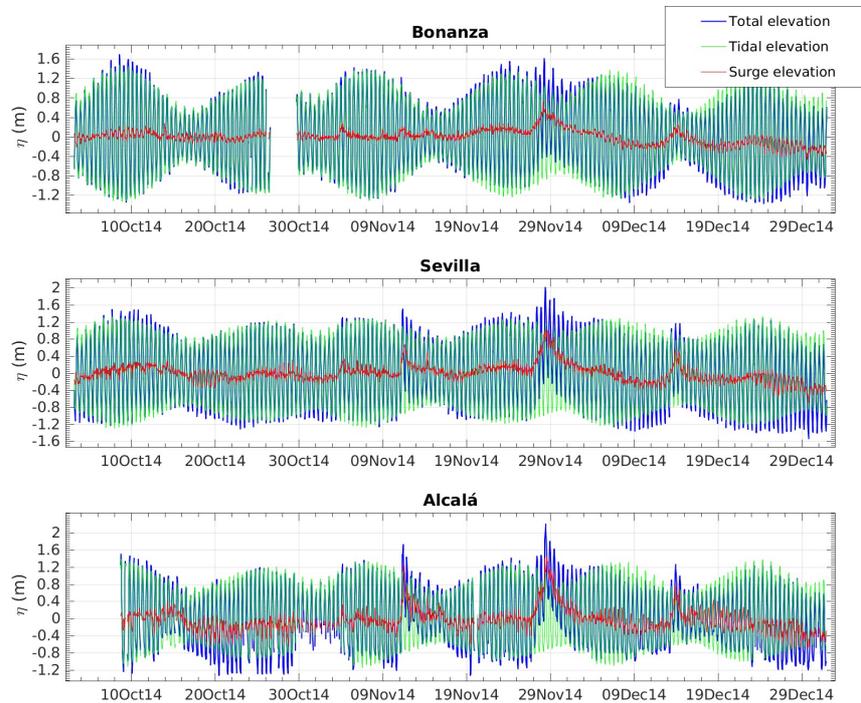


Figura 6. Series temporales obtenidas del modelo NIVMAR (Puertos del Estado) de elevación del mar (azul), marea astronómica (verde) y el residuo (rojo) en Bonanza , Sevilla y en la presa de Alcalá.

En la Figura 6 se recogen en tres estaciones (Bonanza, Sevilla y en Alcalá) las observaciones de la superficie libre utilizadas para validar las simulaciones con los diferentes escenarios propuestos. En la misma se recoge una descomposición de las fluctuaciones totales en una componente mareal (discutida con detalle en el primer informe) y una componente residual (elevación de mar menos la astronómica), que es la que resulta particularmente interesante.

Las Figuras 7 y 8 presentan los niveles residuales durante el tiempo modelado (tres meses de Octubre a Diciembre 2014) con cuatro de los escenarios propuestos. El modelo aproxima bien los datos reales en los tres estaciones, tanto mejor cuanto más detalles se incluyen en el forzamiento (caso de la simulación con Nivmar+Descargas+Vientos). En general se puede comentar que, los efectos de incluir la parte residual en la frontera de la plataforma mejora las observaciones cerca de la desembocadura (Bonanza) y va perdiendo importancia aguas arriba (Sevilla y Alcalá); la inclusión de las descargas reales mejora los niveles residuales en la parte alta (Alcalá

y un poco en Sevilla) y resultan prácticamente irrelevantes en la desembocadura (Bonanza); los vientos, aún siendo tan fuertes como los de esta época, en general tienen una importancia muy secundaria en todo el estuario.

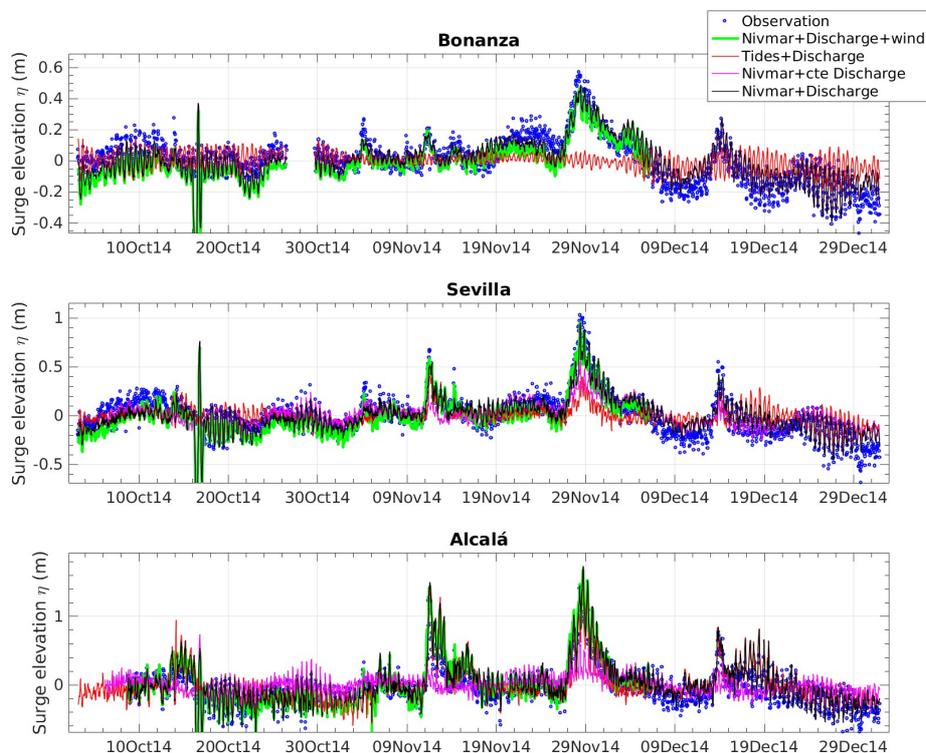


Figura 7. Series temporales de los residuos reales (puntos azules) y modelados obtenidas en los diferentes escenarios (Lineas negro, rojo, verde y magenta) en Bonanza , Sevilla y en la presa de Alcalá.

Un detalle que se pone de manifiesto con estas simulaciones es la necesidad de replantearse cómo se incluyen las descargas de agua dulce en el modelo, puesto que las simulaciones requieren de una reducción importante del flujo de entrada (sobre $\frac{1}{3}$ del valor observado) para reproducir correctamente las observaciones. Pensamos que la necesidad del artificio pudiera venir de la existencia real de un cierto desnivel del lecho del río (una decena de cm de diferencia entre Alcalá y Bonanza) que no se tiene presente en la formulación del modelo; cambiar el código para introducir dicho efecto puede ser una tarea interesante para la comunidad de usuarios del modelo pero costosa en cuanto al tiempo a dedicar (por el momento le hemos asignado una prioridad baja). Por tanto, puesto que al modelo baroclino sí le afecta estas modificaciones artificiosas del forzamiento (posición de la cuña salina entre otros parámetros), en estos momentos se está probando diferentes soluciones .

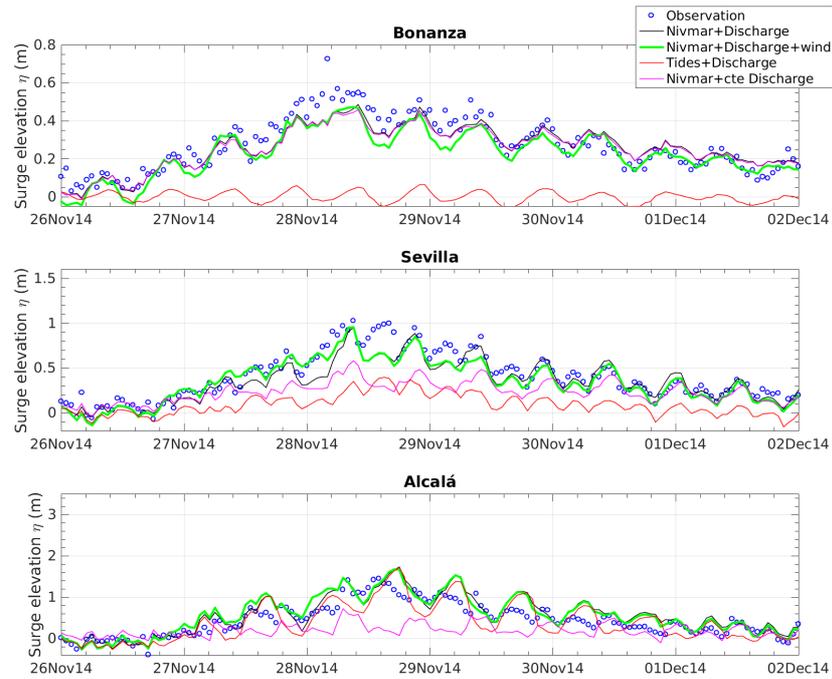


Figura 8. Series temporales en los días de tormenta de los residuos reales (puntos azules) y modelados (Lineas negro, rojo, verde y magenta) obtenidas en los diferentes escenarios en Bonanza , Sevilla y en la presa de Alcalá.

3.5 Resultados preliminares del modelo baroclino.

En este semestre se puso a punto el modelo en modo baroclino, es decir con valores de temperatura y salinidad no constantes como en el caso del barotrópico y con la posibilidad de que los gradientes en los campos de densidad tuvieran implicaciones dinámicas.

Los valores de referencia en estos primeros test toman como condiciones iniciales un estuario homogéneo a una temperatura de 22°C y una salinidad de 34 psu. En las fronteras, el modelo se fuerza con valores diferentes a estos iniciales: en la plataforma continental se mantienen 36 psu y una temperatura de 20°C y en la presa de Alcalá se introduce agua dulce (0 psu) a 20 °C de temperatura.

Las dos ideas fundamentales en estos primeros ensayos eran por un lado comprobar el funcionamiento general del código y los resultados que produce y por otro lado valorar las discrepancias de las salidas del modelo trabajando con mallas de alta resolución (HR) y baja resolución (LR) a fin de evaluar el costo computacional del modelo. Se simularon dos meses con una descarga ecológica y un forzamiento propiciado únicamente por la marea.

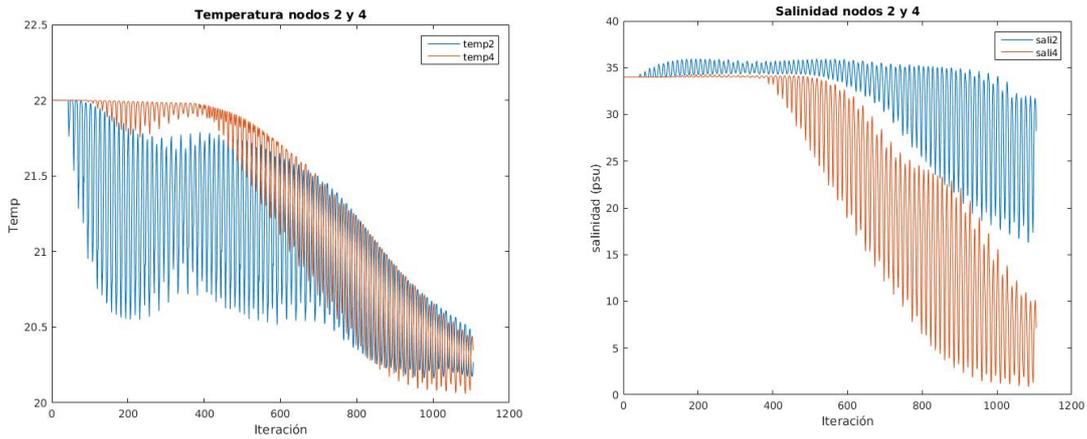


Figura 9. Valores preliminares de temperatura y la salinidad en los nodos 2 y 4 calculados con el modelo de baja resolución LR.

Respecto al primero de los retos de estos ensayos, la Figura 9 presenta las series temporales de temperatura (panel izquierdo) y salinidad (panel derecho) de dos nodos, uno situado en la entrada del estuario (nodo 2) y otro en los primeros meandros (nodo 4). La situación geográfica nos da una idea del intercambio esperado entre el océano y el estuario en temperatura y salinidad. Los resultados preliminares, a falta de una validación exigente a la que habrá que esperar hasta disponer de observaciones, sugieren que el modelo genera los campos de salinidad y temperatura de forma coherente. La temperatura tiende a converger al igualarse los valores en los dos lugares, dado que no se introduce mucho gradiente térmico a través de los forzamientos. La salinidad presenta una transición desde los valores iniciales hasta los valores que el forzamiento acomodada en el estuario (se origina un gradiente horizontal salino); este valor fluctúa en un determinado rango con la marea pero se mantiene en el tiempo. Destacaremos como el volumen de agua dulce baja gradualmente la salinidad de todo el estuario hasta una situación en la que se crea un gradiente entre la desembocadura y la plataforma con la esperada cuña salina en el tramo medio-bajo del estuario.

En cuanto al segundo de los retos, el panel izquierdo de la Figura 10 muestra las salidas HR y LR de temperatura para el nodo 4, en tanto que el panel derecho muestra las salidas HR y LR de salinidad del nodo 4. NO se encuentra grandes diferencias en los valores calculados más allá de algunas discrepancias en los valores extremos en la fase de acomodación del forzamiento (transitorio).

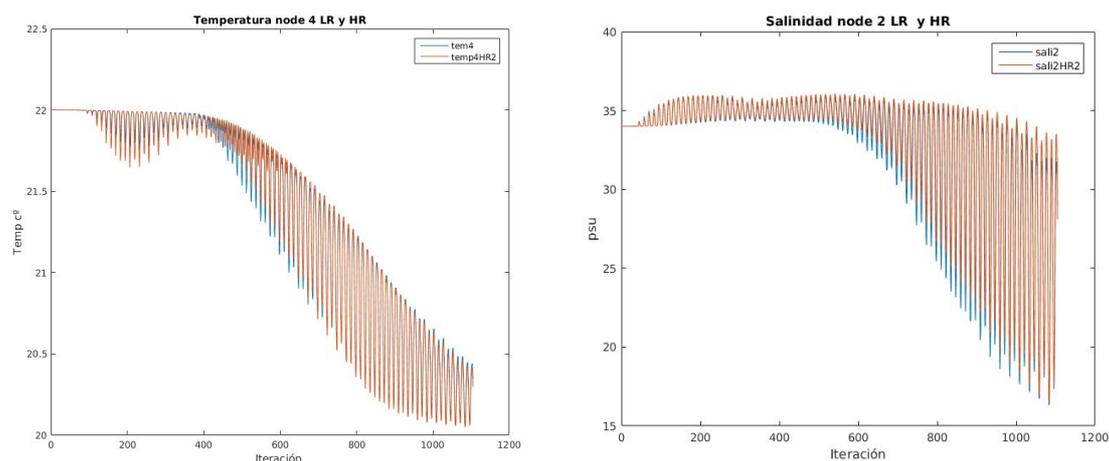


Figura 10. Valores de temperatura y salinidad en diferentes resoluciones espaciales. HR (alta resolución) LR (baja resolución).

Es un resultado muy satisfactorio porque el tiempo de computación en la malla HR es muy superior al empleado en la LR, lo que permite realizar cualquier tipo de ajuste en el modelo en tiempos razonables. Por lo tanto, adoptaremos la malla de baja resolución en los futuros escenarios con el modelo baroclino hasta tenerlo satisfactoriamente calibrado.

Finalmente, como ya se ha mencionado al inicio del informe, decir que recientemente se han obtenido series de salinidad y temperatura en distintos puntos del estuario provenientes del programa de vigilancia ambiental que la Junta de Andalucía viene realizando en diversas localizaciones a lo largo del mismo (ver Tabla 2). Evidentemente, estos datos son de gran valor para la calibración/validación del modelo baroclino y serán usados a tal fin. En estos momentos las series ya han sido depuradas y procesadas para su utilización en la calibración, por lo que, teniendo presente los buenos resultados con los test realizados, esperamos tener resultados del modelo sobre la evolución de la cuña salina para el tercer semestre, que es el objetivo prioritario número 7.

4 Estado contractual y desarrollo del proyecto.

Cumpliendo con las estipulaciones en el convenio de colaboración, el seguimiento de los trabajos desarrollados y resultados de los mismos se realiza a través de una Comisión de Seguimiento que se reunirá al menos con periodicidad trimestral con carácter ordinario y con carácter extraordinario cuando alguna de las partes lo solicite. Quedamos a la disposición de dicha Comisión para la ampliación de los detalles que no queden lo suficientemente explícitos en el presente informe.

Modelo Barotrópico y baroclino.	Estado Inicial	Estado intermedio	Estado avanzado
Objetivo prioritario 1. Predicción del espesor de la lámina de agua en cualquier instante y lugar del estuario.			X
Objetivo prioritario 2. Modificaciones hidrodinámicas consecuencia de los dragados de mantenimiento del estuario.		X	
Objetivo prioritario 4. Influencia de las descargas de la presa de Alcalá del Río en el régimen hidrodinámico del estuario.			X
Objetivo prioritario 7. Evolución espacio-temporal de la salinidad en el estuario y el alcance de la cuña salina.		X	
Objetivo 3. Influencia de la posible inundación de llanos mareales en la hidrodinámica del estuario .		X	
Objetivo 5. E volución de la hidrodinámica del estuario bajo escenarios de subida del nivel del mar debido al calentamiento global.			X
Objetivo 8. Primeros desarrollos de un modelo de exportación/importación de sedimentos.	X		

Tabla 4. Objetivos recogidos en el anexo técnico del convenio, ordenados por grado de prioridad y estado de desarrollo de los mismos.

La tabla 4 recoge por objetivos (los mismos que se incluyeron en la memoria técnica del presente convenio de colaboración) el nivel de desarrollo con el modelado numérico del estuario descrito en este informe. En la misma tabla se muestra el grado de prioridad que se le asigna a cada uno.

Los trabajos realizados en este segundo semestre podemos considerar que:

- el objetivo prioritario 1 está en un nivel de desarrollo muy avanzado, concretamente en lo concerniente a la predicción de la marea en cualquier parte del estuario.
- los objetivos prioritarios 2 está en fase intermedia. Se han probado las sucesivas batimetrías mejoradas tal y como se ha indicado en capítulos anteriores, cambios de profundidad y diferentes mallas con resoluciones espaciales diferentes. Queda por diseñar unos escenarios de simulación de dragados en diferentes zonas que permita abordar las modificaciones que suponen estos trabajos de mantenimiento.
- objetivo prioritario 4, se han recopilado datos de descargas y de nivel del agua evaluándose posteriormente las componentes de marea. El modelo se ha forzado con descargas en diferentes áreas para ver cómo las gestiona numéricamente, pero sin el objetivo de estudiar en detalle su influencia, se ha centrado los esfuerzos en la principal descarga, la presa de Alcalá.
- el objetivo 3 sigue estando fase intermedia a falta de tener un conocimiento preciso de la extensión y ubicación de los posibles llanos mareales. Tanto las observaciones directas (por navegación a lo largo del estuario) como la inferencias indirectas (por inspección de las salidas del modelo) no sugieren su existencia en la configuración actual (los márgenes están levantados para evitar inundaciones de los terrenos adyacentes). En cualquier caso, se buscará información de las zonas inundables en las correspondientes instituciones.
- el objetivo 5, sobre el futuro nivel del mar bajo escenarios debido al cambio climático, se encuentra en fase avanzada, el esquema básico de trabajo está totalmente implementado. Estamos pendiente de fijar la mejor configuración del modelo para abordar esta cuestión. En particular, necesitamos fijar la ubicación de la superficie libre sin mareas respecto al nivel en Alicante.
- objetivo prioritario 7 se encuentra en fase intermedia. Se han recopilado los datos de salinidad y temperatura y se han realizado simulaciones preliminares. Se pondrá mayor esfuerzo en modelizar la cuña salina.
- en este semestre se tiene la intención de empezar a implementar el módulo 8 de sedimentos en la medida que la carga de trabajo del resto de objetivos lo permita.

En el tercer semestre el modelo barotrópico estará plenamente operacional y esperamos que en la medida que las observaciones lo permitan, el baroclino también lo esté. Las futuras actuaciones se recogen en la tabla 5 .

Durante el tercer semestre se dará por concluido y validado el modelo barotrópico (se fijarán las mallas y la batimetría definitivas y se espera terminar la calibración-validación del modelo numérico), se pondrá a punto el modelo baroclino y se finalizarán las actividades que están en fase avanzada como la recopilación de información científica y técnica referente al estuario del Guadalquivir.

Se desarrollarán simulaciones de diferentes escenarios de dragados, se estudiarán los efectos de los dragados de mantenimiento, se analizará con más detalle las descargas reales, se prestará atención a la posibilidad de poder inundar extensiones importantes de terreno y quizás la parte que llevará más tiempo, y más incertidumbre, la puesta en marcha del modelo baroclino. En la medida que se avancemos más será posible concretar los tiempos necesarios.

Tercer semestre.	Desarrollo	Finalización
Recopilación de información.		X
Capacidades computacionales		X
Generación de malla y Batimetría		X
Forzamientos de contorno.		X
Calibración-Validación.		X
Simulación de escenarios: Dragados	X	
Simulación escenarios: Zonas inundables	X	
Simulación escenarios: Descargas presa Alcalá		X
Puesta a punto modelo baroclino.	X	

Tabla 5. Futuras actuaciones en el tercer semestre y finalización de tareas.

La parte más ardua consistirá en elaborar un informe más detallado que cierre el presente convenio con los hitos conseguidos a lo largo de los dos años de trabajo y que permite una base sólida para las futuras extensiones de este conocimiento del estuario. También tomará tiempo preparar algunas publicaciones que creemos interesantes para

dar a conocer a la comunidad científica los principales resultados de propagación de la señal de marea en el estuario del modelo barotrópico.

Los resultados preliminares de este segundo semestre se han dado a conocer en la conferencia internacional European Geosciences Union General Assembly EGU, Viena, Austria, Abril 2017 EGU 2017 durante los días 23-28 de Abril bajo el nombre “Modelling extreme climatic events in Guadalquivir Estuary (Spain)”. En la sección “Extreme meteorological and hydrological events induced by severe weather and climate change”.

Anexo 1.

Tablas de marea.

Desde el principio del Convenio de Investigación entre la Autoridad Portuaria de Sevilla (en adelante APS) y la Universidad de Málaga (UMA), se identificaron que tipo de salidas del modelo tridimensional hidrodinámico podían potenciar el transporte marítimo y la gestión del Puerto de Sevilla en un marco de eficiencia y sostenibilidad ambiental. Un objetivo prioritario del presente convenio era abordar la evolución de la lámina de agua en el estuario, compuesta por la batimetría, que periódicamente revisa la APS, y las fluctuaciones de la superficie que se propagan desde la plataforma hasta la presa de Alcalá del Río, de carácter mareal y dominado por la M₂. Con un fondo característico de 6-7 m, estas fluctuaciones de 1-2m modifican sustancialmente el fondo y por tanto condicionan el calado máximo (tipo de buque y carga transportada).

Predicción modelo	Estacion1	Bonanza	Estacion3	Estacion4	Estacion5	Estacion6	Estacion7	Estacion8	Sevilla	Estacion10	Estacion11	Alcalá del Río
Posición Est.												
Longitud Est.	-6.51674472	-6.33851313	-6.30195946	-6.24417029	-6.18673609	-6.08862659	-6.10182740	-6.05452757	-6.00722377	-6.01999557	-5.9906	-5.9759
Latitud Est.	36.80081055	36.80432334	36.90695027	36.89232777	36.94075280	37.06423452	37.15431578	37.27076765	37.31874290	37.38294552	37.4615	37.5181
Dist (km_Bonanza)	-16.97669195	0.00000000	13.73559440	19.83099655	27.77822726	45.41951428	55.72619251	70.22541344	77.02774741	84.14733185	93.8889	102.5961
Fondo Est.	13.04129441	7.87007243	6.52695374	10.43529695	6.38306914	7.26604872	6.65436379	7.59237492	6.20316161	8.07685138	5.17912214	1.5000
Hora Local												
2017-01-06 04:05:00	-0.52448261	-0.51791656	-0.51791656	-0.51584290	-0.48477325	-0.42712581	-0.39015022	-0.39063385	-0.26442188	-0.25984502	-0.25553697	-0.1524
2017-01-06 04:10:00	-0.50420004	-0.55151844	-0.55151844	-0.52250791	-0.49687135	-0.44666243	-0.41258252	-0.32687816	-0.29162690	-0.28691333	-0.28208744	-0.1759
2017-01-06 04:15:00	-0.48300652	-0.53437895	-0.53437895	-0.52920479	-0.50629285	-0.46376732	-0.43450344	-0.35256299	-0.31822997	-0.31337511	-0.30800606	-0.1987
2017-01-06 04:20:00	-0.46093762	-0.51615947	-0.51615947	-0.52393633	-0.53093284	-0.48433924	-0.45616290	-0.37766588	-0.34422949	-0.33925299	-0.33437393	-0.2289
2017-01-06 04:25:00	-0.43899837	-0.49656794	-0.49656794	-0.54002160	-0.52907777	-0.50237936	-0.47226844	-0.40217030	-0.36962405	-0.40217030	-0.35844648	-0.2424
2017-01-06 04:30:00	-0.41451621	-0.47608781	-0.47608781	-0.54396623	-0.53839839	-0.51976198	-0.49784595	-0.42666586	-0.39441532	-0.38932610	-0.38209812	-0.2032
2017-01-06 04:35:00	-0.39018187	-0.45513582	-0.45513582	-0.52386427	-0.54682065	-0.54694122	-0.53645539	-0.51786941	-0.44934586	-0.41868688	-0.41351798	-0.0679222
2017-01-06 04:40:00	-0.36513794	-0.43318126	-0.43318126	-0.52065438	-0.54851419	-0.55463976	-0.55241680	-0.53727633	-0.47281592	-0.44220421	-0.43717933	-0.3025887
2017-01-06 04:45:00	-0.33945262	-0.41041662	-0.41041662	-0.54899222	-0.56137139	-0.56761211	-0.55681174	-0.49488938	-0.46520799	-0.46832086	-0.45252425	-0.3222
2017-01-06 04:50:00	-0.31311265	-0.38676983	-0.38676983	-0.54820585	-0.56705892	-0.58201039	-0.57402635	-0.51556659	-0.48762635	-0.48294502	-0.47580504	-0.3408
2017-01-06 04:55:00	-0.28699151	-0.36249336	-0.36249336	-0.56319889	-0.54611146	-0.57158985	-0.59582321	-0.59127825	-0.53646863	-0.50945181	-0.50506812	-0.3589
2017-01-06 05:00:00	-0.25518444	-0.33697993	-0.33697993	-0.54266924	-0.57486665	-0.60829628	-0.60773379	-0.55670958	-0.53072458	-0.52669072	-0.51969090	-0.3765
2017-01-06 05:05:00	-0.23055163	-0.31163126	-0.31163126	-0.48471373	-0.53783816	-0.57688033	-0.62011278	-0.62336421	-0.57651991	-0.55145949	-0.54781151	-0.54103667
2017-01-06 05:10:00	-0.20226353	-0.28589895	-0.28589895	-0.47336569	-0.53167445	-0.57727873	-0.63099317	-0.63814491	-0.59564614	-0.57167871	-0.56844830	-0.56197369
2017-01-06 05:15:00	-0.17361307	-0.25909298	-0.25909298	-0.40068928	-0.52399582	-0.57683464	-0.64084238	-0.65208467	-0.61415410	-0.59136635	-0.58661351	-0.58249384
2017-01-06 05:20:00	-0.14462875	-0.23177525	-0.23177525	-0.51431435	-0.57297927	-0.64991165	-0.66597113	-0.63202435	-0.61054593	-0.60829473	-0.60626591	-0.4422
2017-01-06 05:25:00	-0.11532329	-0.20432252	-0.20432252	-0.43189059	-0.50280815	-0.65196268	-0.67116094	-0.64923866	-0.62920106	-0.62748933	-0.62326772	-0.4575
2017-01-06 05:30:00	-0.08577285	-0.17623045	-0.17623045	-0.41428951	-0.48909506	-0.66349429	-0.68838079	-0.66574867	-0.64731886	-0.64621222	-0.64148333	-0.4723
2017-01-06 05:35:00	-0.05697666	-0.14802933	-0.14802933	-0.47598121	-0.55449927	-0.66839624	-0.69841731	-0.68152648	-0.66487521	-0.66447204	-0.66022921	-0.4867
2017-01-06 05:40:00	-0.02640512	-0.11949035	-0.11949035	-0.37187873	-0.46053773	-0.54484802	-0.61787444	-0.70744544	-0.69056748	-0.68184197	-0.68252402	-0.68537807
2017-01-06 05:45:00	0.00343428	-0.09160289	-0.09160289	-0.31671165	-0.44305868	-0.53242384	-0.67353381	-0.71530384	-0.71881468	-0.69533908	-0.69638085	-0.5142
2017-01-06 05:50:00	0.03232335	-0.06282952	-0.06282952	-0.33515719	-0.42566916	-0.52032250	-0.67353600	-0.72189885	-0.72432315	-0.71380668	-0.71630657	-0.71377754
2017-01-06 05:55:00	0.06252544	-0.03519278	-0.03519278	-0.40649892	-0.48560456	-0.61647773	-0.72712451	-0.73897385	-0.72887629	-0.73512959	-0.73678842	-0.5399
2017-01-06 06:00:00	0.09240604	-0.00968877	-0.00968877	-0.28064641	-0.38693909	-0.48932156	-0.60779916	-0.74876484	-0.74318027	-0.74611596	-0.74745228	-0.5251
2017-01-06 06:05:00	0.12349553	0.02253939	0.02253939	-0.26497769	-0.36435682	-0.47158855	-0.66194630	-0.73291999	-0.75965577	-0.75674719	-0.76308131	-0.5639
2017-01-06 06:10:00	0.15318156	0.05278419	0.05278419	-0.24067946	-0.34174922	-0.45259628	-0.65405405	-0.73338521	-0.76953986	-0.77738374	-0.77852869	-0.5752
2017-01-06 06:15:00	0.18241752	0.08303022	0.08303022	-0.21647286	-0.31856173	-0.43249923	-0.64405923	-0.73191935	-0.77845687	-0.78151502	-0.79999023	-0.5866
2017-01-06 06:20:00	0.21079236	0.11395676	0.11395676	-0.19239309	-0.29489870	-0.41133735	-0.63185751	-0.72843796	-0.78620666	-0.79261649	-0.80382610	-0.80768788
2017-01-06 06:25:00	0.23519372	0.14567213	0.14567213	-0.16852781	-0.27072865	-0.38920897	-0.61738437	-0.72286624	-0.79272825	-0.80279332	-0.81595969	-0.82133084
2017-01-06 06:30:00	0.26749641	0.17955115	0.17955115	-0.14456742	-0.24634613	-0.36634576	-0.60873054	-0.71511585	-0.79788542	-0.81196731	-0.82724100	-0.83439976
2017-01-06 06:35:00	0.29559863	0.20913102	0.20913102	-0.12132140	-0.22203162	-0.34294614	-0.58202881	-0.70510954	-0.80151200	-0.82004178	-0.83765203	-0.84655209
2017-01-06 06:40:00	0.32118402	0.23963453	0.23963453	-0.09782394	-0.19778456	-0.31918622	-0.56168798	-0.69271231	-0.80343282	-0.82609878	-0.84712454	-0.85800615
2017-01-06 06:45:00	0.34644645	0.26989326	0.26989326	-0.07197923	-0.17348500	-0.29493597	-0.54095958	-0.67787355	-0.83228278	-0.85545492	-0.87662116	-0.88424
2017-01-06 06:50:00	0.37084940	0.29708132	0.29708132	-0.04635305	-0.14894581	-0.27062547	-0.51667889	-0.60602278	-0.80162126	-0.83613241	-0.86241621	-0.87829793
2017-01-06 06:55:00	0.40164152	0.32406534	0.32406534	-0.02034332	-0.12339600	-0.24634370	-0.49284834	-0.64118171	-0.79571596	-0.83847231	-0.86889522	-0.88787780
2017-01-06 07:00:00	0.43493971	0.40031504	0.40031504	-0.00592692	-0.22084009	-0.22084009	-0.46844849	-0.61977357	-0.79092550	-0.83919150	-0.87243635	-0.89471209
2017-01-06 07:05:00	0.45037478	0.37336666	0.37336666	0.03231329	-0.07211465	-0.19755957	-0.44361839	-0.59789977	-0.78137141	-0.83707658	-0.87528402	-0.90122175
2017-01-06 07:10:00	0.47349871	0.40031504	0.40031504	0.03688375	-0.04577278	-0.17286081	-0.41845155	-0.57334460	-0.76889235	-0.83265602	-0.87055467	-0.90469800
2017-01-06 07:15:00	0.49578369	0.42529655	0.42529655	0.08401126	-0.01934569	-0.14756501	-0.39308417	-0.54876679	-0.75360304	-0.82550377	-0.87601089	-0.91010022

Figura-anexo 1. Muestra de tabla de evolución de la superficie libre del 2017 con respecto a la superficie de no movimiento en las ubicaciones indicadas en la Fig-anexo 2. Se presenta un valor cada 10 minutos. La extensión de la tabla es de unas 100000 líneas.

La solución más simple a este problema de navegación por el estuario es determinar en todo el canal de navegación que sección tiene la menor profundidad (mínimo absoluto) y en dicha sección tomar el menor valor posible (prácticamente aquél que se observaría durante la bajamar en mareas vivas). Este valor del fondo y una cierta distancia de seguridad la configuración configurará el *calado máximo estático*, así, en estas condiciones cualquier barco con un calado inferior a éste valor navegaría por todo el estuario con independencia de la marea. Otra solución consiste en identificar otras secciones con un fondo somero (mínimos locales) y analizar en qué momentos del ciclo de marea se permite el paso de barcos con un determinado calado (*calado dinámico*). Esta idea es la que básicamente utiliza la APS con la utilización de los coeficientes de marea y la que se pretende reforzar con el uso de las salidas del modelo hidrodinámico barotrópico de

muy alta resolución, descrito en el primer informe semestral del citado Convenio. Para ello se han continuado generando tablas de predicciones del nivel de la superficie libre/lámina de agua y de tiempos de ocurrencia de la pleamar y la bajamar para el presente año 2017 (ver Fig-anexo 1 y 3).

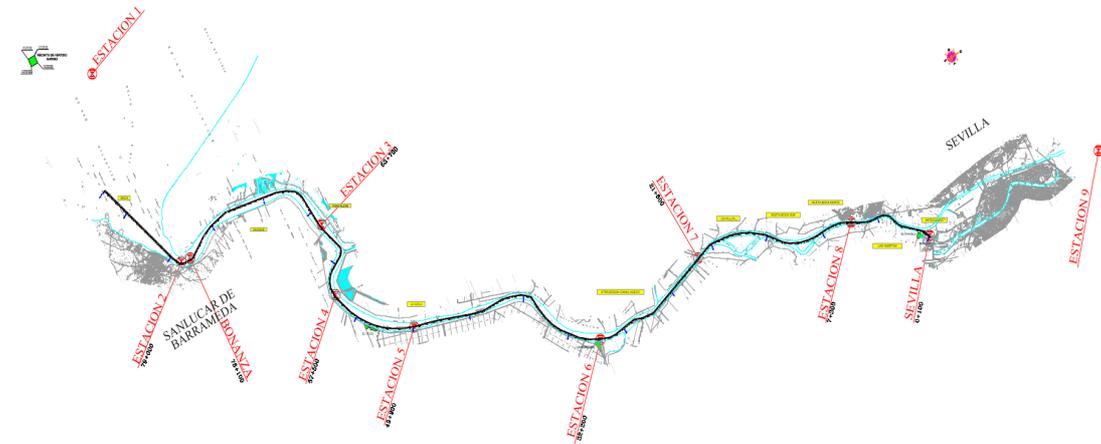


Figura-anexo 2. Ubicación de las estaciones utilizadas para las salidas de las tablas Fig-anexo1 y Fig-anexo3. La estación 2 y 9 no se utiliza en esta salida. Las estaciones 10, 11 y Alcalá del Río no se muestran en esta figura puesto que se encuentran fuera del canal de navegación aunque se mantienen en las tablas por cuestiones de validación con los catos de la confederación hidrográfica del Guadalquivir.

Predicción modelo	Estacion1	Bonanza	Estacion3	Estacion4	Estacion5	Estacion6	Estacion7	Estacion8	Sevilla	Estacion10	Estacion11	Alcalá del Río
Postcion Est.												
Longitud Est.	-6.51674472	-6.33851333	-6.38195846	-6.24417029	-6.18673609	-6.08862659	-6.10182740	-6.05452757	-6.08722377	-6.01999557	-5.9986	-5.9759
Lattitud Est.	36.89081055	36.88432334	36.98065927	36.89232777	36.94875280	37.06423452	37.15431578	37.27076765	37.31874290	37.38294552	37.4615	37.5181
Dist (km_0_Bonanza)	-16.97669195	0.00000000	13.73559440	19.83898965	27.77822726	45.41951428	55.72619251	70.22541344	77.02774741	84.14733185	93.8889	102.5961
Fondo Est.												
	13.04129441	7.87097243	6.52695374	10.43529995	6.38306914	7.26684872	6.65436379	7.59237492	6.20316161	8.07685138	5.17912214	1.5800
Estacion1 Bonanza Estacion3 Estacion4 Estacion5 Estacion6 Estacion7 Estacion8 Sevilla Estacion10 Estacion11 Alcalá del Río												
Estadística nivel durante la pleamar (n)												
Medio+std	1.176	1.154	0.922	0.918	0.905	0.955	1.047	1.199	1.288	1.400	1.501	1.466
Medio	0.900	0.879	0.697	0.699	0.697	0.765	0.855	0.991	1.067	1.158	1.240	1.198
Medio-std	0.423	0.465	0.471	0.481	0.489	0.576	0.664	0.783	0.845	0.917	0.979	0.930
Máximo	1.488	1.464	1.186	1.176	1.154	1.187	1.275	1.437	1.539	1.669	1.787	1.759
Mínimo	27Apr17-04:20	27Apr17-04:32	27Apr17-05:26	27Apr17-05:45	27Apr17-06:07	27Apr17-06:59	27Apr17-07:34	27Apr17-08:07	27Apr17-08:20	27Apr17-08:29	27Apr17-08:35	27Apr17-08:40
	30Aug17-22:54	30Aug17-23:10	31Aug17-08:23	31Aug17-08:44	31Aug17-09:12	31Aug17-09:58	31Aug17-10:11	31Aug17-10:29	31Aug17-10:33	31Aug17-10:37	31Aug17-10:42	31Aug17-10:48
Estadística nivel durante la bajamar (n)												
Medio+std	-0.626	-0.613	-0.536	-0.561	-0.592	-0.678	-0.728	-0.795	-0.827	-0.859	-0.893	-0.887
Medio	-0.900	-0.855	-0.671	-0.692	-0.716	-0.801	-0.852	-0.919	-0.954	-0.991	-1.031	-0.864
Medio-std	-1.173	-1.098	-0.886	-0.822	-0.841	-0.923	-0.976	-1.043	-1.081	-1.123	-1.169	-0.921
Máximo	-0.260	-0.267	-0.292	-0.320	-0.353	-0.428	-0.470	-0.529	-0.554	-0.576	-0.599	-0.619
Mínimo	29Sep17-04:11	29Sep17-04:31	29Sep17-05:58	29Sep17-06:19	29Sep17-06:38	29Sep17-07:11	29Sep17-07:27	29Sep17-07:55	29Sep17-08:06	29Sep17-08:17	29Sep17-08:26	29Sep17-08:52
	24Jul17-23:10	24Jul17-23:32	25Jul17-01:12	25Jul17-01:32	25Jul17-01:55	25Jul17-02:39	25Jul17-03:04	25Jul17-03:44	25Jul17-04:03	25Jul17-04:18	25Jul17-04:34	25Jul17-05:30
Momento de la pleamar/bajamar (n)												
Nivel máximo/mínimo en la pleamar/bajamar (n)												
Pleamar	06Jan17-08:54	06Jan17-21:52	06Jan17-22:55	06Jan17-23:14	06Jan17-23:39	07Jan17-00:36	07Jan17-00:59	07Jan17-01:25	07Jan17-01:35	07Jan17-01:40	07Jan17-01:46	07Jan17-01:53
η (n)	0.738	0.618	0.475	0.483	0.490	0.572	0.665	0.788	0.854	0.929	0.995	0.947
Bajamar	06Jan17-15:19	06Jan17-15:39	06Jan17-17:10	06Jan17-17:29	06Jan17-17:53	06Jan17-18:30	06Jan17-18:52	06Jan17-19:27	06Jan17-19:43	06Jan17-19:56	06Jan17-20:09	06Jan17-20:55
η (n)	-0.784	-0.761	-0.660	-0.686	-0.717	-0.801	-0.851	-0.917	-0.950	-0.984	-1.019	-0.871
Pleamar	06Jan17-21:39	07Jan17-10:20	07Jan17-11:21	07Jan17-11:40	07Jan17-12:05	07Jan17-13:01	07Jan17-13:23	07Jan17-13:49	07Jan17-13:59	07Jan17-14:05	07Jan17-14:11	07Jan17-14:17
η (n)	0.637	0.691	0.545	0.553	0.561	0.645	0.739	0.864	0.930	1.007	1.073	1.026
Bajamar	07Jan17-03:49	07Jan17-04:07	07Jan17-05:37	07Jan17-05:56	07Jan17-06:20	07Jan17-06:58	07Jan17-07:19	07Jan17-07:53	07Jan17-08:09	07Jan17-08:22	07Jan17-08:34	07Jan17-09:17
η (n)	-0.696	-0.679	-0.586	-0.611	-0.643	-0.728	-0.779	-0.847	-0.880	-0.914	-0.940	-0.841
Pleamar	07Jan17-10:06	07Jan17-23:04	08Jan17-00:05	08Jan17-00:24	08Jan17-00:40	08Jan17-01:45	08Jan17-02:08	08Jan17-02:35	08Jan17-02:45	08Jan17-02:51	08Jan17-02:57	08Jan17-03:03
η (n)	0.799	0.679	0.530	0.537	0.543	0.625	0.719	0.844	0.912	0.990	1.058	1.012
Bajamar	07Jan17-16:29	07Jan17-16:49	07Jan17-18:19	07Jan17-18:38	07Jan17-19:01	07Jan17-19:39	07Jan17-20:01	07Jan17-20:36	07Jan17-20:53	07Jan17-21:05	07Jan17-21:19	07Jan17-22:05
η (n)	-0.784	-0.761	-0.659	-0.684	-0.715	-0.799	-0.849	-0.915	-0.949	-0.983	-1.018	-0.870
Pleamar	07Jan17-22:50	08Jan17-11:33	08Jan17-12:34	08Jan17-12:52	08Jan17-13:17	08Jan17-14:13	08Jan17-14:37	08Jan17-15:04	08Jan17-15:14	08Jan17-15:21	08Jan17-15:27	08Jan17-15:33

Figura-anexo 3. Tabla con los instantes de pleamar y bajamar así como la altura alcanzada en cada una de las estaciones (ver Fig-anexo 2) con respecto a la superficie de no movimiento. El número de líneas del documento se reduce a unas 3000 líneas.

En reuniones mantenidas con los principales responsables de la navegación en el estuario se evidenció la necesidad de buscar una transición entre el esquema actual de trabajo, basado en las tablas con los coeficientes de marea en el estuario, y las alturas de marea que proporciona el modelo. Con objeto de facilitar esta transición se pensó en

generar una tabla muy similar a la de coeficientes de marea pero con los rangos de marea en Bonanza. Como se puede apreciar en la Fig-anexo 4, esta tabla resume la información temporal en Bonanza con dos valores diarios y complementa la información espacial con una relación de amplitud entre cualquier estación y Bonanza; dicha relación de amplitud se genera para diferentes rangos de marea en Bonanza. Las ventajas son obvias, un cambio gradual en el esquema de trabajo actual y un soporte muy manejable (la tabla ocupa las dos caras de una hoja A4). El principal inconveniente es una simplificación excesiva que sacrifica tanto los detalles espaciales como los temporales de la propagación de la marea entre Bonanza y Sevilla.

Figura-anexo 4. Tabla con los instantes de pleamar y bajamar así como la altura alcanzada en cada una de las estaciones de la Fig-anexo2. El número de líneas del documento se reduce a unas 3000 líneas.

Rangos de marea (m) en distintos lugares de la Ría

Est.1	Bonanza	Est.3	Est.4	Est.5	Est.6	Est.7	Est.8	Sev.	Est10	Est11	AlcR
Longitud Est.											
-6.52	-6.34	-6.30	-6.24	-6.19	-6.09	-6.10	-6.05	-6.01	-6.02	-5.99	-5.98
Latitud Est.											
36.80	36.80	36.91	36.89	36.94	37.06	37.15	37.27	37.32	37.38	37.46	37.52
Dist (km_0_Bonanza)											
-17.0	0.00	13.74	19.83	27.78	45.42	55.73	70.23	77.03	84.15	93.88	102.6
Fondo Est.											
13.04	7.87	6.53	10.44	6.38	7.27	6.65	7.59	6.20	8.08	5.18	1.50
0.72	0.71	0.66	0.71	0.76	0.94	1.06	1.21	1.27	1.34	1.40	1.34 (1.7 %)
0.86	0.81	0.73	0.77	0.83	1.01	1.13	1.29	1.36	1.44	1.51	1.44 (2.1 %)
0.89	0.90	0.80	0.84	0.89	1.07	1.20	1.37	1.44	1.53	1.60	1.52 (2.7 %)
1.09	1.03	0.88	0.92	0.97	1.15	1.28	1.45	1.54	1.63	1.71	1.60 (2.8 %)
1.13	1.12	0.95	0.99	1.04	1.22	1.35	1.53	1.62	1.72	1.81	1.69 (4.5 %)
1.25	1.23	1.03	1.06	1.11	1.28	1.43	1.61	1.70	1.81	1.90	1.77 (6.0 %)
1.36	1.32	1.09	1.12	1.16	1.34	1.48	1.67	1.77	1.88	1.97	1.82 (7.8 %)
1.49	1.43	1.17	1.20	1.23	1.40	1.55	1.74	1.84	1.96	2.06	1.89 (7.0 %)
1.59	1.52	1.23	1.26	1.29	1.45	1.60	1.80	1.90	2.02	2.13	1.95 (5.3 %)
1.68	1.63	1.30	1.33	1.36	1.51	1.66	1.87	1.98	2.10	2.22	2.02 (6.9 %)
1.81	1.74	1.37	1.39	1.42	1.57	1.72	1.92	2.04	2.17	2.29	2.07 (6.4 %)
1.89	1.82	1.43	1.45	1.47	1.62	1.77	1.98	2.10	2.23	2.36	2.14 (6.3 %)
2.02	1.94	1.51	1.52	1.54	1.68	1.83	2.04	2.16	2.31	2.44	2.20 (6.7 %)
2.09	2.02	1.56	1.58	1.59	1.73	1.87	2.09	2.21	2.36	2.49	2.24 (4.6 %)
2.23	2.13	1.64	1.65	1.66	1.79	1.94	2.15	2.28	2.43	2.57	2.30 (5.0 %)
2.32	2.23	1.70	1.71	1.72	1.84	1.99	2.20	2.33	2.49	2.63	2.35 (6.7 %)
2.48	2.34	1.77	1.78	1.78	1.90	2.04	2.26	2.39	2.55	2.70	2.40 (5.2 %)
2.55	2.45	1.84	1.85	1.84	1.96	2.10	2.32	2.45	2.62	2.78	2.46 (6.3 %)
2.60	2.54	1.92	1.92	1.91	2.03	2.17	2.40	2.53	2.70	2.86	2.56 (4.5 %)
2.70	2.63	1.97	1.97	1.97	2.08	2.22	2.44	2.58	2.76	2.92	2.62 (1.3 %)

Identificado la problemática que supone la utilización de las tablas tanto de nivel instantáneo como de ocurrencia de la pleamar-bajamar, aun llevando una reducción importante puesto que sólo incluye la información en 12 estaciones, se ideó crear una herramienta de visualización de la lámina de agua en la canal de navegación. Para ello, se ha creado una interfaz gráfica en matlab (**Visualización de la lámina de agua**) que carga las salidas del modelo sobre un periodo concreto (a lo largo de una año) en un conjunto de ubicaciones.

Sustituto de los coeficiente de marea para el año 2017
(Rangos de marea (m) en Bonanza para el año 2017)

Día mes 2Uc	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12
1	----	----	2.1	1.9	2.5	2.4	2.2	1.9	1.8	1.6	1.4	1.3
2	----	----	1.9	1.7	2.4	2.2	1.8	1.5	1.5	1.3	1.3	1.3
3	----	----	1.7	1.5	2.1	1.9	1.4	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3
4	----	----	1.4	1.3	1.8	1.5	1.2	1.1	1.3	1.3	1.4	1.4
5	----	----	1.3	1.3	1.4	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5
6	----	1.4	1.3	1.4	1.2	1.1	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6
7	1.4	1.4	1.5	1.7	1.2	1.3	1.7	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7
8	1.5	1.6	1.8	2.0	1.4	1.6	2.0	2.0	1.9	1.9	1.8	1.7
9	1.7	1.9	2.1	2.2	1.8	1.9	2.1	2.2	2.0	2.0	1.8	1.7
10	1.9	2.1	2.3	2.4	2.0	2.2	2.2	2.2	2.0	2.0	1.8	----
11	2.2	2.3	2.4	----	2.2	2.4	2.2	2.2	2.0	1.9	1.7	1.8
12	2.3	2.4	2.5	2.4	2.3	2.4	----	2.1	----	1.9	1.7	1.8
13	----	2.4	2.5	2.3	----	2.3	2.1	2.0	1.8	1.8	1.6	1.7
14	2.5	2.3	2.3	2.1	2.4	2.2	1.9	1.8	1.6	1.6	1.5	1.6
15	2.4	2.2	2.1	1.8	2.3	2.1	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.4
16	2.2	2.0	1.8	1.5	2.0	1.8	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
17	2.0	1.7	1.4	1.2	1.8	1.6	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3
18	1.7	1.4	1.1	0.9	1.4	1.3	0.9	0.9	1.0	1.0	1.3	1.3
19	1.4	1.2	0.8	0.7	1.1	1.0	0.8	0.8	1.0	1.1	1.4	1.5
20	1.1	1.0	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.2	1.3	1.6	1.7
21	0.9	0.9	0.8	0.9	0.7	0.7	1.1	1.2	1.4	1.6	1.9	2.0
22	0.8	0.9	1.1	1.3	0.8	0.9	1.4	1.6	1.8	1.9	2.2	2.2
23	0.9	1.1	1.4	1.6	1.1	1.2	1.8	2.0	2.1	2.2	2.4	2.4
24	1.2	1.3	1.7	1.9	1.4	1.6	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5
25	1.4	1.6	2.0	2.2	1.8	2.0	2.4	2.6	2.5	2.6	----	2.5
26	1.6	1.8	2.2	2.4	2.1	2.3	2.6	2.7	2.6	----	2.4	2.5
27	1.9	2.1	----	2.4	2.4	2.6	2.6	----	2.6	2.5	2.3	2.3
28	2.0	----	2.5	2.4	2.6	2.7	2.7	2.5	2.4	2.4	2.1	2.0
29	2.2	2.1	----	----	----	2.6	2.5	2.3	2.2	2.1	1.8	1.7
30	2.3	2.2	----	----	2.7	2.5	2.2	2.0	1.9	1.8	1.5	1.5
31	2.3	2.1	----	----	2.5	2.3	----	----	1.6	1.5	----	----

	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12
1	1.3	1.2	0.9	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3	1.8	1.9	2.0	2.1
2	1.1	1.1	0.9	0.9	1.2	1.3	1.5	1.6	2.1	2.2	2.2	2.4
3	1.1	1.1	1.0	1.1	1.5	1.6	1.8	2.0	2.4	2.4	2.4	2.5
4	1.2	1.1	1.3	1.3	1.8	1.9	2.1	2.2	2.5	2.5	2.5	2.5
5	1.3	1.3	1.5	1.6	2.1	2.1	2.4	2.4	2.6	----	----	2.5
6	1.4	1.4	1.6	1.6	2.2	2.2	2.6	2.6	2.8	2.8	2.8	2.8

Figura-anexo 5. Tabla con los instantes de pleamar y bajamar así como la altura alcanzada en cada una de las estaciones de la Fig-anexo2. El número de líneas del documento se reduce a unas 3000 líneas.

En la aplicación se introduce una fecha y hora deseada, se indica un fondo y el programa genera, en código de color, si el espesor de la lámina de agua supera el fondo indicado (color verde) o no (color rojo).

En particular, el panel superior de la izquierda proporciona una visión general de la situación en el estuario; el código de color es verde si con el fondo indicado no se tiene problema alguno en toda el área de las seis predefinidas y roja si tan solo una de las estaciones presenta algún problema con valores por debajo del fondo indicado. El panel inferior izquierdo presenta la marea en Bonanza, Sevilla y en el área representada para el periodo seleccionado; esto permite de un vistazo controlar en que momento de la marea nos encontramos, esto es, si el nivel aumentará o disminuirá con el tiempo. El panel de la derecha ocupa toda la zona y proporciona información detallada en cada una de las estaciones sobre si el fondo seleccionado permite la navegación (color verde) o no permite la navegación (color rojo).

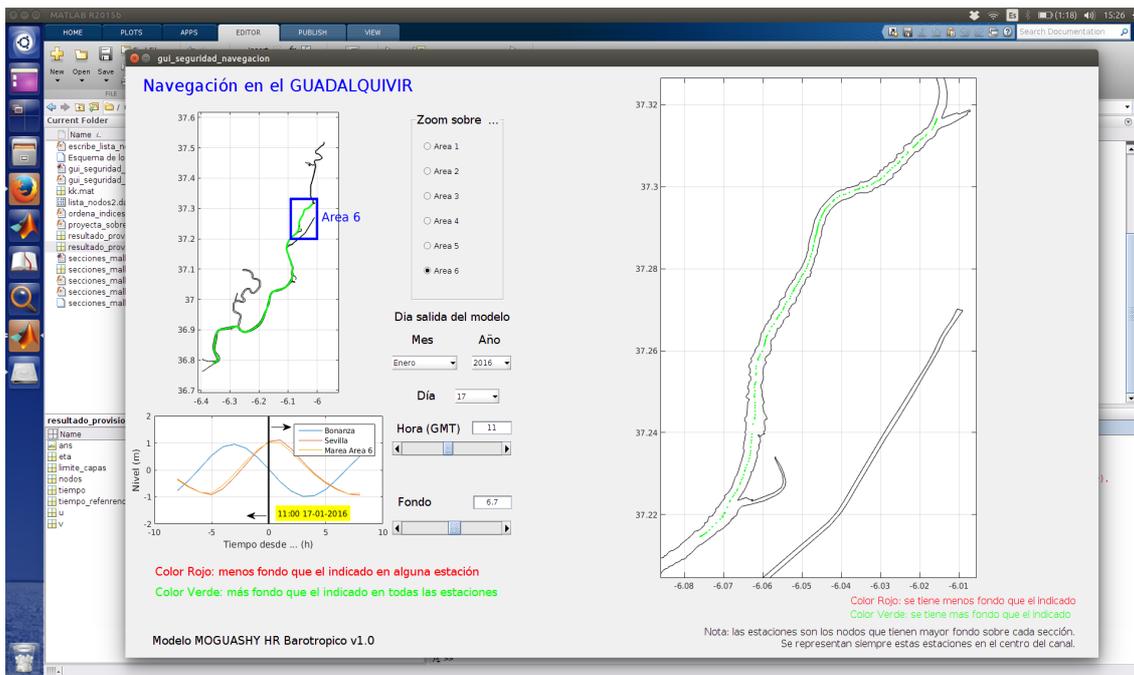


Figura-anexo 6. Programa de ayuda a la navegación **Visualización de la lámina de agua**. Básicamente se tienen tres paneles, dos a la izquierda y uno a la derecha, y un conjunto central de botones, desplegables y deslizadores que permitan seleccionar la información a representar en los paneles.

Básicamente se genera en un archivo de texto plano con un conjunto de nodos de los que extraer las series temporales (en este momento se requiere utilizar varias rutinas conjuntamente para hacer esta tarea), se ejecuta un comando linux para extraer la serie temporal en las estaciones indicadas (se genera una base de datos bastante pesada, cerca de 1 GB) y finalmente se carga el módulo que carga el programa interactivo. Los archivos que se necesitan son: la malla del modelo en formato matlab, las salidas de una simulación del modelo y los puntos que definen el canal de navegación.

La aplicación se encuentra operativa aunque tiene pendiente depurar el conjunto de procesos que se necesitan ejecutar para conseguir cargar la información en la herramienta de visualización. En este momento, las 946 estaciones que definen el canal de navegación, se seleccionan como los nodos de la malla del modelo con mayor fondo sobre cada sección; para ello, actualmente se busca un conjunto de nodos entre las riberas del río que definan una trayectoria lo más rectilínea posible que además sea perpendicular a las riberas. Después de presentar esta herramienta en una reunión mantenida en las dependencias de la APS en Febrero de 2017 se pensó en cambiar dichos nodos por la canal de navegación real en el estuario (tarea pendiente de realizar). También están pendientes de automatizar las tareas de ordenar las estaciones desde Bonanza a Sevilla, interpolar/proyectar las salidas del modelo sobre los puntos que definen el canal de navegación y escribir los nodos en un mismo programa; se quiere estructurar la programación en 3 módulos que se correspondan con el esquema planteado anteriormente. Otra modificación pendiente es permitir mediante un archivo o mediante la entrada en la ventana anterior introducir posibles modificaciones de la

batimetría que permitan actualizar los valores del fondo con las observaciones más recientes (los episodios de sedimentación cambian rápidamente la batimetría en algunas zonas de la canal de navegación).

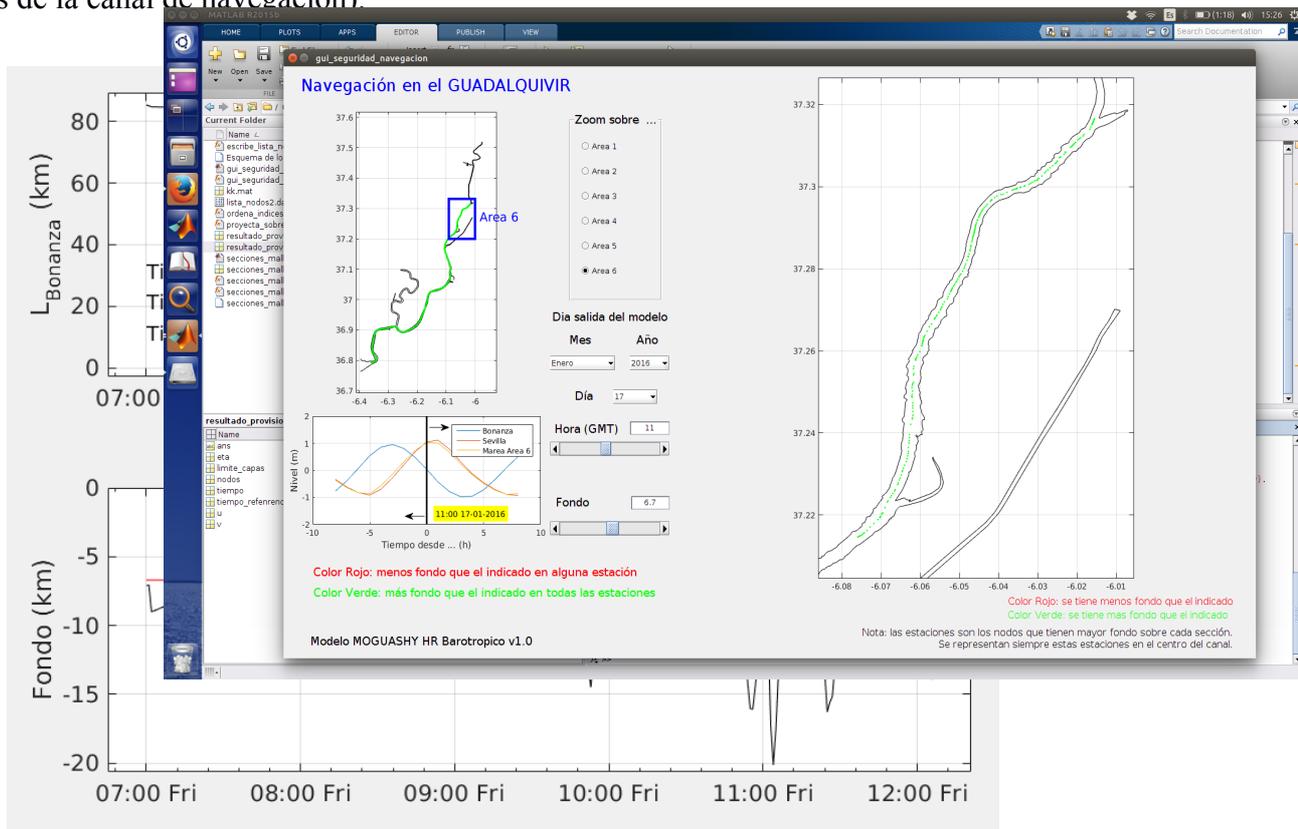


Figura-anexo 7. Salidas actuales del programa de ayuda a la navegación Planificación de la navegación. En el panel superior se representa como evoluciona la posición del buque en el estuario con el tiempo, con información en la parte inferior izquierda sobre el tiempo que el barco está navegando, el tiempo que necesita estar fondeado y el tiempo total empleado en abandonar el estuario (pasar por Bonanza). En el panel inferior se representa en cada momento el fondo que el barco estaría registrando así como una línea roja que da cuenta del calado del mismo.

También se ha hablado recientemente de generar un código que automatice la planificación de la navegación en el estuario. Se trata por tanto de generar un programa que emule el proceso de planificación para la navegación, basado actualmente en los coeficientes de marea (un sólo valor por periodo) y el momento de la pleamar en Bonanza o Sevilla (dependiendo si se trata de la subida o la bajada). La evolución de la lámina de agua en el estuario proporcionado por el modelo, simularía los fondos observados desde el barco y permitiría optimizar la hora de salida desde Sevilla o Bonanza. Comentar en este sentido que, la dificultad mayor que tiene la APS consiste en sacar barcos desde Sevilla puesto que la subida se realiza ayudado por la propia marea “montando al barco en la cresta de la ola (pleamar)” desde Bonanza hasta Sevilla. El código que se tiene actualmente simula la navegación de un barco con un calado determinado, con una velocidad de máquina uniforme que sale en un determinado momento desde Sevilla. Lo que se hace básicamente es:

1) desplazar el barco con una cierta velocidad (velocidad de máquina+velocidad de la corriente),

2) en esta ubicación se observa si hay suficiente lámina de agua o no

3a) si hay suficiente fondo para el calado del barco se continúa progresando (repetir en punto 1).

3b) si no hay suficiente fondo se vuelve a la ubicación y al instante de tiempo anterior. En esta localización se valora si parando máquinas y esperando en dicha posición la lámina de agua aumenta y esto permite progresar (se continúa con el punto 1) o si por el contrario la lámina de agua se reduce:

3b1) el barco queda varado antes de encontrarse en la situación que le permita progresar y por tanto habría que retrasar aún más la ubicación y el instante de tiempo (punto 3b)

3b2) la lámina de agua continúa reduciéndose pero el barco puede esperar en esta ubicación hasta que la marea invierta el efecto.

En la Fig-anexo 7 se presenta un barco que parte de Sevilla el 7 de Enero de 2017, con un calado de 6,4 m y con una velocidad de máquina de 10 nudos. En el panel superior se observa como tras salir del puerto, el barco necesita esperar durante un tiempo (tramo horizontal) hasta que la marea permite continuar con la navegación, unos 15 minutos antes de las 8:00. El resto de la navegación ocurre sin ninguna incidencia adicional. Esto supone que el barco requiere de 5h y 10 minutos para realizar el trayecto, de los cuales aproximadamente 40 minutos (casi al principio) los tiene que pasar esperando las condiciones adecuadas para poder progresar navegando.

Se ha realizado un programa nuevo (basado en el anterior) con objeto de simular barcos que salen a diferentes horas; se toman, con intervalos de 20 minutos, tiempos dentro de una ventana de 3 horas antes y 6 horas después. Se busca con esto optimizar la salida y para ello se contempla dos posibilidades: por un lado se optimiza el tiempo total para que sea mínimo y se optimiza el fondo mínimo observado. Por el momento se ha probado con el programa la navegación con las salidas de los mayores buques efectuadas por la APS, un total de 6 buques.

Los barcos virtuales salen del estuario (como lo hacen los reales); la cuestión es que el margen de resguardo en el modelo queda por debajo de la realidad (20-30 cm) y hay discrepancias temporales entre las optimas que dice el programa y las salidas reales. Apuntamos como posible responsable de esta discrepancia de salidas en la lámina de agua simulada a la batimetría utilizada por el modelo

Entre las posibles mejoras se plantea por un lado permitir correcciones puntuales a la batimetría gestionada por el modelo y generar una trayectoria más próxima a la realidad, en la línea de lo comentado anteriormente. Por otro lado también se plantea recalcular con las velocidades estimadas por las observaciones de las velocidades reales desarrolladas por cada uno de los barcos ... esto está pendiente de incorporarse en una futura versión del programa.

Conclusiones preliminares del estudio de modelado del estuario del Guadalquivir llevado a cabo por el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga.

(Noviembre 2017)

Dentro de este proyecto, el Grupo de Oceanografía Física tiene encomendada la tarea de poner a punto un modelo numérico del estuario del Guadalquivir que proporcione una herramienta útil para las diversas facetas que abarca la gestión del estuario, aunque existe un interés especial por parte de la Autoridad Portuaria de Sevilla (APS) en aquellos aspectos relacionados con la navegabilidad del río.

La planificación del trabajo contemplaba la implementación del modelo en dos fases diferenciadas de complejidad creciente desde el punto de vista computacional. En una primera fase se desarrollaría un modelo barotrópico del estuario (densidad homogénea y proporcionando campos de velocidades promediadas verticalmente en los nodos de la malla). En la segunda fase se abordaría el modelo baroclino en el cual se investiga la estructura tridimensional del estuario incluyendo los campos de salinidad y temperatura además de los de nivel y velocidad.

Con esta herramienta numérica se abordan subsiguientemente diversos aspectos relacionados con el uso del estuario y que quedaron recogidos en la redacción original del proyecto. De todo ello se habla sumariamente a continuación.

1.- MODELO BAROTROPICO

Es un modelo tridimensional pero en el que no existen diferencias de densidad (estuario homogéneo) y se trabaja con velocidades promediadas verticalmente. Las salidas del modelo son altura de la superficie y velocidad vertical promedio en cada nodo del dominio. Aunque el dominio es tridimensional (XYZ), las salidas que produce son bidimensionales (sólo XY, al integrarse las velocidades en la vertical).

1.1 Dominio (topografía, diferentes batimetrías, morfología)

El primer paso de la modelación numérica es la implementación del dominio, que incluye la batimetría del cauce, la morfología del río y la definición de los contornos abiertos. Para ello la APS ha facilitado un conjunto de batimetrías que cambian con el tiempo debido a los dragados periódicos de mantenimiento. Estas variaciones son un inconveniente importante porque el mallado del dominio nunca puede darse por definitivo, como ocurre en el modelado de otros entornos. Por esta razón se ha desarrollado un procedimiento que permite sustituir la topografía de tramos que sufren modificación sin tener que rehacer todo el dominio. Aparentemente simple, esta tarea puede producir discontinuidades topográficas que repercuten en el modelo ocasionando inestabilidades numéricas. Solucionar este problema no trivial ha sido un hito importante en el desarrollo del modelo.

El interés que tiene el disponer de configuraciones históricas del estuario, que son diferentes de la actual, ha llevado a conservar la información de dominios pasados para poder realizar ejercicios de comparación o de sensibilidad frente a variaciones topográficas. Todas ellas se mantienen salvaguardadas y listas para ser empleadas .

Otro hito ha sido el obtener batimetría de aquellas porciones del estuario que no son de interés directo para la navegación y sobre las que, por tanto, no existen levantamientos. Sin embargo, para el modelo numérico son tan esenciales como las demás. En esta situación estaba el extenso tramo de río entre el puerto de Sevilla y la presa de Alcalá del Río, sobre el que no se tenía información, y los afluentes subsidiarios como el Brazo de la Torre, o el Guadaira o Rivera de Huelva. Respecto al tramo aguas arriba de Sevilla, la APS promovió una campaña que ha obtenido datos batimétricos de buena calidad y resolución y que han sido facilitados recientemente (Agosto 2017) para ser incorporados al dominio del modelo. En cuanto a los subsidiarios, se ha procedido a incorporar la morfología de los mismos usando directamente

mapas de GoogleEarth y asignando profundidades razonables a falta de mejor información. Dado que estos ramales no son críticos en los estudios de propagación mareal, esta aproximación es aceptable una vez corregida y matizada en los ejercicios de calibración del modelo.

Los contornos abiertos se corresponden con la presa de Alcalá en la cabecera del estuario, donde se prescriben los caudales de agua dulce, y un arco de circunferencia en la parte de la desembocadura, dentro de la plataforma continental, donde se impone el forzamiento mareal y otro tipo de forzamientos

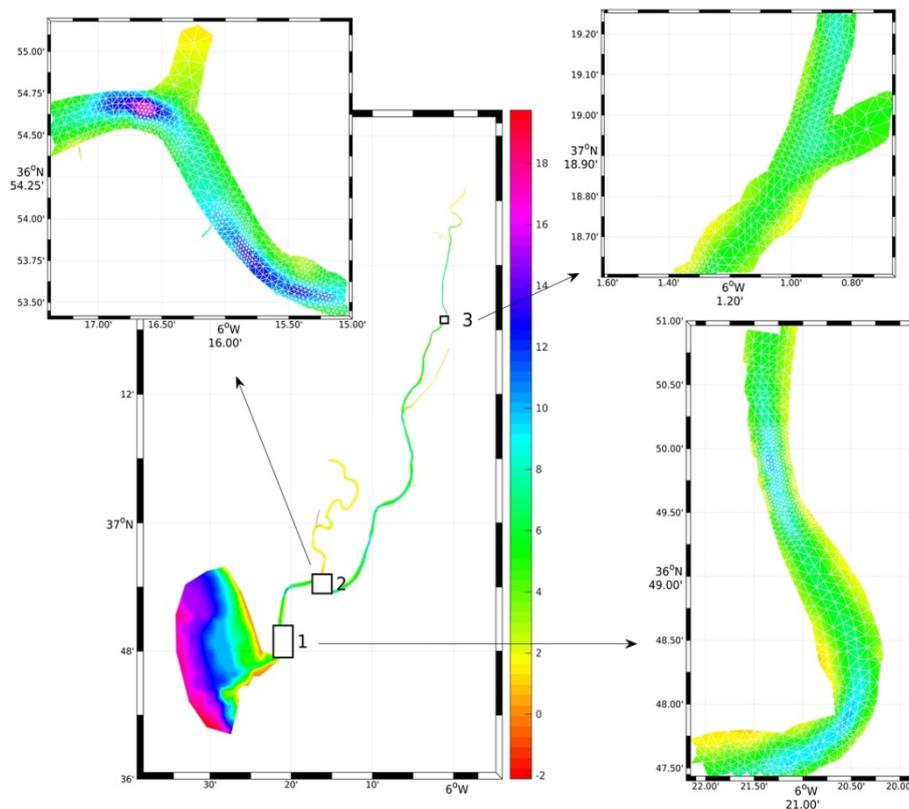


Figura 1.1.a- Dominio del modelo mostrando detalles de parte del estuario. Las condiciones de contorno se imponen en la parte oceánica (Tonos violetas en la parte inferior izquierda del mapa) y en la cabecera del estuario en la presa de Alcalá. Los colores indican profundidades de acuerdo con la escala de color.

El siguiente ejercicio de índole técnica es la definición del tamaño de los elementos de la malla, que tiene consecuencias obvias en los tiempos de ejecución y coste computacional del modelo. Para ello se generaron una serie de mallados de diferente definición y se compararon los resultados que se producían con unos y otros. Para resumir, la comparación final se realizó entre un mallado de muy alta resolución (42311 nodos) y otro de menor resolución (11185 nodos) comparándose por un lado los resultados producidos por una y otra configuración y por otra los

tiempos de ejecución. Se ha comprobado que los resultados apenas difieren en un 2%, si se utiliza la misma calibración, en tanto que los tiempos de ejecución se reducen en un 80% por lo que la decisión final tomada es trabajar con el mallado de baja resolución.

Como resultado de esta actividad y trabajo previo se ha concluido con la elaboración del dominio a modelar que incluye todas las sucesivas mejoras y refinamientos, que es considerado como el mejor de los posibles en ese equilibrio coste/resolución y que conforma la versión v.1 base de todos los sucesivos cálculos.

1.2 Forzamientos y calibración del modelo.

1.2.a Forzamientos.

El modelo tiene incorporado el forzamiento mareal en el contorno oceánico (que es el fundamental en la dinámica del estuario) y los aportes fluviales en la cabecera del estuario. El primero, de naturaleza determinista, se realiza reconstruyendo una señal periódica de nivel del mar a partir de las constituyentes armónicas más importantes (se tienen incorporadas un total de 16 constituyentes armónicas que representan más del 98% de la variabilidad mareal en el potencial generador de marea) a partir de constantes armónicas importadas de trabajos previos en la zona. Los aportes fluviales fuerzan la cabecera del modelo y pueden ser tanto ficticios (enfoque adecuado para ciertos estudios de sensibilidad) como reales, para lo cual se trabaja directamente con los datos de descargas publicados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG).

Adicionalmente a estos forzamientos básicos, el modelo está preparado para trabajar con el forzamiento radiativo y mecánico que se ejerce a través de la superficie libre (radiación solar, presión atmosférica, cizalla del viento) al que se incorporan otros fenómenos no deterministas como la marea meteorológica en su contorno oceánico abierto.

1.2.b Calibración.

Para esta tarea se precisa disponer de observaciones de nivel y de corrientes, ya que ambas son salidas del modelo.

El primer bloque lo conformarían las observaciones de nivel el cual, a su vez, abarca dos categorías de observaciones. La primera incluye las sistemáticamente recogidas en lugares

concretos donde hay estaciones permanentes de medida (Bonanza y Sevilla, mantenidas por Puertos del Estado y la propia APS, a las que se añade otra no específicamente diseñada para este fin en la cabecera del estuario mantenida por la CHG para tareas de monitorización de descargas de la presa). La segunda categoría, de especial valor por las dificultades experimentales que conlleva el adquirirlas, son las observaciones tomadas en distintas estaciones a lo largo del estuario y que son de especial interés para la calibración del modelo. Consisten en datos históricos de campañas de medida realizadas durante las últimas décadas, particularmente a finales de la primera década de este siglo en el marco del diagnóstico del estuario llevado a cabo bajo la dirección del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y datos actuales de calidad mucho más contrastada recogidos por el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y recientemente facilitadas a la APS. Estas últimas observaciones han sido las empleadas en la calibración fina definitiva del modelo.

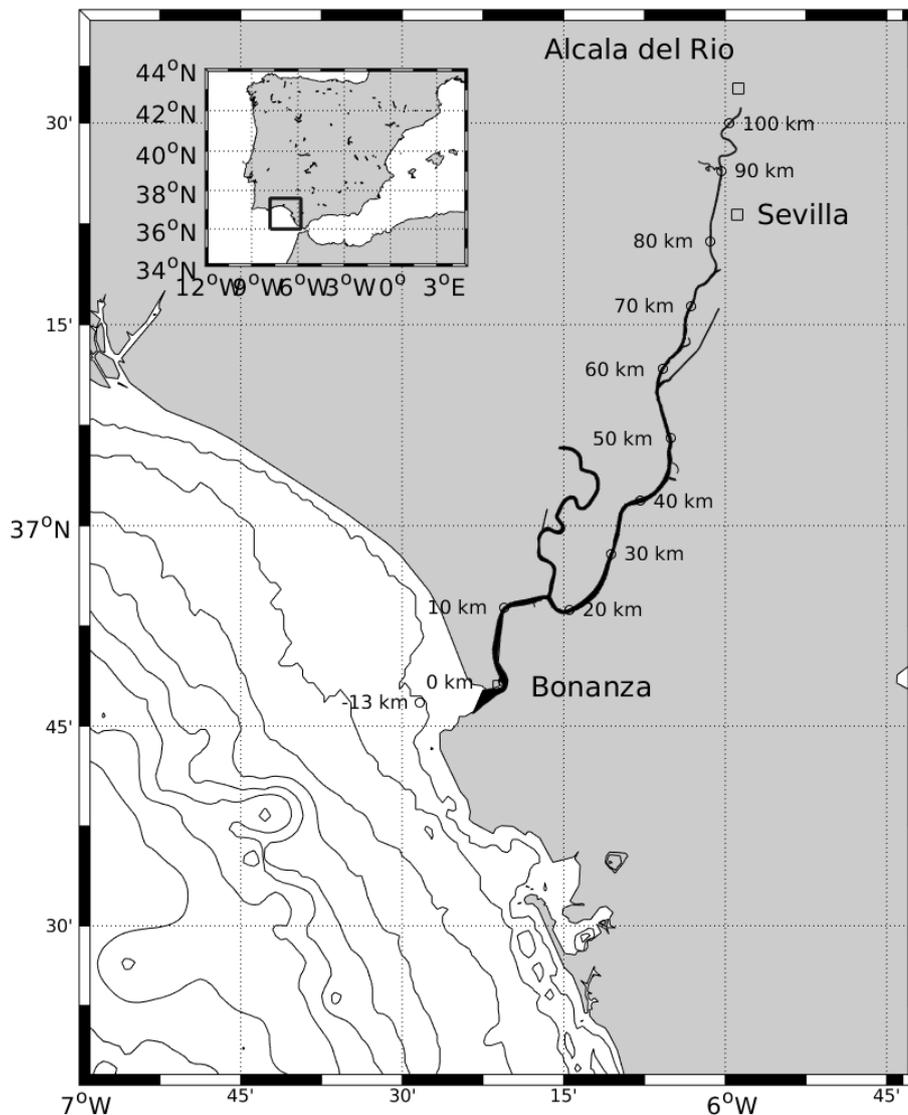


Figura 1.2.b.1. Mapa general con las distancias en kilometros desde la desembocadura del estuario.

En las primeras comparaciones de las salidas del modelo con las observaciones más antiguas disponibles se hacían notar comportamientos inesperados e incoherentes en ciertos puntos del estuario(ver figuras 1.2.a.1 y 1.2.b.2 y los comentarios del pie de la misma). Ante estas dudas se planteó la necesidad de obtener observaciones de mayor calidad, para lo que se solicitó el asesoramiento y ayuda del IHM, que finalmente puso a disposición del proyecto las observaciones de nivel del mar en el estuario que estaban recogiendo dentro de sus campañas de levantamiento batimétrico. La comparación de datos del modelo con estas observaciones de mayor calidad era mucho más satisfactorias y por ello se han usado para la calibración y tuneado fino final del modelo barotrópico.

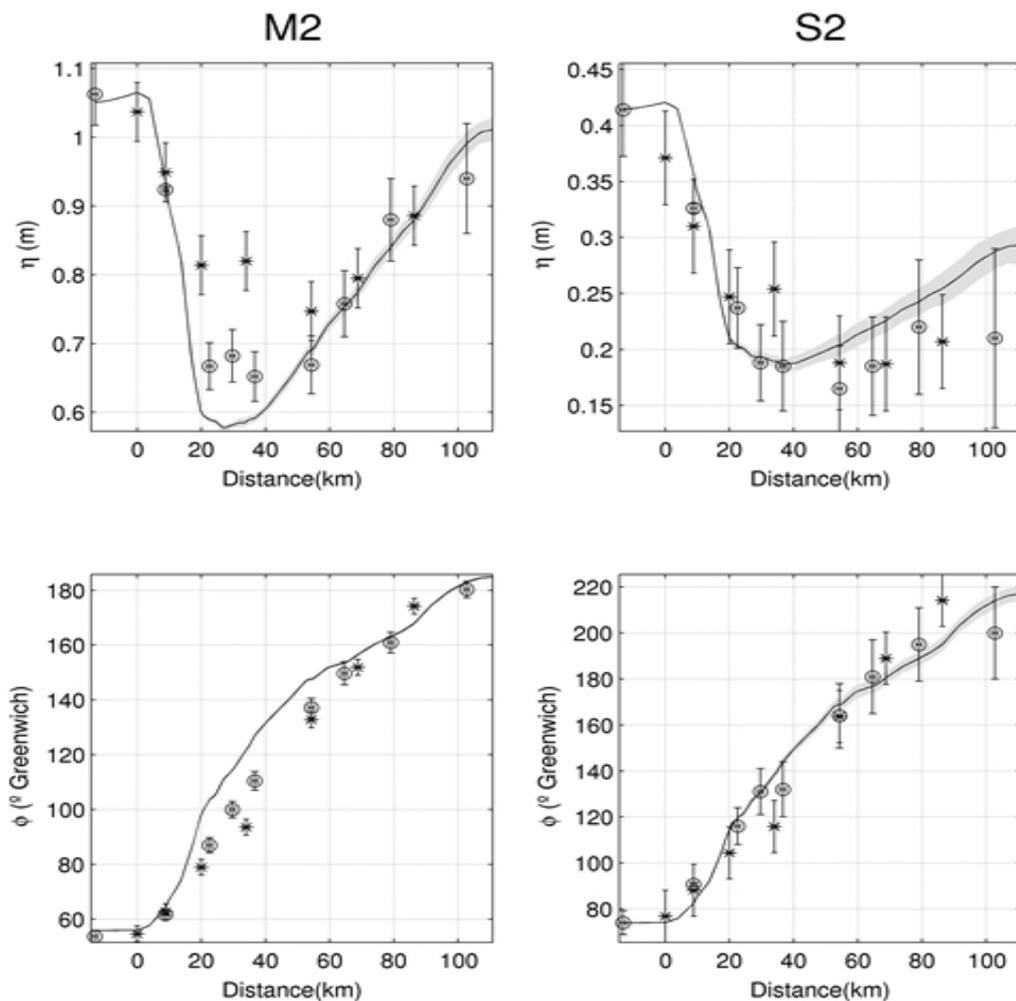


Figura 1.2.b.2. Constantes armónicas con sus barras de error obtenidas del primer conjunto de observaciones disponibles (círculos) y de las salidas producidas por el modelo para las dos constituyentes dominantes M2 (izquierda) y S2 (derecha). El modelo muestra un pronunciado mínimo local de amplitud sobre el kilómetro 25 (paneles superiores) que pasa bastante inadvertido en las observaciones y un ligero desajuste de fases para M2.

Respecto al segundo bloque, las observaciones de corrientes provienen de las mismas campañas que las antiguas de nivel comentadas arriba y son mucho más fragmentarias y ruidosas, por lo que su uso para tareas de calibración del modelo es cuestionable. Aun así, comparaciones hechas entre las salidas del modelo e información fragmentaria procedente de estas observaciones indican un acuerdo razonable en las amplitudes de las corrientes, acuerdo que es peor en las fases (Figura no mostrada). Puesto que la predicción del nivel del mar correcta que hace el modelo implica indirectamente una correcta predicción de flujos, el desacuerdo existente en la comparación de la figura deja abierta la posibilidad ya adelantada de deficiencias en esas observaciones de corriente por lo que no se ha procedido a realizar ningún ajuste fino posterior y se queda a la espera de poder disponer de nuevas observaciones que garanticen una mejora de

la calibración del modelo. La obtención de estas observaciones se plantea como una tarea pendiente a llevar a cabo en el futuro por quien corresponda.

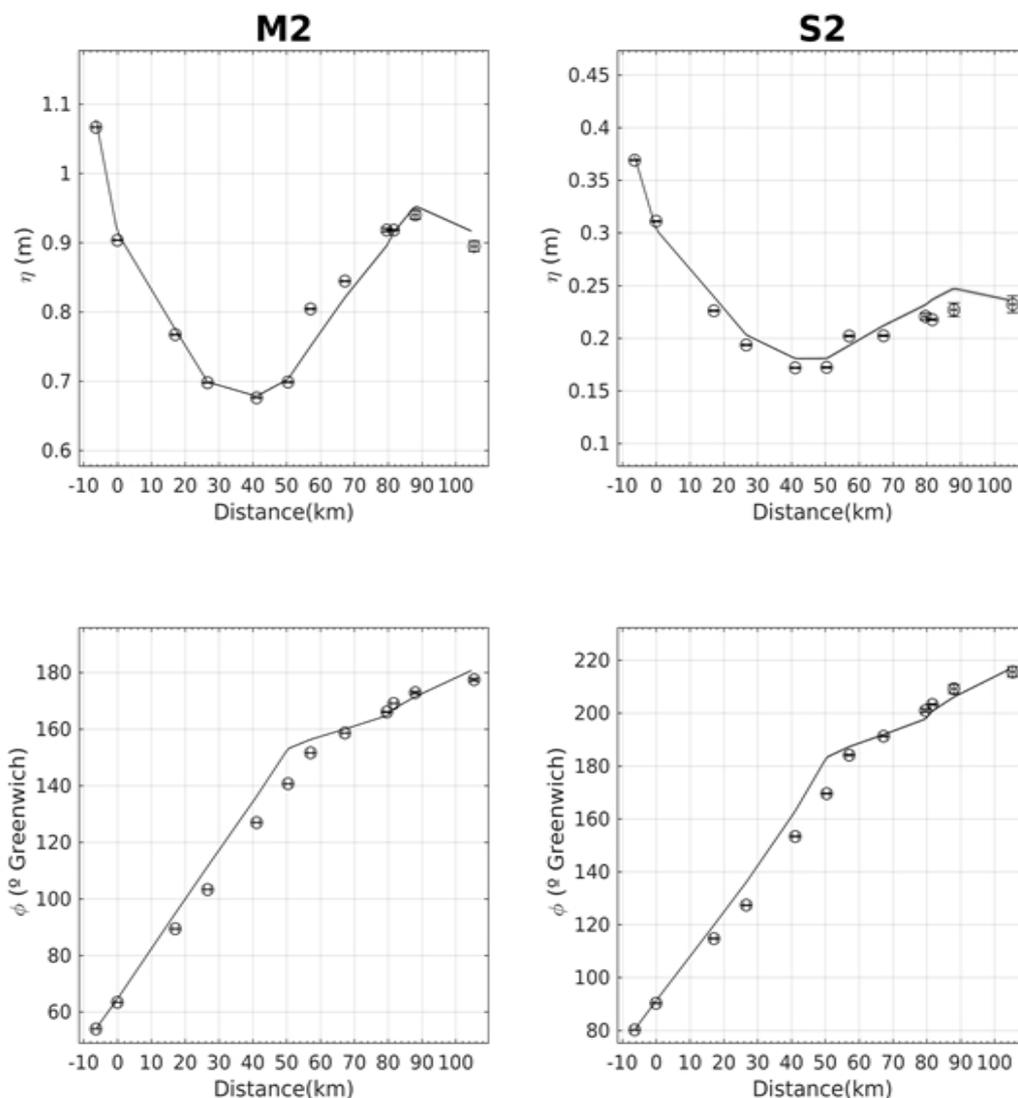


Figura 1.2.a.1. Constantes armónicas deducidas de las observaciones recientes recogidas por el IHM (círculos) y de las salidas del modelo calibrado. El patrón espacial de ambas coincide, dibujando en ambos casos un mínimo claro sobre el punto kilométrico 40, lo que apoya las dudas sobre la calidad de las antiguas observaciones.

Tras el nuevo ajuste de parámetros, el modelo predice las oscilaciones de la superficie libre a lo largo del estuario con una precisión de 8cm y 20 min de desfase respecto al instante de llegada de la pleamar/bajamar. Se estima que la calidad de predicción de corrientes debe ser similar a falta de contrastación definitiva con nuevos datos de calidad. Como conclusión se

deja constancia de la disponibilidad de esta poderosa herramienta predictiva (Modelo barotrópico v.1) que pronostica el comportamiento mareal del estuario con una precisión de $\pm 8\text{cm}$ en la amplitud de la oscilación mareal (incertidumbre $< 4\%$) y de $\pm 20\text{min}$ en el momento de ocurrencia de la pleamar/bajamar.

1.3 El problema del cero del río y el espesor de la lámina de agua.

La batimetría implementada en el dominio del modelo ha sido facilitada con referencia al nivel medio del mar en Alicante. A falta de otra información, en las primeras fases de construcción del modelo se ha tomado también el nivel medio de Alicante como nivel medio del modelo, es decir, la oscilación mareal lo hacía alrededor de este cero hipotético. Sin embargo, el nivel medio del mar en esta parte de la península está por encima del cero de Alicante (hay medidas geodésicas y clavos de referencia que cuantifican esta diferencia en 30 cm en Bonanza, e información diversa que permite establecerla en 64 cm en Sevilla). Toda esta información sobre nivelaciones y ceros de referencia ha sido facilitada recientemente y, aunque aún no se considera definitiva, tiene ya mucho interés.

Bajo estas circunstancias, el espesor de la lámina de agua, variable fundamental para programar la navegación por el estuario, no se corresponde con la mera suma de la cota batimétrica y la altura instantánea del nivel producida por el modelo. A esto hay que añadir la diferencia entre el nivel medio del estuario y la referencia del cero de Alicante, es decir, sumar la desnivelación geodésica. Hay un segundo efecto de menor importancia debido a que la solución de las ecuaciones de movimiento depende del espesor de la columna de agua, por lo que las amplitudes y fases modeladas cambian al hacerlo el espesor.

Por esta razón se ha optado por hacer una corrección batimétrica del dominio simulado añadiendo ese desnivel, con lo que las predicciones que produce la nueva versión (v.1a) del modelo ya incluyen el efecto de una lámina de agua mayor. Esas predicciones sumadas a la nueva batimetría ajustada dan directamente el espesor de la lámina de agua.

Un último detalle a mencionar es que las medidas geodésicas indican un desnivel medio entre Sevilla y Bonanza de 34cm, que tiene sentido físico pues está asociado a gradiente longitudinal de presión que mueve el flujo medio. El modelo también calcula un desnivel de, en este caso, 16cm, que no difiere mucho del anterior. Dado que las nivelaciones de precisión entre Sevilla y Bonanza con las que trabajamos son mejorables (al menos las de Sevilla), el anterior acuerdo es

satisfactorio¹. En cualquier caso, a la hora de facilitar el dato del espesor de la lámina de agua, que es fundamental para la gestión de la navegación por el estuario para la APS, se ha procedido a introducir una mínima corrección lineal del espesor para ajustarlo a los valores de desnivel referidos en las mencionadas nivelaciones, que en ningún caso supera los 18cm en el lugar donde mayor es esa corrección.

Como resultado final se dispone de un modelo barotrópico v.1a que reproduce el espesor de la lámina de agua con una precisión promedio estimada de 8 cm en cuanto a amplitud (RMSE) y de 20 minutos en cuanto a la ocurrencia de las pleamares que está ya siendo utilizada con éxito en la gestión de la navegación del estuario por la APS.

2.- APLICACIONES DEL MODELO BAROTROPICO

2.1.- Productos finales operativos producidos por el modelo barotrópico v.1

2.1.a.- Tablas que dan la altura total de la superficie a intervalos de tiempo seleccionables, por defecto horarios, y que pueden suministrarse también como tablas de marea con horas y alturas de pleamar/bajamar). Actualmente, estas tablas han sido producidas para los años 2017 y 2018.

2.1.b.- Idem para corrientes de marea en el supuesto de una descarga media en la presa de Alcalá de 50 m³/s próximo al valor ecológico establecido por la CHG.

2.1.c.- Espesor de la lámina de agua a intervalos de tiempo seleccionables (salida de la mejora v.1a del modelo), en formato similar al de la altura de la superficie libre indicado en 2.1.a.

2.1.d.- Programa interactivo de apoyo a la navegación (Figura 2.1.d.1) que calcula el espesor de la lámina de agua en cualquier instante y gestiona unos mínimos de seguridad que hacen saltar alertas si se sobrepasan. Necesita las tablas de marea producidas en 2.1.a.

2.1.e.- Diseño y generación de un índice local que refleje la intensidad de la marea y que sustituya a los obsoletos "coeficientes de marea" rutinariamente empleados y cuya validez es discutible. Los nuevos coeficiente (dos valores diarios) se obtienen del rango de marea en Bonanza.

¹El análisis preliminar de las observaciones tomadas por el IHM arrojan un desnivel medio entre ambas localidades de 22 cm, muy similar al que produce el modelo y no lejos del deducido de las referencias geodésicas disponibles.

Prediccion modelo	Estacion1	Estacion2	Estacion3	Estacion4	Estacion5	Estacion6	Estacion7	Estacion8	Estacion9	Bonanza	Sevilla
Posicion Est.											
Longitud Est.	-6.51910812	-6.34152526	-6.30261379	-6.24520663	-6.18513653	-6.08805168	-6.10096509	-6.05456784	-5.98886214	-6.34004831	-6.0075
Latitud Est.	36.79866095	36.79964561	36.90768947	36.89463347	36.93809217	37.06129072	37.15412012	37.27028924	37.46236310	36.80682482	37.3196
Dist (km_0_Bonanza)											
Fondo Est.	13.39718797	11.94363486	6.41837140	9.66093265	7.56866167	8.27799765	9.66366818	7.40209317	4.06425572	7.83036084	7.40160442
Hora local											
2016-01-01 11:50:00	-0.46543290	-0.29961090	0.18878160	0.27367650	0.37418170	0.63750090	0.75319550	0.93390650	1.29803200	-0.27267120	1.01645400
2016-01-01 12:00:00	-0.52527760	-0.35446450	0.15831200	0.24349820	0.34587660	0.59832980	0.70822690	0.88112550	1.24632900	-0.32644260	0.96839080
2016-01-01 12:10:00	-0.58173510	-0.40059240	0.13060290	0.21742570	0.31946590	0.55588130	0.66075560	0.82576410	1.18399300	-0.37163570	0.91488440
2016-01-01 12:20:00	-0.63386330	-0.44082500	0.10572970	0.19404510	0.29270510	0.51196680	0.60960980	0.76856270	1.11264900	-0.41140380	0.85357400
2016-01-01 12:30:00	-0.68171640	-0.47809670	0.08323252	0.17115790	0.26443890	0.46693090	0.55548560	0.70827270	1.03369600	-0.44783240	0.78227940
2016-01-01 12:40:00	-0.72569320	-0.51275620	0.06241348	0.14703200	0.23473290	0.42049430	0.50026340	0.64309140	0.94921850	-0.48179820	0.70320920
2016-01-01 12:50:00	-0.76519370	-0.54466800	0.04236795	0.12144460	0.20417280	0.37319250	0.44516220	0.57257150	0.86164590	-0.51288320	0.62158160
2016-01-01 13:00:00	-0.80008960	-0.57338520	0.02175203	0.09534705	0.17306400	0.32626640	0.39084260	0.49845360	0.77245330	-0.54068230	0.54177590
2016-01-01 13:10:00	-0.83007850	-0.59965930	0.00926408	0.06943069	0.14142000	0.28030280	0.33416780	0.42355230	0.68141220	-0.56628760	0.46514640
2016-01-01 13:20:00	-0.85462550	-0.62384890	-0.02367009	0.04328891	0.10937240	0.23453260	0.27718610	0.35024350	0.58997680	-0.59021780	0.39084090
2016-01-01 13:30:00	-0.87354890	-0.64565830	-0.04823939	0.01612968	0.07710569	0.18771410	0.21967470	0.27984820	0.49966770	-0.61217530	0.31760250
2016-01-01 13:40:00	-0.88682050	-0.66477130	-0.07396118	-0.01245595	0.04457556	0.13931370	0.16274010	0.21281520	0.41255550	-0.63207480	0.24483660
2016-01-01 13:50:00	-0.89646240	-0.68131100	-0.10102520	-0.04230904	0.01146809	0.08998999	0.10734510	0.14893290	0.32979960	-0.64959430	0.17330030
2016-01-01 14:00:00	-0.89646030	-0.69464060	-0.12935970	-0.07309498	0.02277418	0.04103673	0.05403980	0.08763736	0.25103860	-0.66422160	0.10456860
2016-01-01 14:10:00	-0.89353220	-0.70468590	-0.15867180	-0.10482720	-0.05806103	-0.00658341	0.00301442	0.02855256	0.17594050	-0.67577640	0.03989372
2016-01-01 14:20:00	-0.88502000	-0.71148310	-0.18832440	-0.13775220	-0.09630518	-0.05266683	-0.04581865	-0.02831898	0.10412450	-0.68401250	0.02031536
2016-01-01 14:30:00	-0.87107130	-0.71522970	-0.21813040	-0.17196170	-0.13531470	-0.09742635	-0.08269268	-0.05761119	0.03761119	-0.68971830	0.07638249
2016-01-01 14:40:00	-0.85175470	-0.71607480	-0.24824460	-0.20708900	-0.17488900	-0.14111640	-0.13851870	-0.13416120	-0.02865850	-0.69251310	-0.12899650
2016-01-01 14:50:00	-0.82725560	-0.71277580	-0.27898560	-0.24256100	-0.21410120	-0.18393470	-0.18315090	-0.18243570	-0.08892047	-0.69163160	-0.17873580
2016-01-01 15:00:00	-0.79774560	-0.70513350	-0.31005650	-0.27776410	-0.25226140	-0.22602030	-0.22667280	-0.22757970	-0.14507720	-0.68672090	-0.22578680
2016-01-01 15:10:00	-0.76354060	-0.69237420	-0.34073800	-0.31217410	-0.28916590	-0.26738750	-0.26886540	-0.27003150	-0.19745120	-0.67686890	-0.27003340
2016-01-01 15:20:00	-0.72498130	-0.67451570	-0.37025770	-0.34528540	-0.32493110	-0.30786260	-0.30955560	-0.31036550	-0.24641430	-0.66214410	-0.31141330
2016-01-01 15:30:00	-0.68239270	-0.65193750	-0.39786060	-0.37679950	-0.35965290	-0.34712190	-0.34871920	-0.34909980	-0.29222420	-0.64269320	-0.35018820
2016-01-01 15:40:00	-0.63603970	-0.62486930	-0.42272580	-0.40649660	-0.39317090	-0.38447110	-0.38642610	-0.38616610	-0.33498340	-0.61866610	-0.38689220
2016-01-01 15:50:00	-0.58625260	-0.59314290	-0.44434560	-0.43408420	-0.42515510	-0.42088240	-0.42272730	-0.42192590	-0.37469290	-0.58988220	-0.42206860

Figura 2.1.a.1: Ejemplo de Tablas de alturas de la superficie del río en distintos puntos seleccionados del estuario que proporcionadas por el modelo barotrópico.

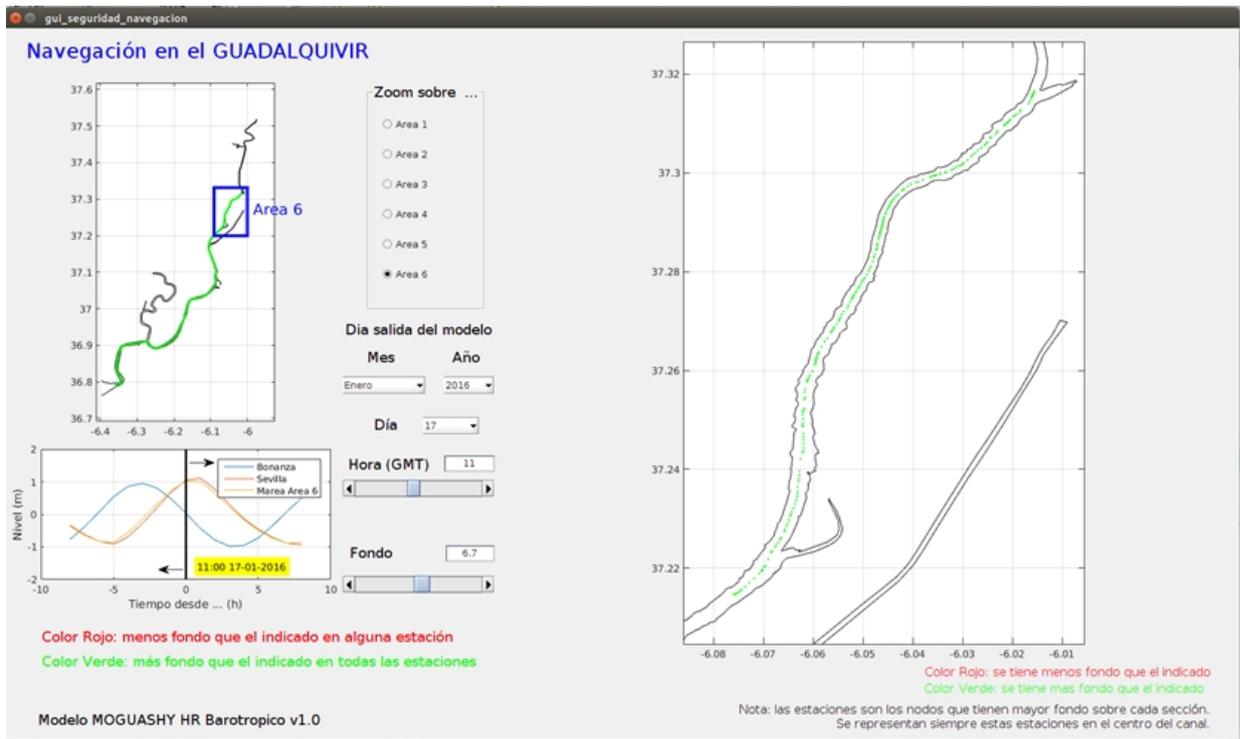


Figura 2.1.d.1: Imagen captura de pantalla del programa de apoyo a la navegación que informa de la profundidad instantánea a lo largo del río en función del momento de interés. Incluye un código de color que alerta sobre la superación de límites de seguridad preestablecido.

2.2.- Casos de Estudio

2.2.a.- Marea meteorológica

Añadida a la oscilación mareal determinista (astronómica) está la denominada marea *meteorológica* que se manifiesta como oscilaciones del nivel del mar inducidas por variaciones atmosféricas, fundamentalmente de la presión. Esta perturbación se impone en el contorno abierto del mismo modo que la marea astronómica. Se han realizado simulaciones de depresiones de nivel forzadas por altas presiones de diferente intensidad y duración así como de sobre-elevaciones asociadas a la llegada de bajas presiones, en este caso de mayor amplitud como suele ser el caso del paso de borrascas (Figura 2.2.a.1). El análisis de las situaciones estudiadas indica que:

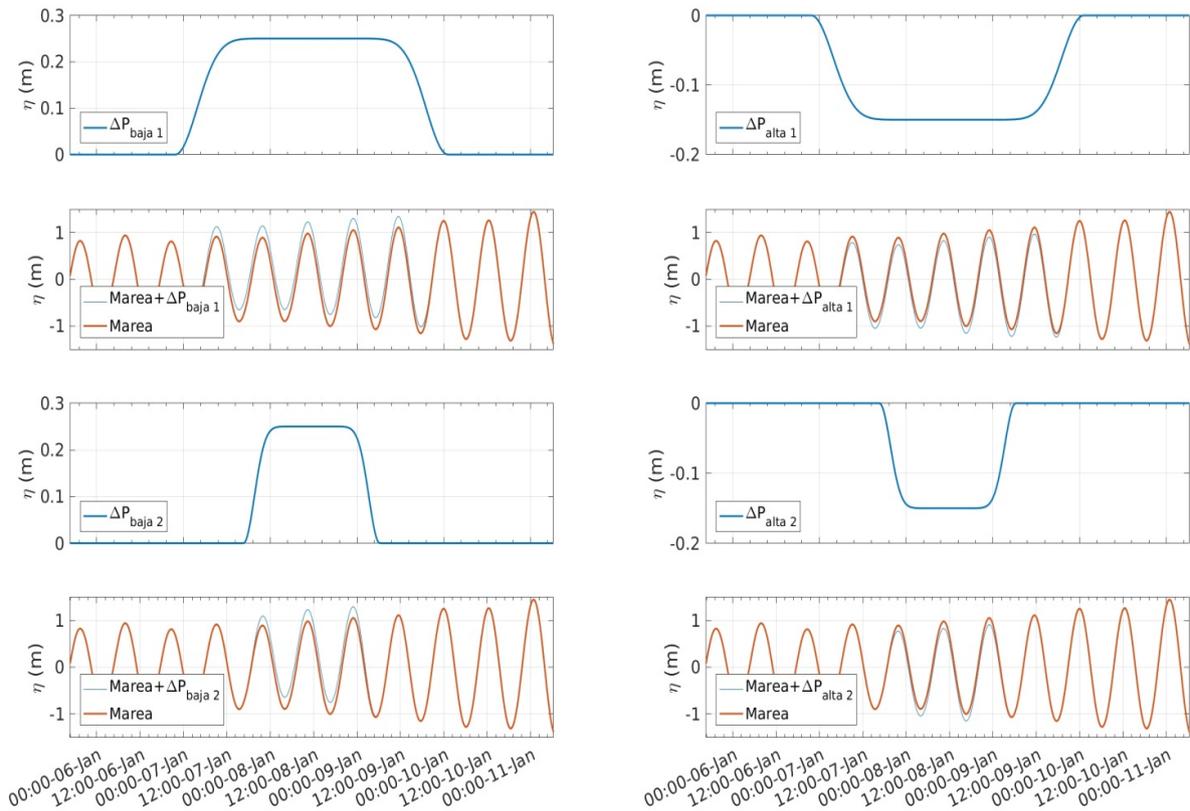


Figura 2.2.a.1: Paneles izquierdos: configuración de forzamiento para baja presión de diferentes duraciones, 2 días (panel 1º) y 1 día (panel 3º). En ambos casos la variación de desnivel (i.e., cambio de presión) ocurre gradualmente durante un periodo de 12h. Los paneles 2º y 4º muestran cómo cambia la respuesta del nivel del mar en un punto situado a 20 km de Bonanza. Paneles derechos: ídem para una situación de alta presión.

En el conjunto de test realizados, el forzamiento meteorológico se ha impuesto de forma similar a cómo se impone el mareal, es decir, como una variación de nivel cuya forma y duración se prescribe. Se ha optado por esquemas muy simples consistentes en una sobrelevación de nivel,

que se corresponde con una situación de baja presión, de amplitud 25 cm (correspondiente al paso de una borrasca profunda de 25HPa de depresión frente al valor de presión media) que se alcanza tras un periodo transitorio de 12h para mantenerse con ese valor durante un tiempo dado (ver pie de figura 2.2.a.1) para decaer de nuevo a su valor normal en otras doce horas. Un esquema similar se ha seguido para una situación de altas presiones en las que se impone una depresión en el contorno, de menor amplitud (15cm, correspondiente a 15HPa en este caso, que refleja mejor la realidad de una situación anticiclónica intensa). Se excluyen en este análisis eventos reales más extremos que son discutidos aparte.

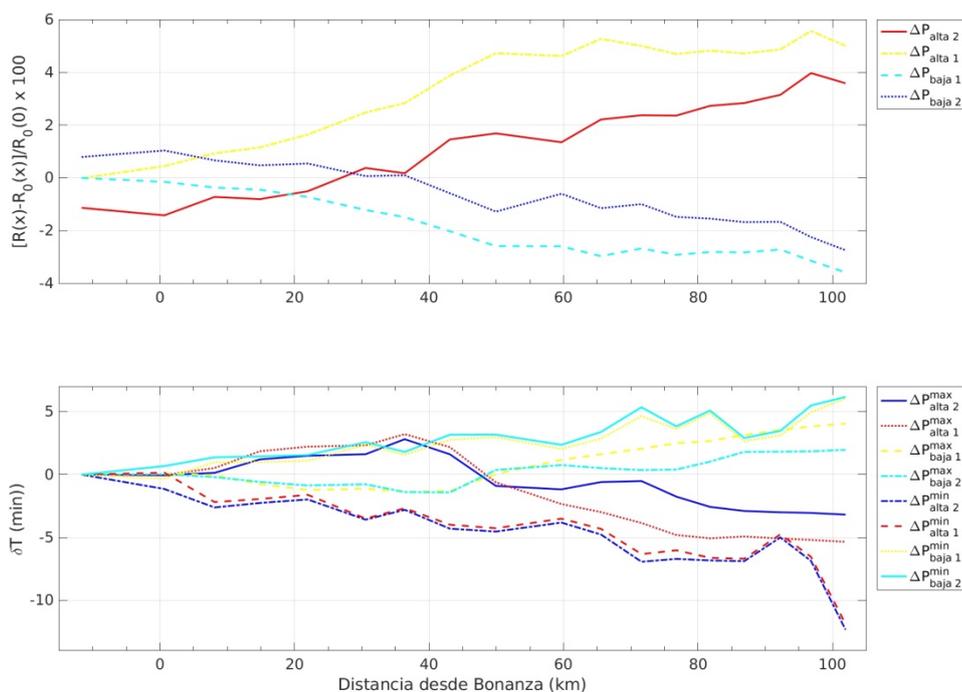


Figura 2.2.a.2: Panel superior: variación porcentual del rango de marea respecto a la situación media producido por la perturbación meteorológica en los 4 casos mostrados en la figura 2.2.a.1 (subíndices “alta_i” y “baja_i”, i=1,2). Panel inferior: desvío temporal de la ocurrencia de las pleamares (superíndice “max” en la leyenda) y bajamares (“min” en la leyenda) respecto a la situación media. Los desvíos en todos estos casos de variaciones de presión muy altas no sobrepasan los 5 minutos respecto a la situación de referencia en la parte de interés del estuario (<80km).

El análisis de las situaciones estudiadas indica que:

- El rango mareal², tomado como la diferencia del rango medido con perturbación meteorológica menos el rango medido sin esa perturbación, normalizada por el rango en Bonanza (figura 2.2.a.2, panel superior) se ve muy ligeramente modificado (~2%) , más

²La reducida duración temporal de la perturbación impide hacer análisis armónico y, por tanto, hacer uso de M2 en la discusión de resultados. Por ello se emplea el rango mareal, diferencia entre las alturas de pleamar y bajamar sucesivas.

en las situaciones de altas presiones y más aún si la situación es de larga duración (línea amarilla). En estos casos el rango puede variar hasta en un 4%.

La fase no se ve esencialmente alterada ya que los máximos desvíos en las ocurrencias de bajamar y pleamar respecto a la situación de no perturbación no sobrepasan los 5 minutos (figura 2.2.a.2, panel inferior), tiempo que cae en el intervalo de confianza de las horas de pleamar y bajamar dadas por el modelo.

- La depresión o elevación producida por la perturbación se propaga hacia el interior del estuario con un retraso menor que el propio tiempo de cambio, por lo que puede considerarse a efectos prácticos instantánea. La conclusión se aplica también cuando el proceso se invierte, es decir, cuando la perturbación desaparece y se recupera la situación de referencia.
- El tamaño de la perturbación apenas sufre variación a medida que progresa en el estuario, es decir, produce los mismos cambios de nivel que los impuestos en el contorno.
- El hecho de que una alta presión produzca un descenso de nivel en el estuario junto con el incremento del rango mareal que también ocasiona, hace que las bajamares sean más acentuadas reduciendo el espesor de la lámina de agua. En un caso de altas presiones estables y de mucha intensidad, como el etiquetado “alta_1” en la figura 2.2.a.1, la lámina de agua podría llegar a disminuir 20cm su espesor durante la bajamar en la parte más alta del estuario navegable, detalle importante a la hora de la gestión de la navegación.
- Notar que los anteriores valores se corresponden con situaciones atmosféricas exageradas y que en la realidad las fluctuaciones son menores o bastante menores incluso, lo que implicaría respuestas menores o bastante menores en consecuencia. Esto puede no aplicarse a casos extremos como el real descrito en un el epígrafe 2.2.e.

Como conclusión, la marea meteorológica produce una perturbación que suma linealmente con la marea astronómica aumentando o disminuyendo el nivel a lo largo del estuario en la misma cantidad que se observa en el contorno oceánico y que no retrasa frente al forzamiento. Los rangos mareales también se ven modificados, aumentando (disminuyendo) ligeramente en situaciones de altas (bajas) presiones. La lámina de agua se ve pues afectada por ambos hechos: bajo altas presiones, se produce un descenso de nivel forzado

meteorológicamente y un aumento de rango mareal que hace disminuir el espesor de la lámina alrededor de la bajamar en valores que deben ser contemplados y que restan margen de seguridad a la navegación. Las bajas presiones por el contrario aumentan el espesor y amplían ese margen.

2.2.b.- Descargas de agua dulce

Se ha analizado la respuesta del estuario a diferentes valores de descargas de agua dulce y de su duración en la cabecera del estuario. Los aspectos que se han estudiado es la variación de amplitud de la onda de marea y la *eventual* posibilidad de que la señal quedase totalmente amortiguada bajo grandes descargas, la aparición de un punto aguas arriba del cual la corriente nunca invierte (es decir, siempre fluye hacia el océano) y cómo ese punto cambia su posición en función del tamaño de la descarga y de la intensidad de la marea (marea-viva frente a marea-muerta) y los tiempos de respuesta para alcanzar un nuevo equilibrio en los distintos puntos del estuario (y su recíproco, es decir el tiempo que transcurre desde que se re-establece la descarga de referencia y el estuario recobra su comportamiento normal)

En una situación real, el principal efecto que tienen las descargas de agua dulce es desplazar la cuña salina lo largo del estuario. Este proceso no puede ser estudiado detalladamente con el modelo barotrópico que no considera la distribución de temperatura/salinidad en el estuario, sino que tiene que ser hecho con la versión baroclina del mismo. Se retoma este punto más adelante.

La figura 2.2.b.1 muestra las variaciones de amplitud y fase de la oscilación de nivel y de la corriente asociadas a la constituyente principal M2. En las cercanías de la desembocadura (coordenada $x=0$) la influencia de las descargas es escasa. Solamente para descargas improbables de más de $2000\text{m}^3/\text{s}$ mantenidas durante cierto tiempo la amplitud de marea en Bonanza disminuye más del 10%. A medida que nos adentramos en el estuario, la amplitud de M2 se ve más y más afectada (menor amplitud cuanto más descarga), siendo la parte alta del estuario la más sensible, como cabe esperar. Curiosamente, la fase apenas cambia en la mitad más baja del estuario y sí lo hace en la cabecera, donde las grandes descargas retrasan la llegada de la onda de marea, aunque nunca de forma drástica (desfases inferiores a una hora siempre).

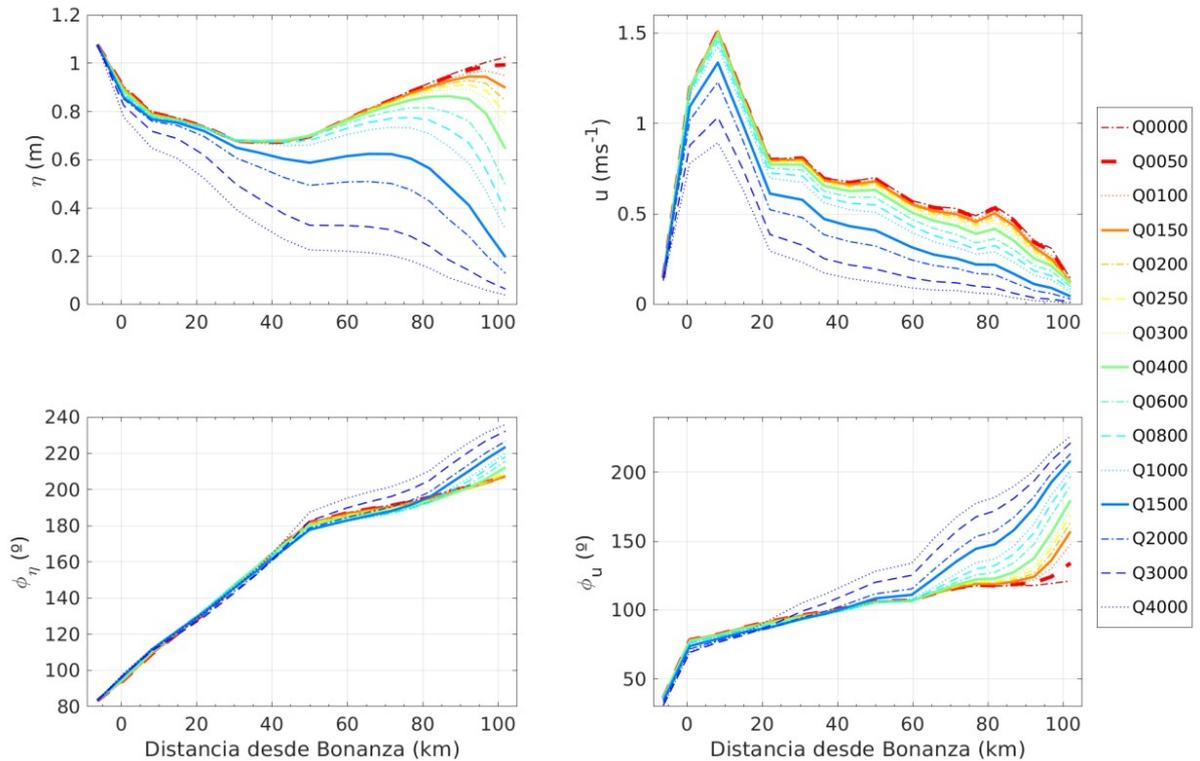


Figura 2.2.b.1: Columna izquierda: Amplitud (arriba) y fase (debajo) de la oscilación de nivel asociada a M2 a lo largo del estuario en función de las descargas (leyenda a la derecha, en m^3/s , según código Qxxxx; por ejemplo, Q1500 indica una descarga de $1500\text{m}^3/\text{s}$). Columna derecha: ídem para la corriente de marea asociada a M2. El eje x indica distancias medidas desde Bonanza ($x=0$). La esclusa del puerto de Sevilla se sitúa sobre los 75km .

El espesor de la lámina de agua se ve también modificado porque la propia descarga aumenta el nivel medio del río en cada punto (Figura 2.2.b.2)³. En todos los casos, el espesor instantáneo computado como valor medio más amplitud mareal, aumenta con el tamaño de la descarga independientemente de que la amplitud disminuya.

³ Para grandes descargas, el aumento de nivel predicho por el modelo en las inmediaciones de la presa es de varios metros. Ese aumento hace desbordar el río e invalida la configuración del dominio puesto que el agua inunda las riberas, situación no contemplada en el modelo. Las alturas en las proximidades de la presa de Alcalá en la figura 2.2.b.2 serían las alcanzadas si las riberas del río fuesen más altas que las alturas del agua especificadas, lo cual no es el caso del Guadalquivir real cuyas riberas están a unos 2-4 m sobre el nivel medio. Para grandes valores de Q no pueden considerarse reales los niveles medios indicados en la figura 2.2.b.2.

La corriente mareal se ve más afectada tanto en amplitud como en fase, reduciéndose por encima del 80% para descargas por encima de $2000\text{m}^3/\text{s}$ en el último tercio del estuario. Para estos tamaños, la única contribución que cuenta es la velocidad del agua dulce liberada. Un resultado esperable en situaciones de altas descargas es que la corriente de llenante (la marea dirigida aguas arriba) sea frenada por la propia descarga y no llegue a la cabecera del estuario, dejándolo dividido en dos partes, aquélla en la que la corriente siempre apunta hacia el océano y otra donde hay inversiones forzadas por la marea, aunque sean de breve duración. La Figura 2.2.b.3 indica el porcentaje de veces que se detecta la no inversión de corriente (es decir, la existencia de esa segunda zona) en función del tamaño de las descargas. El punto donde la gráfica se separa del valor 1 (100%) indica en promedio la ubicación de esa línea de separación entre zonas

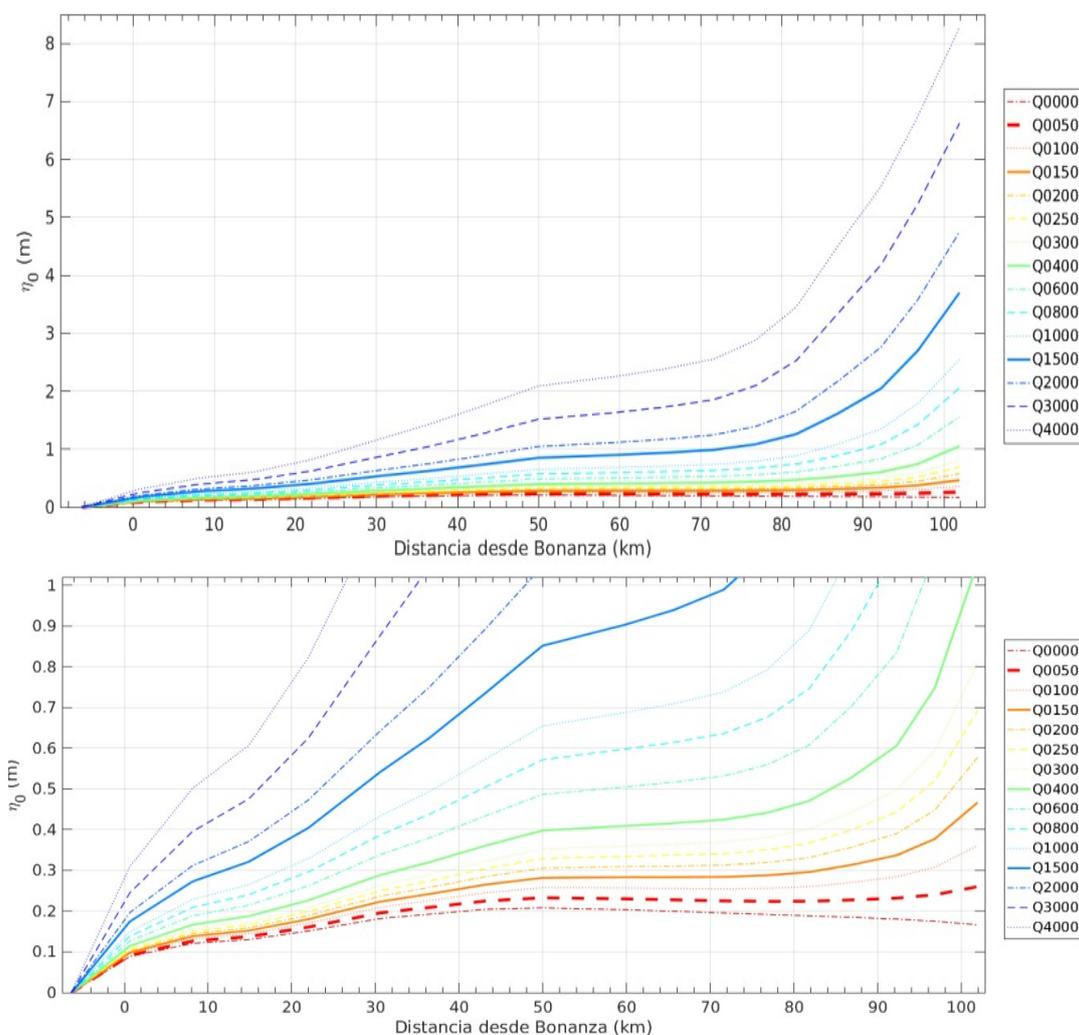


Figura 2.2.b.2: Panel superior: nivel medio a lo largo del estuario para diferentes valores de la descarga (mismo código que en figuras anteriores). Panel inferior: ampliación de la anterior en el rango 0-1m. Los valores de varios metros que pueden verse en el panel superior para descargas altas, son irreales en la configuración real del Guadalquivir (ver nota 2 al pie de página).

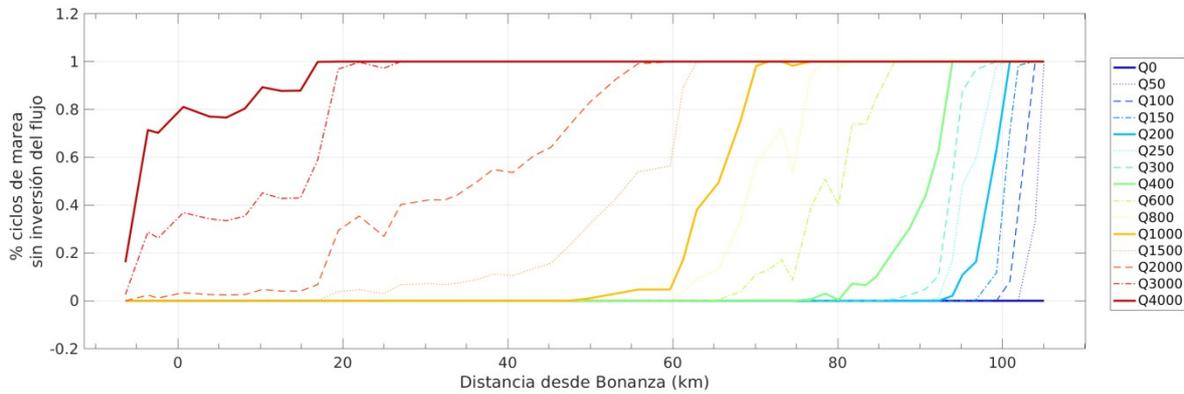


Figura 2.2.b.3: Porcentaje de observación de no inversión de corriente de marea en el estuario en función de la descarga. Para $Q=0\text{m}^3/\text{s}$ la corriente invierte en todo el estuario. A partir de $Q>0\text{m}^3/\text{s}$, hay veces que no llega a invertir (mareas muertas) y otras sí (vivas) por lo que el porcentaje no llega al 100%. A partir ya de $Q>100\text{m}^3/\text{s}$ se alcanza el 100% en las inmediaciones de la presa, indicando que la corriente allí no llega a invertir ni siquiera en mareas vivas. Y a medida que Q aumenta, el punto de no inversión avanza hacia la desembocadura. Para descargas tan grandes como $Q=4000\text{m}^3/\text{s}$, el punto se ubica apenas a 20 km de la desembocadura, aunque el porcentaje en Bonanza ($x=0$) nunca baja del 80%, indicando que sólo en mareas muy vivas el agua salina penetrara hasta allí.

Descargas altas sirven para vaciar el estuario de agua salina la cual solamente podrá re-entrar cuando cese la descarga que promovió el vaciado. Las descargas arrastran materiales en suspensión, en particular huevos y larvas de especies marinas que usen como zona de puesta y cría la parte baja del estuario, como el boquerón. Puesto que el arrastre de larvas mar adentro implica mortalidad, evaluar qué condiciones de descarga producen este efecto es importante. La figura 2.2.b.4 muestra los tiempos medios (acotados por su std) que trazadores pasivos abandonados en la zona de Puntalete (20 km aguas arriba de Bonanza) tardan en abandonar el estuario por Sanlúcar (5 km aguas abajo de Bonanza) para distintos valores de descarga e intensidad de marea. Para descargas pequeñas existe una ligera dependencia de los tiempos de residencia con la intensidad de marea, que se hace inapreciable a medida que las descargas aumentan. Para descargas $Q\sim 200\text{m}^3/\text{s}$ ese tiempo es de 2-3 días, para $Q>600\text{m}^3/\text{s}$, menos de 1 día, independientemente de que la marea sea viva o muerta.

Un último aspecto de interés es el tiempo de respuesta del estuario ante una nueva situación de descargas. La figura 2.2.b.5 muestra el cambio brusco de nivel que ocurre en un punto situado a 90km de Bonanza en las cercanías de la presa de Alcalá cuando llegan descargas de diferente tamaño e ilustra cómo se alcanza la nueva situación de equilibrio (y la recíproca, i.e., cómo se recupera la situación normal una vez que la descarga cesa). Los tiempos de respuesta en ambos casos son inferiores a 6 horas, indicando un rápido ajuste a las nuevas condiciones.

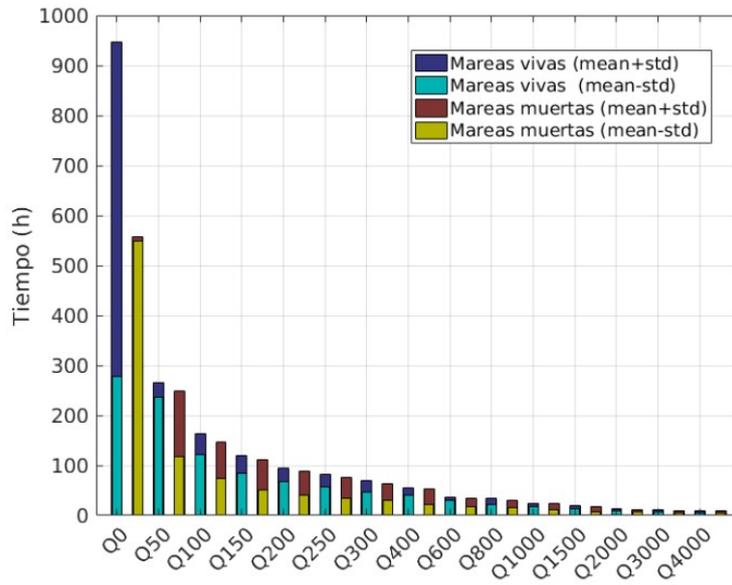


Figura 2.2.b.4: Tiempos de residencia dentro del estuario para trazadores abandonados en la zona de Puntalete (a 25 km de Bonanza) en función de la descarga e intensidad de marea (código de color en la leyenda). Los valores medios tienden a ser menores en mareas muertas aunque esa diferencia se reduce con el tamaño de la descarga.

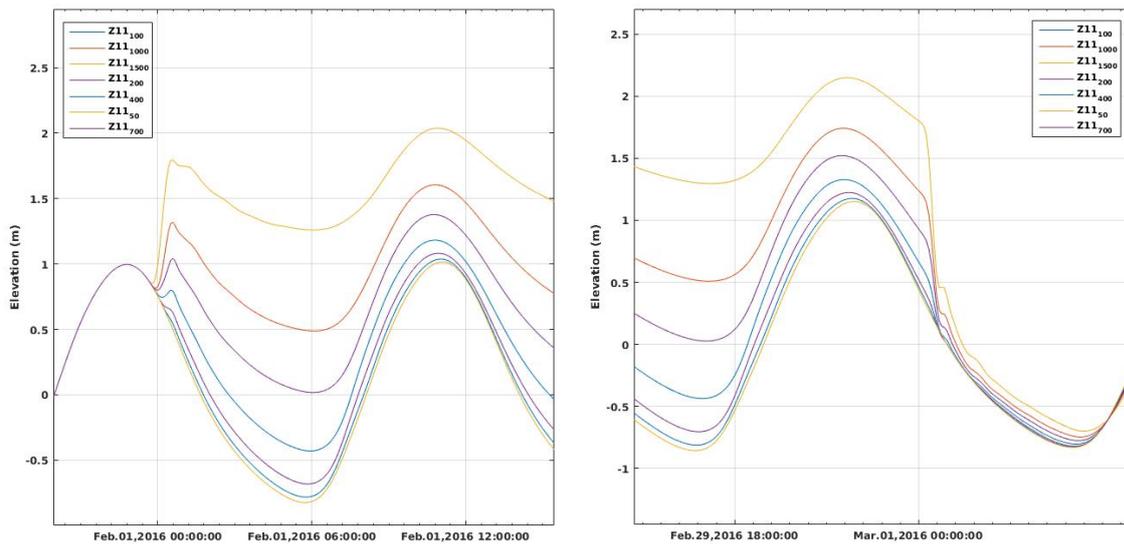


Figura 2.2.b.5: Panel izquierdo: modificación de la oscilación de marea en un punto localizado a 90km aguas arriba de Bonanza en las inmediaciones de la presa de Alcalá cuando llegan descargas de diferentes valores (subíndice en la leyenda, en m^3/s). Panel derecho: ídem en el caso de que una descarga grande desaparezca para retomar su valor de referencia de $50m^3/s$. El transitorio entre ambas situaciones no supera las 6 horas, es decir medio ciclo de marea.

En conclusión, las descargas tienden a disminuir la amplitud de la onda de marea y a retrasar su progresión, especialmente en la parte alta del estuario, mientras que el nivel medio aumenta hacia la cabecera del estuario. Ambos efectos combinados originan un aumento en todo instante del espesor de la lámina de agua. La velocidad mareal muestra un patrón similar al de oscilación aunque la reducción de amplitud y el retraso están más acentuados. La respuesta del estuario a una nueva situación de descarga se consigue en tiempos muy reducidos, inferiores a medio ciclo de marea.

Descargas grandes detienen la corriente de creciente dividiendo el estuario en dos zonas, una en la parte alta donde no invierte nunca la corriente, y la otra en la parte baja donde ocurren inversiones aunque sean de breve duración. La línea divisoria entre ambas se desplaza aguas abajo con la descarga. Descargas altas tienen el potencial de arrastrar larvas residentes en zonas de puesta y alevinaje mar adentro, produciendo previsiblemente mortalidad. Por ejemplo, una descarga de 200 m³/s mantenida dos días es capaz de producir ese efecto. Descargas más intensas lo consiguen en tiempos del orden de un día o inferiores.

2.2.c.- Llanos mareales

La existencia de antiguas marismas y la posibilidad de poder recuperarlas en un futuro ha motivado este estudio, el cual se centra en la variación que experimenta la onda de marea caso de existir llanuras inundables en el estuario. Para ello se ha realizado un ejercicio consistente en crear una llanura inundable ficticia en una de las márgenes del río (ver figura 2.2.c.1), cuya superficie es fija (32km² sobre un área total de la zona modelada de 380km²) pero con distintas profundidades para contemplar el abanico de situaciones que van desde una llanura permanentemente inundada (incluso en bajamar, cotas negativas en la figura 2.2.1.b) hasta otras que sólo se inunda con marea alta (cotas positivas en esa figura), quedando seca buena parte del ciclo mareal.

La figura 2.2.c.2 muestra que la amplitud de la oscilación mareal disminuye a medida que parte del prisma mareal invade el llano (cota +0.75, que implica que el llano no se inunda hasta que el nivel del río no alcanza esa altura) llegando a un valor estable para cotas negativas. El llano produce retrasos crecientes de la onda de marea a medida que va siendo más inundable y que se estabilizan en torno a 45-60 min cuando las cotas son negativas en el caso de estudio. El desfase afecta básicamente a la porción del río aguas arriba del lugar donde se ha ubicado el llano.

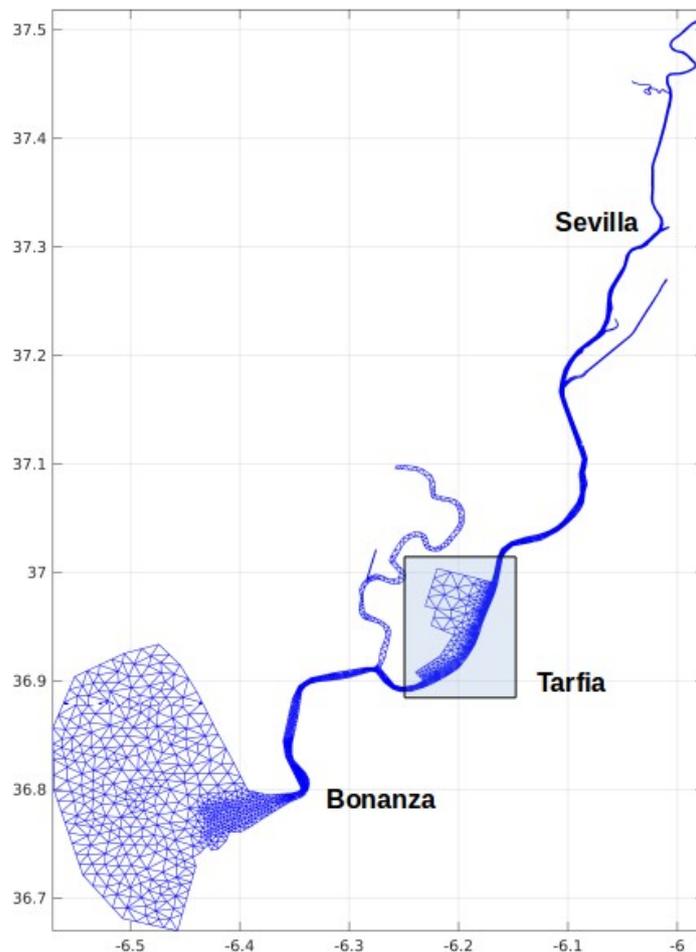


Figura 2.2.c.1.- Llanura mareal hipotética (caja azul) en la zona de Tarfia.

La corriente de marea sufre un desfase similar pero presenta un comportamiento de amplitud curioso (panel superior derecha de figura 2.2.b.2): tiende a tener más amplitud aguas abajo de la llanura inundable, reflejando el hecho de que la llanura demanda más agua oceánica para llenarse (mayor prisma de marea), pero disminuye a partir de la posición de la llanura, coherentemente con el hecho de que la oscilación disminuye también.

En conclusión, los llanos mareales producen una disminución de la amplitud de la onda de marea que, para un perímetro de inundación dado, depende de la profundidad del mismo. Cuanto más profunda mayor la deformación, aunque para valores negativos (llanura inundada en situación media) alcanza un valor límite. En el caso ficticio estudiado, la oscilación mareal puede verse disminuida hasta en un 25% a la altura de la esclusa de Sevilla. Las corrientes mareales son mayores aguas abajo de la llanura y menores aguas arriba, en lógica con la retirada de un importante volumen de agua del cauce por la propia llanura.

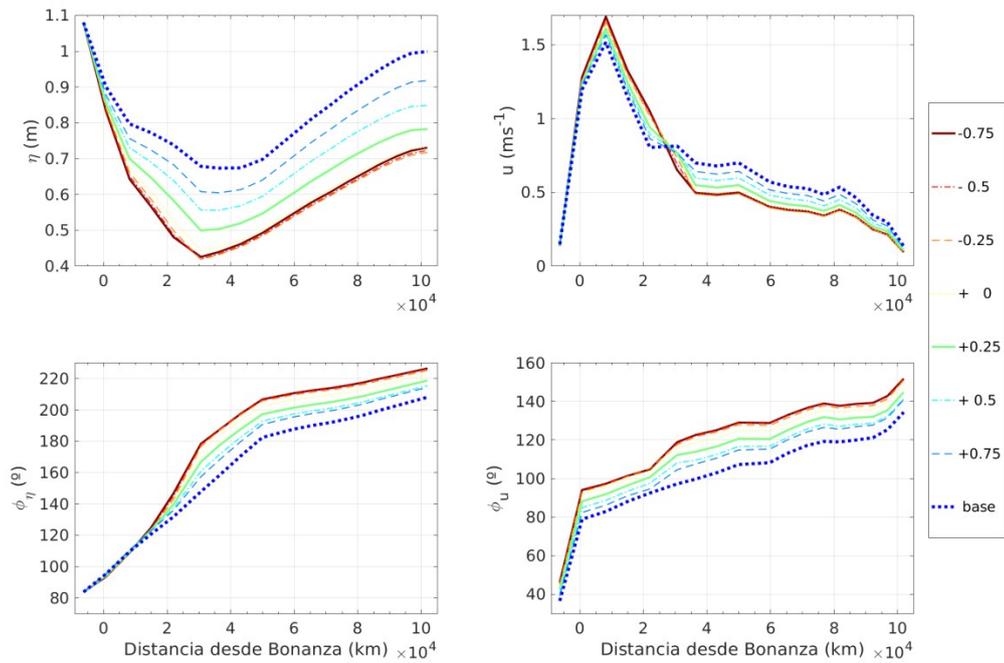


Figura 2.2.b.2.- Columna izquierda: Amplitud (arriba) y fase (debajo) de la oscilación de nivel asociada a M2 a lo largo del estuario en función de la profundidad asignada al llano mareal ficticio incorporado al estuario (Figura 2.2.b.2). Columna derecha: ídem para la corriente de marea. La simulación de referencia, denominada “base” en la leyenda, se corresponde con la configuración estándar del estuario sin llano mareal. El eje x es distancia medida desde Bonanza ($x=0$). La esclusa del puerto de Sevilla está sobre los 75km y la llanura inundable sobre los 22-35km.

La influencia que cierres hipotéticos de subsidiarios (Brazo de la Torre, Guadaira, Ribera del Huelva) pudieran tener en la propagación mareal pueden ser abordados con este mismo procedimiento, puesto que el resultado final desde un punto de vista dinámico es similar: variación del prisma mareal. La gran cantidad de posibles configuraciones que pueden idearse hace que su estudio exhaustivo sea poco útil, salvo que ya se tenga decidida la configuración final.

2.2.d.- Cambio climático

El modelo ha sido también empleado para predecir cambios en la propagación mareal derivados del cambio climático. La principal consecuencia en dicha propagación surge de una mayor altura del nivel medio del mar asociado inducido por el calentamiento global. Técnicamente, este aumento de nivel puede abordarse como una profundización equivalente de la batimetría, por lo que la aplicación del modelo es muy simple: se han generado escenarios de diferentes batimetrías que consisten simplemente en añadir a la actual de referencia el incremento

esperable de nivel del mar. No se ha cambiado el tamaño del forzamiento en la boca del estuario (se admite que las constantes armónicas en el océano no cambian) y también se ha mantenido la misma descarga ecológica de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en la presa durante el estudio.

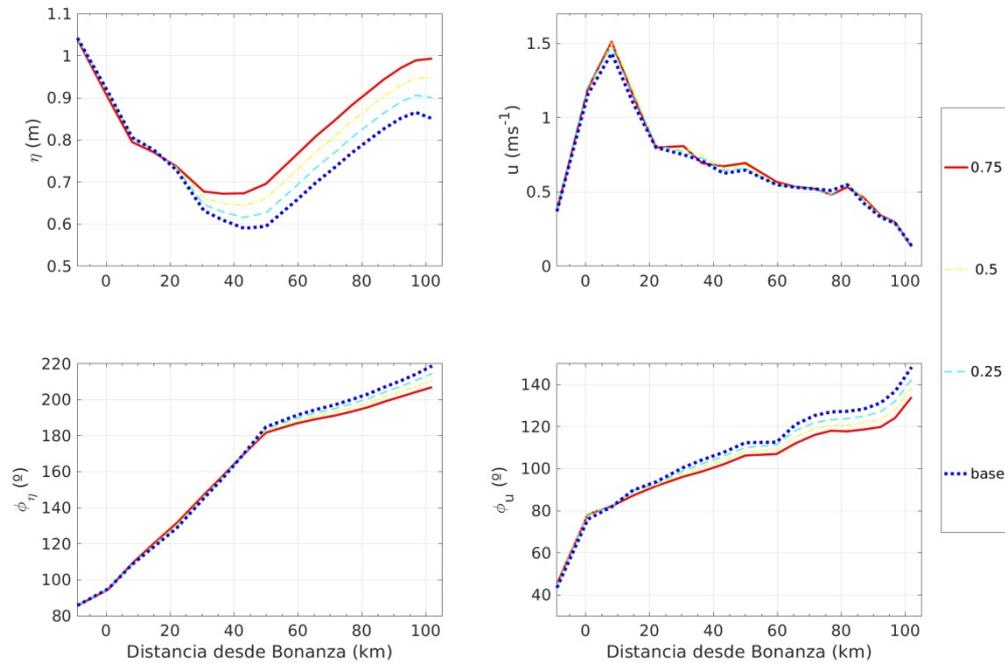


Figura 2.2.d.1.- Columna izquierda: amplitudes (panel superior) y fases (inferior) de la oscilación mareal asociada a M2 en función de la distancia para valores de aumento del nivel medio del mar en los diferentes escenarios especificados en la leyenda. La línea punteada azul corresponde con el escenario actual. Columna derecha: ídem para la corriente mareal asociada a M2. La esclusa de Sevilla se encuentra sobre el km 75.

Los resultados pueden verse en la figura 2.2.d.1 en la que se aprecia como el aumento de nivel del mar (valores en la leyenda) produce un aumento de la amplitud de M2 aguas arriba del kilómetro 20 (la mayor parte del tramo navegable) que es prácticamente lineal tanto espacialmente (más aumento cuanto más alejado del contorno oceánico) como en función del tamaño del forzamiento (mayor cuanto mayor el aumento de nivel medio del mar causado por el cambio climático). De la propia figura, se puede estimar un aumento local de la amplitud de M2 por cada cm de ascenso del nivel medio del mar en $C=0.002x$ cm, donde x es la distancia a lo largo del estuario en km medida desde ese contorno. Aguas abajo de ese punto kilométrico la amplitud no presenta cambios apreciables aunque el nivel medio del mar aumente. Teniendo en cuenta que el comportamiento del resto de constituyentes no debe diferir del de M2, se concluye que el rango mareal sigue una ley similar, aumentando en $C=0.002x$ por cada cm de aumento del nivel medio. En cuanto al tiempo de propagación (fases), el panel inferior izquierdo de la

figura 2.2.d.1 indica que no existe variación aguas abajo del kilómetro 50 respecto al escenario actual y sólo cambia muy ligeramente disminuyendo la fase (no más de $\sim 10^\circ$ en el peor de los casos, equivalente a ~ 20 min en tiempo) aguas arriba, adelantando por tanto la ocurrencia de la pleamar/bajamar en esa parte del estuario. Es un resultado esperable dado que aumenta el espesor de la lámina de agua lo que implica mayor velocidad de propagación.

Respecto a las velocidades mareales (columna derecha de la figura 2.2.d.1), la amplitud de M2 no se modifica en los diferentes escenarios en tanto que la fase indica un adelanto de los momentos de ocurrencia de los reparos mareales que depende linealmente del aumento del nivel del mar y de la distancia a la desembocadura, algo similar a lo observado para la amplitud de la oscilación discutido anteriormente. Ese adelanto es muy pequeño, no superando los 10° (20 min en tiempo aproximadamente) ni en el caso más desfavorable.

El estudio apunta a la conclusión de un aumento lineal de amplitud de la onda mareal cuanto mayor es el del nivel medio del mar, aumento que también es linealmente mayor cuanto más nos adentramos en el estuario. Puede resumirse en un coeficiente $C=0.002x$ (x distancia en km hasta la desembocadura) de aumento de amplitud mareal por cada cm de aumento de nivel medio del mar. El aumento de amplitud es inferior al del nivel medio mar inducido por el cambio climático (en proporción 1/6 aproximadamente) por lo que la lámina de agua se verá siempre aumentada (el comentario ha lugar ya que un aumento de amplitud implica no sólo pleamares más altas sino bajamares más bajas también). La ocurrencia de la pleamar se ve sólo muy ligeramente adelantada en pocos minutos en la mitad superior del estuario, las corrientes mareales son insensibles a estos cambios de nivel y la ocurrencia de los reparos mareales también se ven adelantados en tiempos similares a los de la pleamar.

Es importante notar que en estos casos de estudio se considera una batimetría modificada por una cantidad constante exclusivamente, la misma del aumento del nivel del mar. Dada la escala temporal del cambio climático (cm/década) es muy posible que existan otras modificaciones locales inducidas por el propio uso del estuario o por la erosión/sedimentación que tengan más efecto que el propio cambio climático en las amplitudes mareales, lo que distorsionaría las conclusiones arriba indicadas.

2.2.e.- Eventos extremos

Con objeto de probar la respuesta del modelo hidrodinámico con un forzamiento realista, tomamos el evento reciente más extremo del que hemos tenido noticia y sobre el que se tienen observaciones: la tormenta que azotó el golfo de Cádiz durante Noviembre del 2014.

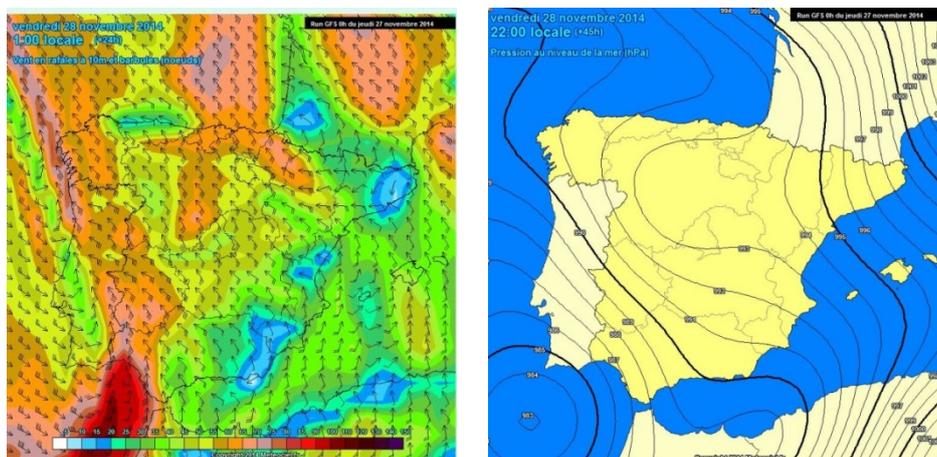


Figura 2.2.e.1.- Mapas de dirección y velocidad del viento y de presión atmosférica el día 28 Noviembre 2014.

Durante varios días (del 26 al 30 de Noviembre) se produjo una situación de mal tiempo (fuertes vientos, mala mar para la navegación, precipitaciones) como consecuencia del tránsito de dos depresiones en la parte sur de la península ibérica (figura 2.2.e.1). Las rachas de viento llegaron a alcanzar los 90 km/h en algunos puntos y cuando la segunda borrasca se aproximó al Golfo de Cádiz, dejó un registro mínimo de presión de 980 HPa. En una charla informal con el práctico mayor del puerto con D. Luis Ibarrola se nos hizo saber que en aquella ocasión se tuvo que cerrar la entrada al Puerto de Sevilla.

Se recabaron los datos meteorológicos necesarios para recrear la situación en el estuario, concretamente, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y la elevación residual del mar producida por el modelo NIVMAR en los puntos cercanos a la frontera abierta en el Golfo de Cádiz, modelo que es ejecutado rutinariamente en modo operacional por Puertos del Estado. Con objeto de discriminar la importancia de los diferentes forzamientos sobre los niveles residuales se prepararon diferentes escenarios, combinando descargas constantes y reales, introduciendo o no el efecto del viento y utilizando marea astronómica o niveles reales. Estos niveles reales son una combinación de marea y fluctuaciones de baja frecuencia producidas principalmente por las fluctuaciones en la presión atmosférica.

En la Figura 2.2.e.2 se presentan las observaciones de la superficie libre en tres estaciones (Bonanza, Sevilla y en Alcalá) utilizadas para validar las simulaciones con los diferentes escenarios propuestos. En la misma se recoge una descomposición de las fluctuaciones totales en una componente mareal y otra residual (elevación de mar menos la astronómica), que es la que resulta particularmente interesante.

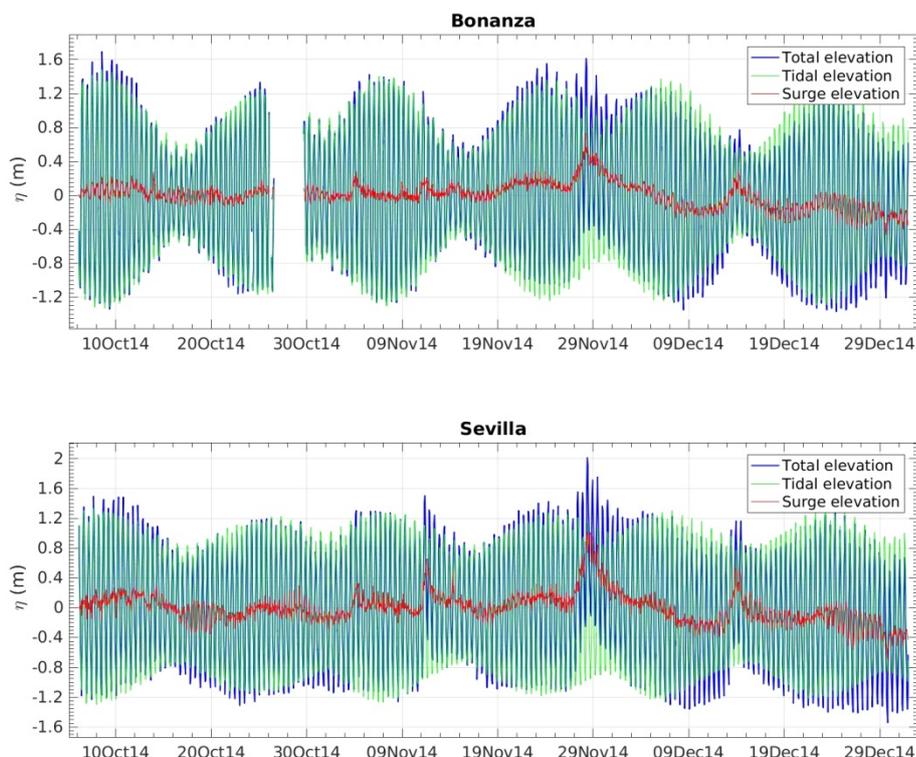


Figura 2.2.e.2. Series temporales de los residuos reales (puntos azules) y modelados obtenidas en los diferentes escenarios (líneas negro, rojo, verde y magenta) en Bonanza, Sevilla y en la presa de Alcalá.

Las Figuras 2.2.e.3 y 2.2.e.4 presentan los niveles residuales durante el tiempo modelado (tres meses, de Octubre a Diciembre 2014) con cuatro de los escenarios propuestos. El modelo aproxima bien los datos reales en los tres estaciones, tanto mejor cuanto más detalles se incluyen en el forzamiento (caso de la simulación con Nivmar+Descargas+Vientos). El incluir la parte del forzamiento meteorológico en la frontera de la plataforma mejora las observaciones cerca de la desembocadura (Bonanza), mejora que va perdiendo importancia aguas arriba (Sevilla y Alcalá) donde la inclusión de las descargas reales es el factor que mejora los niveles residuales, más en la presa de Alcalá del Río, y algo menos en Sevilla. El efecto de las descargas se desvanece en la desembocadura (Bonanza). El efecto de los vientos, aun siendo tan fuertes como los de esta época, sólo tienen importancia secundaria en todo el estuario juzgando por las diferencias entre las simulaciones que los incluyen (líneas verdes) o no (líneas negras).

El modelo barotrópico reproduce adecuadamente los valores de nivel residual del río en condiciones meteorológicas extremas, que ponen en riesgo la navegación. Es un hecho aceptado que, como consecuencia del cambio climático, se produzca un aumento de los

fenómenos meteorológicos extremos, los cuales son bien reproducidos por el modelo que se convierte en una herramienta útil en la gestión portuaria ante esos eventos.

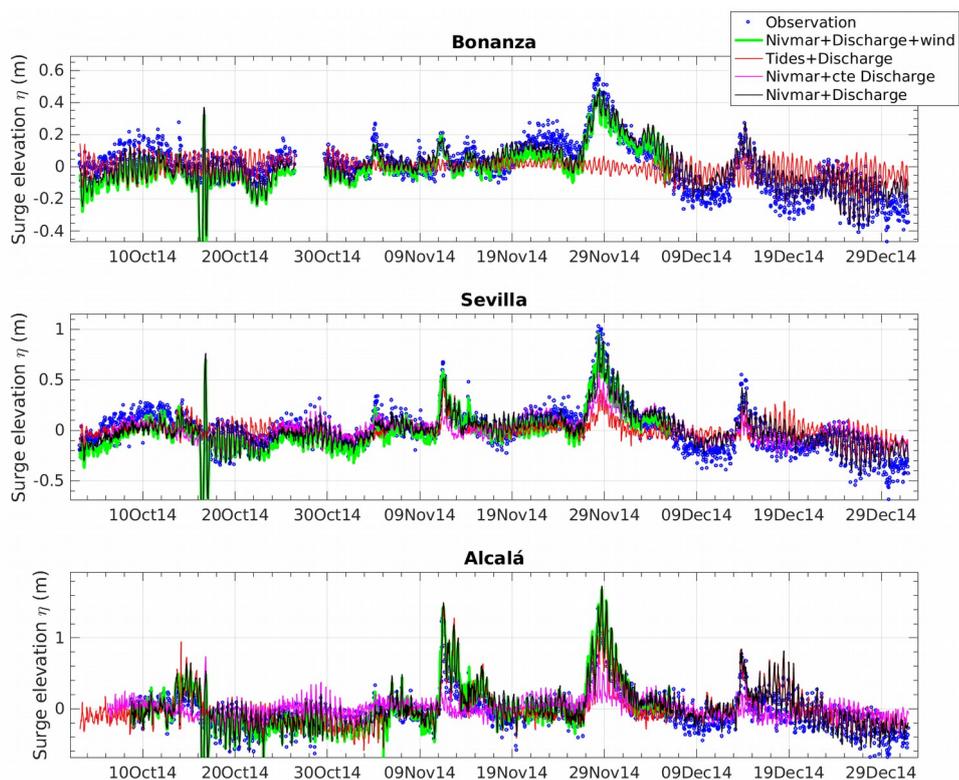


Figura 2.2.e.3.-. Series temporales de los residuos reales (puntos azules) y modelados obtenidas en los diferentes escenarios de forzamiento (líneas negro, rojo, verde y magenta, ver leyenda) en Bonanza, Sevilla y en la presa de Alcalá del Río.

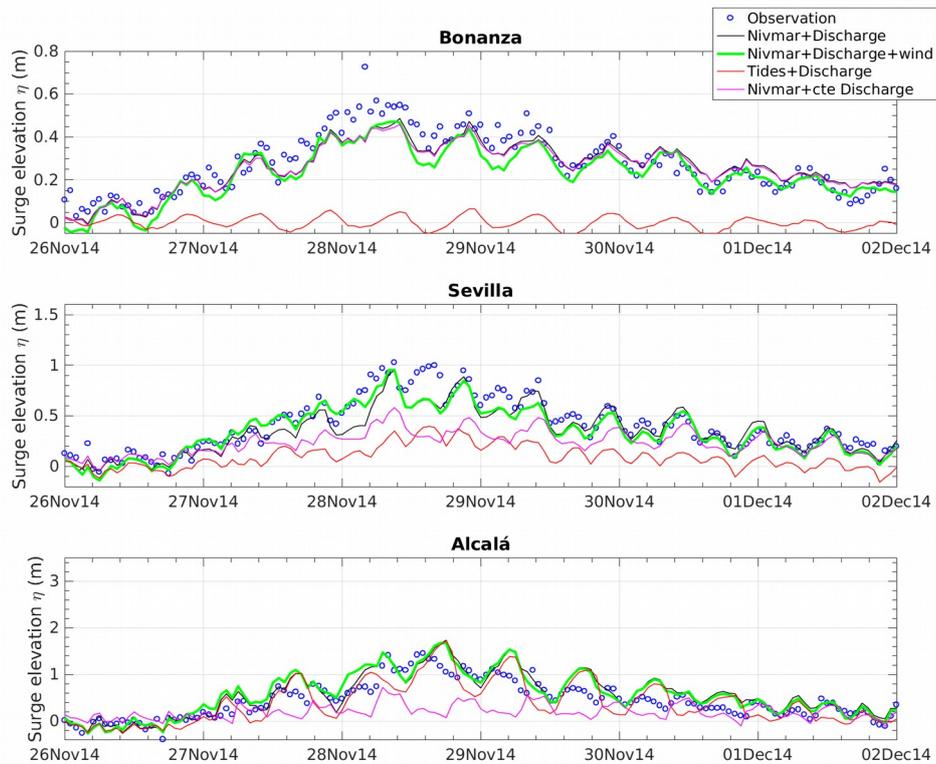


Figura 2.2.e.4.- Fragmento de la figura 2.2.e.3 durante los días de la tormenta que motivó este estudio

El reanálisis del evento extremo acaecido en Noviembre de 2014 en el que coincidió una descarga importante debido a la pluviosidad y la llegada de una fuerte borrasca ha permitido valorar la influencia de cambios bruscos de condiciones de contorno en ambos extremos del estuario. El modelo barotrópico ha proporcionado una reconstrucción muy satisfactoria del evento, lo que permite aplicarlo para estudiar la importancia de cada agente forzante. El estudio separado de los efectos de cada uno de ellos permite concluir que el nivel residual del río (tras eliminar la marea) en la parte baja del estuario depende de cambios en el contorno oceánico que consisten básicamente en variaciones del nivel del mar meteorológicamente inducidas (la descarga influye menos, como se comentó en 2.2.b), en tanto que en la parte alta del estuario depende claramente del tamaño de la descarga.

3.- MODELO BAROCLINO

En este modo, la densidad no es homogénea y por tanto influyen los campos de temperatura y salinidad (que definen la densidad) en las ecuaciones. De hecho, el modelo proporciona junto con los campos de altura de la superficie y velocidad que ya daba el modelo barotrópico (aunque el campo de velocidad en este caso es tridimensional en vez de promedio vertical) los de temperatura, salinidad y densidad.

3.1 Dominio (topografía, diferentes batimetrías, morfología)

La física del modelo no afecta al dominio y por ello se utilizan los mismos dominios que en el barotrópico. Debido al mucho mayor coste computacional del modelo en este modo baroclino, los aspectos relativos al tamaño de malla y número de nodos cobran mucha importancia a la hora de ejecutar el modelo en tiempos razonables. De nuevo, en un ejercicio preliminar se ha trabajado con los mallados de alta resolución y de menor resolución mencionados en el epígrafe 1.1 y comparado los resultados producidos y los tiempos de ejecución por el momento se opta por el mallado de menor resolución. A la vista de estos valores, se ha optado evidentemente por el dominio de menor resolución que proporciona casi idénticos resultados.

3.2 Forzamientos y calibración del modelo.

3.2.a Forzamientos.

El modelo utiliza los mismos tipos de forzamiento en los contornos que la versión barotrópica, es decir nivel del mar en el oceánico y descarga en la cabecera. Hay que imponer además condiciones sobre valores de temperatura y salinidad en ambos contornos los cuales, en los primeros estados de desarrollo del modelo, se han considerado constantes cuando son en realidad función del tiempo.

El modelo requiere también una condición inicial que se toma como la de un estuario en reposo lleno de agua de determinada temperatura y salinidad. En tanto que los valores de temperaturas no presentan grandes variaciones espaciales a lo largo del estuario, la salinidad sí varía entre el valor nulo en la cabecera y el oceánico (alrededor de 36.5psu) en la desembocadura. Hasta alcanzar una distribución espacial coherente y razonable de esta variable se requiere bastante

tiempo de ejecución, el cual se reduce si se parte de un estuario salino al que se le permite ventilar mediante descargas grandes de agua dulce.

Al igual que en el modo barotrópico, el modelo está preparado para trabajar con forzamientos radiativo y mecánico a través de la superficie libre y marea meteorológica en su contorno oceánico abierto.

3.2.b Calibración.

Siguen siendo válidas las observaciones de nivel empleadas en el barotrópico. Las observaciones de corriente son ahora más necesarias que en la calibración del modelo barotrópico porque el campo que se modela es 3-D y se requieren velocidades a distintas profundidades. El instrumento a utilizar es un perfilador de corriente (ADCP) y la estrategia de recogida de datos más compleja por dificultades técnicas obvias. Más importante es la disponibilidad de datos de salinidad, variable importante en el estuario debido a los usos diversos que se hacen del mismo (nicho ecológico de puesta y alevinaje de especies de interés comercial, regadío de campos de cultivo adyacentes, distribuciones de fito, zoo e ictioplancton...). A fecha de hoy sólo se dispone de resultados publicados con los datos recogidos en el estudio previo realizado por el CSIC, que presentan lagunas importantes y de los provenientes de muestreos irregularmente distribuidos en el tiempo que ejecuta la Junta de Andalucía dentro de su programa de Calidad de Aguas. Con estos datos se han realizado ejercicios de comparación para investigar el acuerdo con las salidas del modelo, que se presentan en las figuras de debajo. Todas ellas tienen carácter preliminar puesto que se precisan datos (series temporales de datos, más bien) de buena calidad y que se extiendan en el tiempo durante periodos significativos para proceder a una calibración más exigente. Aun así, y como se comenta en los pies de las figuras, el acuerdo es bastante estimulante. Finalmente, dado este carácter preliminar, no se quieren hacer comentarios más allá de los detallados en esos pies de figura, quedando la calibración del modelo baroclinico como tarea pendiente de completar hasta disponer de mejores datos.

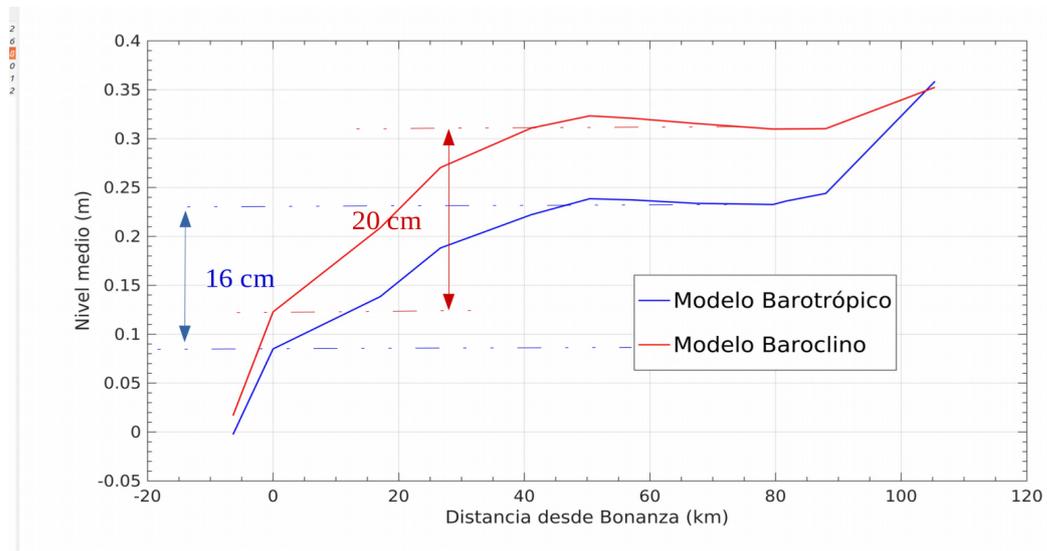


Figura 3.2.b.1.- Nivel medio generado por el modelo barotrópico y por el modelo baroclino. Las diferencias no son demasiado significativas (diferencias máximas 8 cm); el modelo baroclino aproxima el desnivel longitudinal Bonanza-Sevilla observado experimentalmente de forma más satisfactoria.

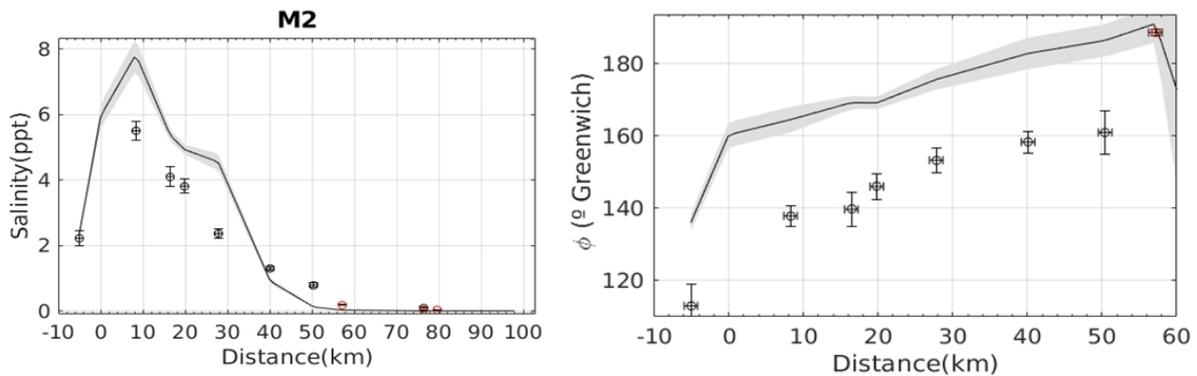


Figura 3.2.b.2.- Amplitud (izquierda) y fase (derecha) de la señal mareal de salinidad asociada a M2 en función de la distancia (el sombreado es su margen de error) producida por el modelo baroclino y resultados extraídos de los datos recogidos por el CSIC en su estudio-diagnóstico del estuario (símbolos). El patrón espacial de ambos conjuntos de datos es similar, aunque hay diferencias claras en los valores. En particular, hay un desplazamiento de unos 20° en la fase muy similar al observado entre velocidades modeladas y los datos disponibles ya comentado en un epígrafe anterior, que se propaga a la señal advectada de salinidad. Se abordará en detalle cuando se disponga de un conjunto sólido de observaciones de corriente y de salinidades.

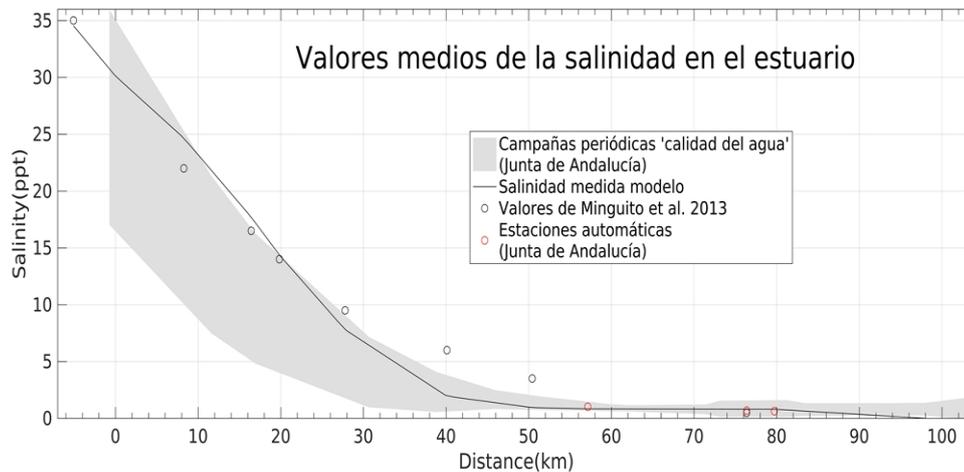


Figura 3.2.b.3.- Valor medio de la salinidad en el estuario obtenido de las diversas fuentes indicadas en la leyenda. La zona sombreada proviene de los datos recogidos periódicamente por la Junta de Andalucía, que tiene mucha dispersión debido al muestreo irregular que siguen. Los círculos negros son valores publicados en el trabajo indicado, deducidos de observaciones de corta duración recogidas durante el estudio del CSIC. Los círculos rojos provienen de estaciones automáticas desplegadas por la Junta de Andalucía que tienen mayor duración temporal y proporcionan datos más fiables. Finalmente, la línea continua es el valor medio producido por el modelo durante una simulación de 21 meses de duración forzado con descargas reales. Los resultados son satisfactorios aunque debe trabajarse más la calibración cuando se disponga de mejores datos para ello.

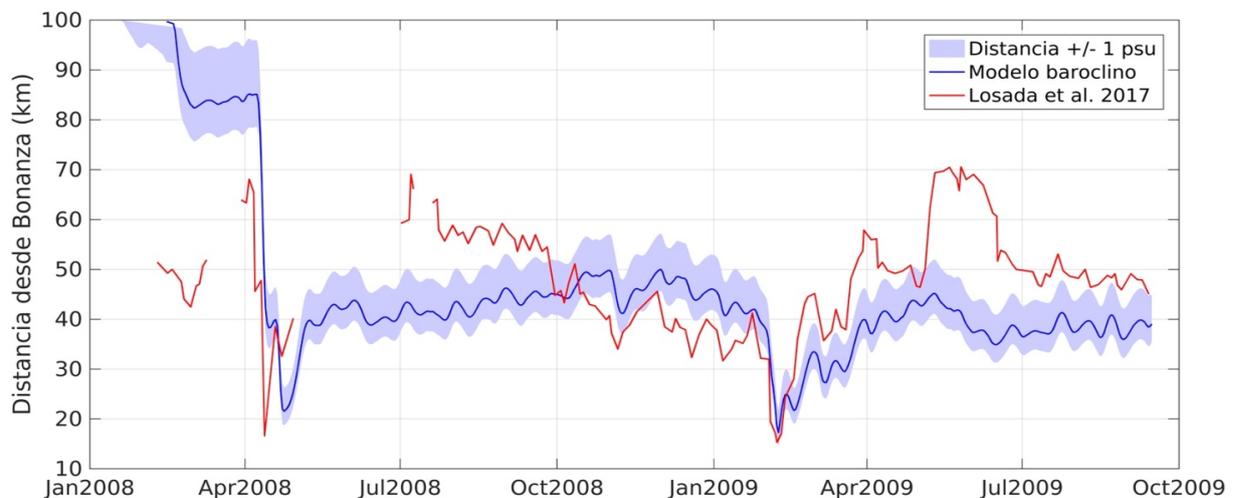


Figura 3.2.b.4.- Comparación de la posición de la línea de 2 psu de salinidad en el estuario (medida desde Bonanza) obtenida de los valores publicados en el artículo mencionado (línea roja), deducidos de las observaciones recogidas durante el estudio del CSIC, y los predichos por el modelo durante esa época usando las descargas reales facilitadas por la CHG (línea azul). El sombreado indica la extensión de la región de ± 1 psu alrededor del valor 2 psu de referencia. Un hecho curioso a destacar es que el modelo tarda mucho tiempo en ajustar sus condiciones iniciales (impuestas como un estuario de salinidad uniforme similar a la del océano) a un gradiente realista salvo que se produzca una importante descarga, que es lo que ocurrió en Abril de 2008. En esas circunstancias, el ajuste se realiza rápidamente. Otro hecho curioso es observar que las discrepancias entre ambos conjuntos de datos tiende a ocurrir en verano: los datos indican una penetración de la cuña salina en el estuario mayor durante el verano, un hecho real que también es conocido por los lugareños. La explicación que parece tener este comportamiento es la retirada de agua dulce para regadío que ocurre en esta época del año, y que tiene lugar en la parte media del estuario donde se sitúan los campos de regadío adyacentes. Esta retirada no está contemplada en el modelo, que sigue forzado por las descargas facilitadas por la CHG. Sin embargo la mayor parte de ellas no prosigue aguas abajo hasta la desembocadura, lo que falsea necesariamente las predicciones del modelo, el cual necesitará correcciones para incorporar esta realidad.

4. ESTADO ACTUAL, DEFICIENCIAS Y MEJORAS

El estado actual del modelo queda descrito en la tabla 4.1. La recopilación de la información sobre los diferentes ámbitos implicados en la elaboración del proyecto, las capacidades computacionales necesarias y los diferentes aspectos relacionados con la generación de la malla (por el momento se utilizan dos mallas de diferente resolución), la manipulación de la batimetría (los continuos dragados de mantenimiento obliga a definir una batimetría dependiente del tiempo) y los forzamientos de contorno están concluidos (datos para el forzamiento meteorológico que completan al modelo únicamente forzado por mareas). La calibración-validación está en fase avanzada casi terminada. En particular, se ha conseguido una buena batimetría de la parte alta del estuario y observaciones de numerosos mareógrafos desplegados en el estuario por el Instituto Hidrográfico de la Marina. En cualquier caso, hasta el momento se han realizado numerosos ejercicios de calibración, por lo que la tarea está bastante automatizada y suficientemente probada. Por tanto, la actualización y mejora del modelo resulta bastante rutinaria y con una previsible rápida implementación.

Estado actual Modelo SHYFEM	Estado Inicial	Estado intermedio	Estado avanzado
Capacidades computacionales		X	
Generación de malla y Batimetría			X
Forzamientos de contorno.			X
Calibración-Validación.			X
Descargas			X
Forzamiento meteorológico			X

Tabla 4.1 . Estado de desarrollo del modelo hidrodinámico (barotrópico y baroclino).

El modelo barotrópico, de baja y alta resolución, está ajustado para representar todas las observaciones actuales de la mejor forma posible. Por tanto, en el momento en que se escribe estas conclusiones , la ejecución resulta muy satisfactoria a la hora de reproducir la evolución de la onda de marea en el estuario entre Bonanza y Sevilla; se cubren las necesidades básicas del modelo como apoyo a la navegación.

El modelo baroclino implementado en una malla de alta resolución resulta poco operativo por su alto coste computacional (al menos por el momento); no así el modelo implementado en una malla de resolución más moderada. . Por el momento, los trabajos están iniciados con situaciones con pocos datos y esperamos que futuros datos solucionen este problema. Este modelo sirve de base para muchos de los trabajos de investigación iniciados por otros grupos de trabajo y, aunque no tiene la prioridad del modelo barotrópico para ciertos aspectos de estudio (navegabilidad, en concreto), si requiere un esfuerzo adicional que permita tenerlo operativo a la finalización del presente convenio.

5. ESTADO CONTRACTUAL Y DESARROLLO DEL PROYECTO.

Cumpliendo con las estipulaciones en el convenio de colaboración, el seguimiento de los trabajos desarrollados y resultados de los mismos se realiza a través de una Comisión de Seguimiento que se reunirá al menos con periodicidad trimestral con carácter ordinario y con carácter extraordinario cuando alguna de las partes lo solicite. Quedamos a la disposición de dicha Comisión para la ampliación de los detalles que no queden lo suficientemente explícitos en el presente informe.

Modelo Barotrópico y baroclino.	Estado Inicial	Estado intermedio	Estado avanzado
Objetivo prioritario 1. Predicción del espesor de la lámina de agua en cualquier instante y lugar del estuario.			X
Objetivo prioritario 2. Modificaciones hidrodinámicas consecuencia de los dragados de mantenimiento del estuario.		X	
Objetivo prioritario 4. Influencia de las descargas de la presa de Alcalá del Río en el régimen hidrodinámico del estuario.			X
Objetivo prioritario 7. Evolución espacio-temporal de la salinidad en el estuario y el alcance de la cuña salina.		X	
Objetivo 3. Influencia de la posible inundación de llanos mareales en la hidrodinámica del estuario .		X	
Objetivo 5. E volución de la hidrodinámica del estuario bajo escenarios de subida del nivel del mar debido al calentamiento global.			X
Objetivo 8. Primeros desarrollos de un modelo de exportación/importación de sedimentos.	X		

Tabla 5.1 . Objetivos recogidos en el anexo técnico del convenio, ordenados por grado de prioridad y estado de desarrollo de los mismos.

La tabla 5.1 recoge por objetivos (los mismos que se incluyeron en la memoria técnica del presente convenio de colaboración) el nivel de desarrollo con el modelado numérico del estuario descrito en este informe. En la misma tabla se muestra el grado de prioridad que se le asigna a cada uno.

Los trabajos realizados hasta este momento podemos considerar que:

- ✓ el objetivo prioritario 1 está en un nivel de desarrollo muy avanzado, concretamente en lo concerniente a la predicción de la marea en cualquier parte del estuario.
- ✓ los objetivos prioritarios 2 está en fase intermedia. Se han probado las sucesivas batimetrías mejoradas tal y como se ha indicado en capítulos anteriores, cambios de profundidad y diferentes mallas con resoluciones espaciales diferentes. Queda por diseñar unos escenarios de simulación de dragados en diferentes zonas que permita abordar las modificaciones que suponen estos trabajos de mantenimiento.
- ✓ objetivo prioritario 4, se han recopilado datos de descargas y de nivel del agua evaluándose posteriormente las componentes de marea. El modelo se ha forzado con descargas en diferentes áreas para ver cómo las gestiona numéricamente, pero sin el objetivo de estudiar en detalle su influencia, se ha centrado los esfuerzos en la principal descarga, la presa de Alcalá.
- ✓ el objetivo 3 sigue estando fase intermedia a falta de tener un conocimiento preciso de la extensión y ubicación de los posibles llanos mareales. Tanto las observaciones directas (por navegación a lo largo del estuario) como la inferencias indirectas (por inspección de las salidas del modelo) no sugieren su existencia en la configuración actual (los márgenes están levantados para evitar inundaciones de los terrenos adyacentes). En cualquier caso, se buscará información de las zonas inundables en las correspondientes instituciones.
- ✓ el objetivo 5, sobre el futuro nivel del mar bajo escenarios debido al cambio climático, se encuentra en fase avanzada, el esquema básico de trabajo está totalmente implementado. Estamos pendiente de fijar la mejor configuración del modelo para abordar esta cuestión. En particular, necesitamos fijar la ubicación de la superficie libre sin mareas respecto al nivel en Alicante.
- ✓ objetivo prioritario 7 se encuentra en fase intermedia. Se han recopilado los datos de salinidad y temperatura y se han realizado simulaciones preliminares. Se pondrá mayor esfuerzo en modelizar la cuña salina.
- ✓ Se tiene la intención de empezar a implementar el módulo 8 de sedimentos a finales del año

CONSIDERACIONES ADICIONALES

- Necesidad de datos de corrientes (ADCP).
- Obtención de series temporales largas de temperatura y salinidad para validar el modelo baroclino y simular en detalle la cuña salina.

Conclusiones preliminares del estudio de modelado (y productos producidos) (Noviembre 2017)

A.- MODELO BAROTROPICO

1. Como resultado de esta actividad y trabajo previo se ha concluido con la elaboración del dominio a modelar que incluye todas las sucesivas mejoras y refinamientos, que es considerado como el mejor de los posibles en ese equilibrio coste/resolución y que conforma la versión v.1 base de todos los sucesivos cálculos.
2. Tras el nuevo ajuste de parámetros, el modelo predice las oscilaciones de la superficie libre a lo largo del estuario con una precisión de 8cm y 20 min de desfase respecto al instante de llegada de la pleamar/bajamar. Se estima que la calidad de predicción de corrientes debe ser similar a falta de contrastación definitiva con nuevos datos de calidad. Como conclusión se deja constancia de la disponibilidad de esta poderosa herramienta predictiva (Modelo barotrópico v.1) que pronostica el comportamiento mareal del estuario con una precisión de $\pm 8\text{cm}$ en la amplitud de la oscilación mareal (incertidumbre $< 4\%$) y de $\pm 20\text{min}$ en el momento de ocurrencia de la pleamar/bajamar.
3. Como resultado final se dispone de un modelo barotrópico v.1a que reproduce el espesor de la lámina de agua con una precisión promedio estimada de 8 cm en cuanto a amplitud (RMSE) y de 20 minutos en cuanto a la ocurrencia de las pleamares que está ya siendo utilizada con éxito en la gestión de la navegación del estuario por la APS.
 - ✓ *.- Tablas que dan la altura total de la superficie a intervalos de tiempo seleccionables, por defecto horarios, y que pueden suministrarse también como tablas de marea con horas y alturas de pleamar/bajamar). Actualmente, estas tablas han sido producidas para los años 2017 y 2018.*
 - ✓ *- Idem para corrientes de marea en el supuesto de una descarga media en la presa de Alcalá de 50 m³/s próximo al valor ecológico establecido por la CHG.*
 - ✓ *.- Espesor de la lámina de agua a intervalos de tiempo seleccionables (salida de la mejora v.1a del modelo), en formato similar al de la altura de la superficie libre indicado en 2.1.a.*
 - ✓ *- Programa interactivo de apoyo a la navegación (Figura 2.1.d.1) que calcula el espesor de la lámina de agua en cualquier instante y gestiona unos mínimos de seguridad que hacen saltar alertas si se sobrepasan. Necesita las tablas de marea producidas en 2.1.a.*
 - ✓ *- Diseño y generación de un índice local que refleje la intensidad de la marea y que sustituya a los obsoletos "coeficientes de marea" rutinariamente empleados y cuya validez es discutible. Los nuevos coeficiente (dos valores diarios) se obtienen del rango de marea en Bonanza.*

B.- CASOS DE ESTUDIO (APLICACIÓN MODELO BAROTRÓPICO)

B1.-Marea meteorológica

La marea meteorológica produce una perturbación que suma linealmente con la marea astronómica aumentando o disminuyendo el nivel a lo largo del estuario en la misma cantidad que se observa en el contorno oceánico y que no retrasa frente al forzamiento. Los rangos mareales también se ven modificados, aumentando (disminuyendo) ligeramente en situaciones de altas (bajas) presiones. La lámina de agua se ve pues afectada por ambos

hechos: bajo altas presiones, se produce un descenso de nivel forzado meteorológicamente y un aumento de rango mareal que hace disminuir el espesor de la lámina alrededor de la bajamar en valores que deben ser contemplados y que restan margen de seguridad a la navegación. Las bajas presiones por el contrario aumentan el espesor y amplían ese margen.

B2.-Descargas de agua dulce

1. Las descargas tienden a disminuir la amplitud de la onda de marea y a retrasar su progresión, especialmente en la parte alta del estuario, mientras que el nivel medio aumenta hacia la cabecera del estuario. Ambos efectos combinados originan un aumento en todo instante del espesor de la lámina de agua. La velocidad mareal muestra un patrón similar al de oscilación aunque la reducción de amplitud y el retraso están más acentuados. La respuesta del estuario a una nueva situación de descarga se consigue en tiempos muy reducidos, inferiores a medio ciclo de marea.
2. Descargas grandes detienen la corriente de creciente dividiendo el estuario en dos zonas, una en la parte alta donde no invierte nunca la corriente, y la otra en la parte baja donde ocurren inversiones aunque sean de breve duración. La línea divisoria entre ambas se desplaza aguas abajo con la descarga. Descargas altas tienen el potencial de arrastrar larvas residentes en zonas de puesta y alevinaje mar adentro, produciendo previsiblemente mortalidad. Por ejemplo, una descarga de 200 m³/s mantenida dos días es capaz de producir ese efecto. Descargas más intensas lo consiguen en tiempos del orden de un día o inferiores

B3.- Llanos mareales

1. Los llanos mareales producen una disminución de la amplitud de la onda de marea que, para un perímetro de inundación dado, depende de la profundidad del mismo. Cuanto más profunda mayor la deformación, aunque para valores negativos (llanura inundada en situación media) alcanza un valor límite. En el caso ficticio estudiado, la oscilación mareal puede verse disminuida hasta en un 25% a la altura de la esclusa de Sevilla. Las corrientes mareales son mayores aguas abajo de la llanura y menores aguas arriba, en lógica con la retirada de un importante volumen de agua del cauce por la propia llanura.

B4.- Cambio climático

1. El estudio apunta a la conclusión de un aumento lineal de amplitud de la onda mareal cuanto mayor es el del nivel medio del mar, aumento que también es linealmente mayor cuanto más nos adentramos en el estuario. Puede resumirse en un coeficiente $C=0.002x$ (x distancia en km hasta la desembocadura) de aumento de amplitud mareal por cada cm de aumento de nivel medio del mar. El aumento de amplitud es inferior al del nivel medio mar inducido por el cambio climático (en proporción 1/6 aproximadamente) por lo que la lámina de agua se verá siempre aumentada (el comentario ha lugar ya que un aumento de amplitud implica no sólo pleamares más altas sino bajamares más bajas también). La ocurrencia de la pleamar se ve sólo muy ligeramente adelantada en pocos minutos en la mitad superior del estuario, las corrientes mareales son insensibles a estos cambios de nivel y la ocurrencia de los reparos mareales también se ven adelantados en tiempos similares a los de la pleamar.

B5.- Eventos extremos

1. El reanálisis del evento extremo acaecido en Noviembre de 2014 en el que coincidió una descarga importante debido a la pluviosidad y la llegada de una fuerte borrasca ha permitido valorar la influencia de cambios bruscos de condiciones de contorno en ambos extremos del estuario. El modelo barotrópico ha proporcionado una reconstrucción muy satisfactoria del evento, lo que permite aplicarlo para estudiar la importancia de cada agente forzante. El estudio separado de los efectos de cada uno de ellos permite concluir que el nivel residual

del río (tras eliminar la marea) en la parte baja del estuario depende de cambios en el contorno oceánico que consisten básicamente en variaciones del nivel del mar meteorológicamente inducidas (la descarga influye menos), en tanto que en la parte alta del estuario depende claramente del tamaño de la descarga.

C.- MODELO BAROCLINO

1. En estado avanzado de desarrollo; pendiente de disponer de datos fiables para proceder a su calibración final. A fecha de hoy se puede afirmar que el modelo reproduce bien la formación y dinámica de la cuña salina aunque a falta de una calibración definitiva es poco recomendable hacer uso del mismo para estudios de detalle.
2. Un resultado curioso es constatar que el modelo predice intrusiones más cortas (menor penetración) de la cuña salina en verano de lo que dicen las escasas observaciones de las que se dispone y lo que confirma el saber popular. La voluminosa retirada de agua dulce para regar los cultivos adyacentes que se hace en verano, parece propiciar que la descarga de agua no llegue al mar y la intrusión salina progrese fácilmente río arriba (hipótesis no contrastada). Esta circunstancia debe ser incorporada de alguna forma al modelo para llevar adelante estudios finos. Aunque identificada, aún no ha sido implementada.

D.- OTROS MÓDULOS (sedimentos, biológico)

1. No abordados en esta primera fase. Se contempla su desarrollo en fases sucesivas (no se descarta alguna tentativa en esta línea antes de finalizar el convenio en Abril de 2017 en nuestro caso, aunque tampoco se afirma que se vaya a hacer).

Informe Final

MODELO HIDRODINÁMICO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL DEL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR Y ZONAS ALEDAÑAS

Abril 2018



Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. MODELO BAROTROPICO.....	7
2.1 Dominio (topografía, diferentes batimetrías, morfología).....	7
2.2 Forzamientos y calibración del modelo.....	9
2.2.a Forzamientos.....	9
2.2.b Calibración.....	9
2.3 El problema del cero del río y el espesor de la lámina de agua.....	14
3.- APLICACIONES DEL MODELO BAROTROPICO.....	16
3.1.- Productos finales operativos producidos por el modelo barotrópico v.1.....	16
3.2.- Casos de Estudio.....	18
3.2.a.- Marea meteorológica.....	18
3.2.b.- Descargas de agua dulce.....	21
3.2.c.- Llanos mareales.....	26
3.2.d.- Cambio climático.....	28
3.2.e.- Eventos extremos.....	30
4.- MODELO BAROCLINO.....	35
4.1 Dominio (topografía, diferentes batimetrías, morfología).....	35
4.2 Forzamientos y datos para la calibración del modelo.....	36
4.2.a Forzamientos.....	36
4.2.b Datos para la calibración.....	36
4.3 Resultados preliminares del modelo Baroclino.....	37
5. MODELO DE SEDIMENTOS.....	48
6. ESTADO ACTUAL, DEFICIENCIAS Y MEJORAS.....	52
ANEXO A: OSCILACIONES (MAREALES) DEL NIVEL DEL RÍO CON RESPECTO AL CERO DE ALICANTE.....	54
A.1.- Sobre los “ceros” de los mareógrafos (Bonanza-Sevilla).....	54
A.2.- Sobre la batimetría (referida al 0 de Alicante).....	58
A.3.- Resultados.....	60
A.4.- Salida que se envía a la Autoridad Portuaria de Sevilla.....	62
A.5.- Bibliografía.....	64
A. 6.- Nota técnica de nivelación del clavo de referencia del mareógrafo de la Esclusa.....	65
ANEXO B: CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MODELADO (Y PRODUCTOS PRODUCIDOS).....	66
A.- Modelo barotrópico.....	66
B.- Casos de estudio (aplicación modelo barotrópico).....	67
B1.-Marea meteorológica.....	67
B2.-Descargas de agua dulce.....	67
B3.- Llanos mareales.....	68
B4.- Cambio climático.....	68
B5.- Eventos extremos.....	68
C.- Modelo baroclino.....	69
C.- Modelo de sedimentos.....	69
ANEXO C: CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MODELADO. HOJA RESUMEN.	70

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de este proyecto, el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA) tiene encomendada la tarea de poner a punto un modelo numérico del estuario del Guadalquivir que proporcione una herramienta útil para las diversas facetas de gestión del estuario. Particularmente, existe interés especial por parte de la Autoridad Portuaria de Sevilla (APS) en incidir sobre aquellos aspectos relacionados con la navegabilidad del río.

Cumpliendo con las estipulaciones en el contrato de colaboración entre la Universidad de Málaga (UMA) y la Autoridad Portuaria del Puerto de Sevilla (APS) concretamente la tercera, GOFIMA presenta este informe donde se exponen los trabajos realizados y se detallan las conclusiones alcanzadas. El informe incluye tres anexos que incorporan diversos documentos que se han ido remitiendo a la APS y a otros actores del contrato con el fin de tenerlos reunidos en un único documento final.

La planificación del trabajo contemplaba la implementación del modelo en dos fases diferenciadas, de complejidad creciente desde el punto de vista computacional. En una primera fase se desarrollaría un modelo barotrópico del estuario en el cual se simplifica la estructura tridimensional del estuario utilizando una densidad homogénea y campos de velocidades promediadas verticalmente en los nodos de la malla. En la segunda fase se abordaría el modelo baroclino en el cual se investiga la estructura tridimensional del estuario incluyendo los campos de salinidad y temperatura además de los de nivel de la superficie libre y velocidad.

El modelo barotrópico está completamente concluido, validado y calibrado con observaciones de alta calidad, y por lo tanto es una herramienta disponible que ya está produciendo resultados útiles. El capítulo 2 describe todas las actividades realizadas para conseguir el producto definitivo del modelo barotrópico y el capítulo 3 utiliza el modelo para abordar distintas situaciones hipotéticas que pudieran darse. Concretamente en este capítulo se exponen los avances en la sensibilidad del modelo a la resolución de la malla espacial (alta y baja resolución), cambios en los valores batimétricos, llanuras inundables, aumento de nivel del mar producido por el cambio climático, variaciones de descargas de agua dulce en la presa de Alcalá, etc. Por último, se incluye el estudio de un fenómeno extremo, concretamente una tormenta, para probar las capacidades del modelo ante situaciones realistas.

El modelo baroclino está también concluido, pre-calibrado con las pocas observaciones que hay disponibles a fecha de hoy y a falta de realizar una calibración fina que requiere la disponibilidad de datos de calidad constatada, los cuales no han sido facilitados aún porque han de ser adquiridos. Las campañas para ello están aún por definirse y realizarse, por lo que la calibración final está pendiente. Aún así los resultados producidos por este modelo que proporciona campos 3D de velocidad, temperatura y

salinidad en el estuario son consistentes y bastante robustos, y se presentan en el capítulo 4. Por razones de interés práctico, el foco del análisis se centra en la salinidad y deben tomarse con la correspondiente cautela por lo anteriormente dicho.

Ajustándose a los compromisos del convenio, se ha llevado a cabo también un estudio muy preliminar de transporte de sedimentos y sedimentación en las inmediaciones de la desembocadura del estuario (para caso de sedimentos finos). En el convenio, el estudio de este tópico quedaba recogido en grado de tentativa puesto que el análisis riguroso de transporte de sedimentos se aplazaba para futuros convenios. Por ello, los resultados que se presentan y discuten someramente en el capítulo 5 sobre sedimentos son claramente preliminares, aunque prometedores.

Dado que el mayor interés de la APS, con referencia a la navegación a lo largo del estuario, es conocer el espesor de la lámina de agua en todo momento y que este espesor depende no sólo del nivel instantáneo que cambia con la marea sino también del espesor medio del río respecto a un nivel de referencia al que la sumar mencionada oscilación mareal, surgió la cuestión de cuál es el nivel real del río respecto al cero geodésico de Alicante (respecto al cual se facilita la batimetría). Aunque esta cuestión no está expresamente recogida en los compromisos de GOFIMA recogidos en el convenio, el grupo asumió este estudio realizando un informe que se incluye con el presente a modo de Anexo A.

A lo largo de las distintas secciones de este documento y cuando procede o se estime conveniente, se incluyen sentencias cortas en *itálica* que resumen las conclusiones o resultados fundamentales de los correspondientes epígrafes. La razón de esta manera de proceder es construir con ellas un resumen de los principales hitos y resultados obtenidos del estudio de simulación realizado, que se incluye como Anexo B. Una versión preliminar, aunque muy completa, de este documento-resumen se le remitió en su día al coordinador general del estudio del estuario, el catedrático de la Universidad de Sevilla D. José Carlos García Gómez para que pudiera integrarlo en otro documento de mayor envergadura con los resultados obtenidos por otros equipos que intervienen en ese estudio global. Finalmente, una versión sumaria de una página de dicho documento-resumen, solicitada también por el coordinador se adjunta como Anexo C.

Junto con este documento se facilita un DVD con la versión electrónica del informe (pdf) y animaciones multimedia de alguno de los muchos resultados producidos por los modelos dentro del proyecto.

2. MODELO BAROTROPICO

Es un modelo tridimensional pero en el que no existen diferencias de densidad (estuario homogéneo) y se trabaja con velocidades promediadas verticalmente. Las salidas del modelo son altura de la superficie y velocidad vertical promedio en cada nodo del dominio. Aunque el dominio es tridimensional (XYZ), las salidas que produce son bidimensionales (sólo XY, al integrarse las velocidades en la vertical).

2.1 Dominio (topografía, diferentes batimetrías, morfología)

El primer paso de la modelación numérica es la implementación del dominio (ver Figura 2.1), que incluye la batimetría del cauce, la morfología del río y la definición de los contornos abiertos. Para ello la APS ha facilitado un conjunto de batimetrías que cambian con el tiempo debido a los dragados periódicos de mantenimiento. Estas variaciones son un inconveniente importante porque el mallado del dominio nunca puede darse por definitivo, como ocurre en el modelado de otros entornos. Por esta razón se ha desarrollado un procedimiento que permite sustituir la topografía de tramos que sufren modificación sin tener que rehacer todo el dominio. Aparentemente simple, esta tarea puede producir discontinuidades topográficas que repercuten en el modelo ocasionando inestabilidades numéricas. Solucionar este problema no trivial ha sido un hito importante en el desarrollo del modelo.

El interés que tiene el disponer de configuraciones históricas del estuario, que son diferentes de la actual, ha llevado a conservar la información de dominios pasados para poder realizar ejercicios de comparación o de sensibilidad frente a variaciones topográficas. Todas ellas se mantienen salvaguardadas y listas para ser empleadas .

Otro hito ha sido el obtener batimetría de aquellas porciones del estuario que no son de interés directo para la navegación y sobre las que, por tanto, no existen levantamientos. Sin embargo, para el modelo numérico son tan esenciales como las demás. En esta situación estaba el extenso tramo de río entre el puerto de Sevilla y la presa de Alcalá del Río, sobre el que no se tenía información, y los afluentes subsidiarios como el Brazo de la Torre, o el Guadaira o Rivera de Huelva. Respecto al tramo aguas arriba de Sevilla, la APS promovió una campaña que ha obtenido datos batimétricos de buena calidad y resolución y que han sido facilitados recientemente (Agosto 2017) para ser incorporados al dominio del modelo. En cuanto a los subsidiarios, se ha procedido a incorporar la morfología de los mismos usando directamente mapas de GoogleEarth y asignando profundidades razonables a falta de mejor información. Dado que estos

ramales no son críticos en los estudios de propagación mareal, esta aproximación es aceptable una vez corregida y matizada en los ejercicios de calibración del modelo.

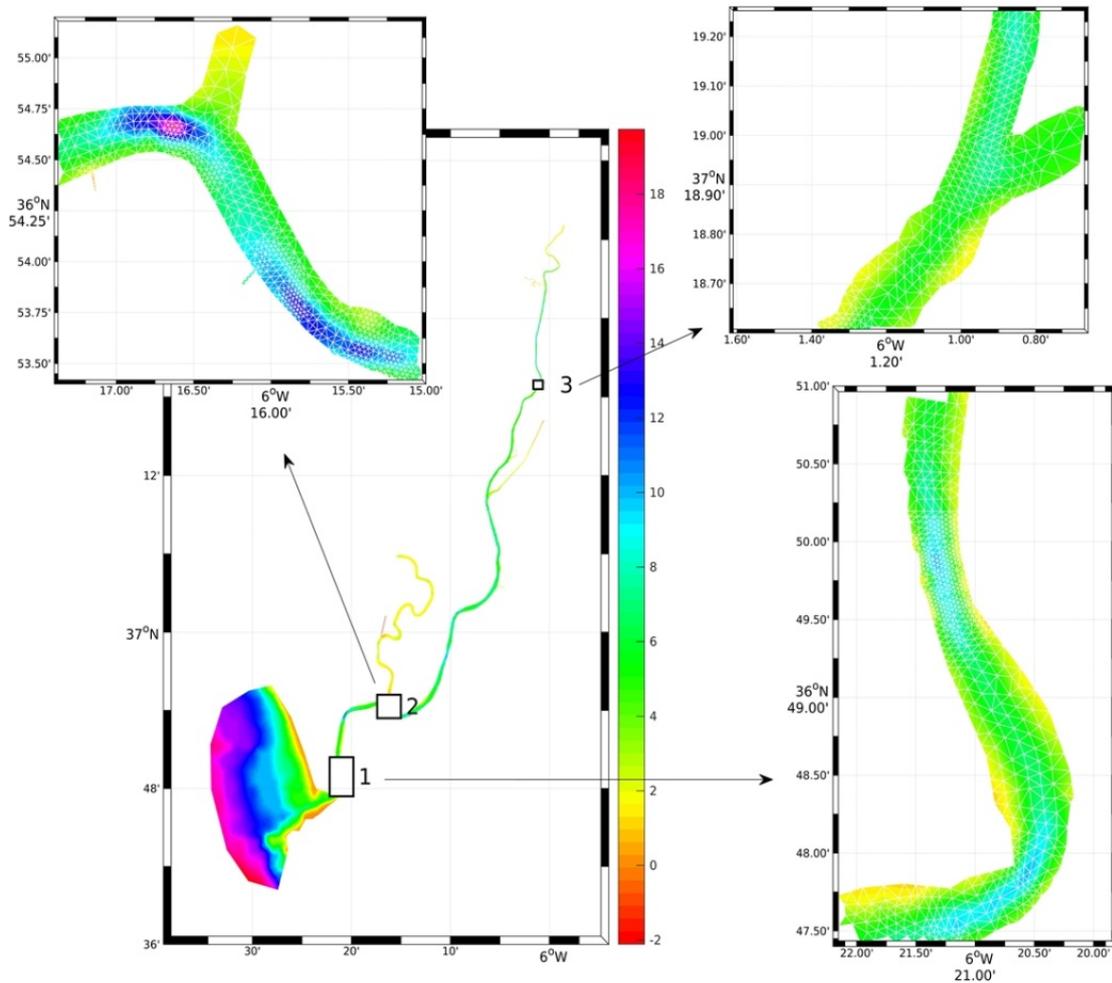


Figura 2.1- Dominio del modelo mostrando detalles de parte del estuario. Las condiciones de contorno se imponen en la parte oceánica (Tonos violetas en la parte inferior izquierda del mapa) y en la cabecera del estuario en la presa de Alcalá. Los colores indican profundidades de acuerdo con la escala de color.

Los contornos abiertos se corresponden con la presa de Alcalá en la cabecera del estuario, donde se prescriben los caudales de agua dulce, y un arco de circunferencia en la parte de la desembocadura, dentro de la plataforma continental, donde se impone el forzamiento mareal y otro tipo de forzamientos

El siguiente ejercicio de índole técnica es la definición del tamaño de los elementos de la malla, que tiene consecuencias obvias en los tiempos de ejecución y coste computacional del modelo. Para ello se generaron una serie de mallados de diferente definición y se compararon los resultados que se producían con unos y otros. Para resumir, la comparación final se realizó entre un mallado de muy alta resolución (42311 nodos) y otro de menor resolución (11185 nodos) comparándose por un lado los resultados producidos por una y otra configuración y por otra los tiempos de ejecución. Se ha comprobado que los resultados apenas difieren en un 2%, si se utiliza la misma

calibración, en tanto que los tiempos de ejecución se reducen en un 80% por lo que la decisión final tomada es trabajar con el mallado de baja resolución.

Como resultado de esta actividad y trabajo previo se ha concluido con la elaboración del dominio a modelar que incluye todas las sucesivas mejoras y refinamientos, que es considerado como el mejor de los posibles en ese equilibrio coste/resolución y que conforma la versión v.1 base de todos los sucesivos cálculos.

2.2 Forzamientos y calibración del modelo.

2.2.a Forzamientos.

El modelo tiene incorporado el forzamiento mareal en el contorno oceánico (que es el fundamental en la dinámica del estuario) y los aportes fluviales en la cabecera del estuario. El primero, de naturaleza determinista, se realiza reconstruyendo una señal periódica de nivel del mar a partir de las constituyentes armónicas más importantes (se tienen incorporadas un total de 16 constituyentes armónicas que representan más del 98% de la variabilidad mareal en el potencial generador de marea) a partir de constantes armónicas importadas de trabajos previos en la zona. Los aportes fluviales fuerzan la cabecera del modelo y pueden ser tanto ficticios (enfoque adecuado para ciertos estudios de sensibilidad) como reales, para lo cual se trabaja directamente con los datos de descargas publicados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG).

Adicionalmente a estos forzamientos básicos, el modelo está preparado para trabajar con el forzamiento radiativo y mecánico que se ejerce a través de la superficie libre (radiación solar, presión atmosférica, cizalla del viento) al que se incorporan otros fenómenos no deterministas como la marea meteorológica en su contorno oceánico abierto.

2.2.b Calibración.

Para esta tarea se precisa disponer de observaciones de nivel y de corrientes, ya que ambas son salidas del modelo.

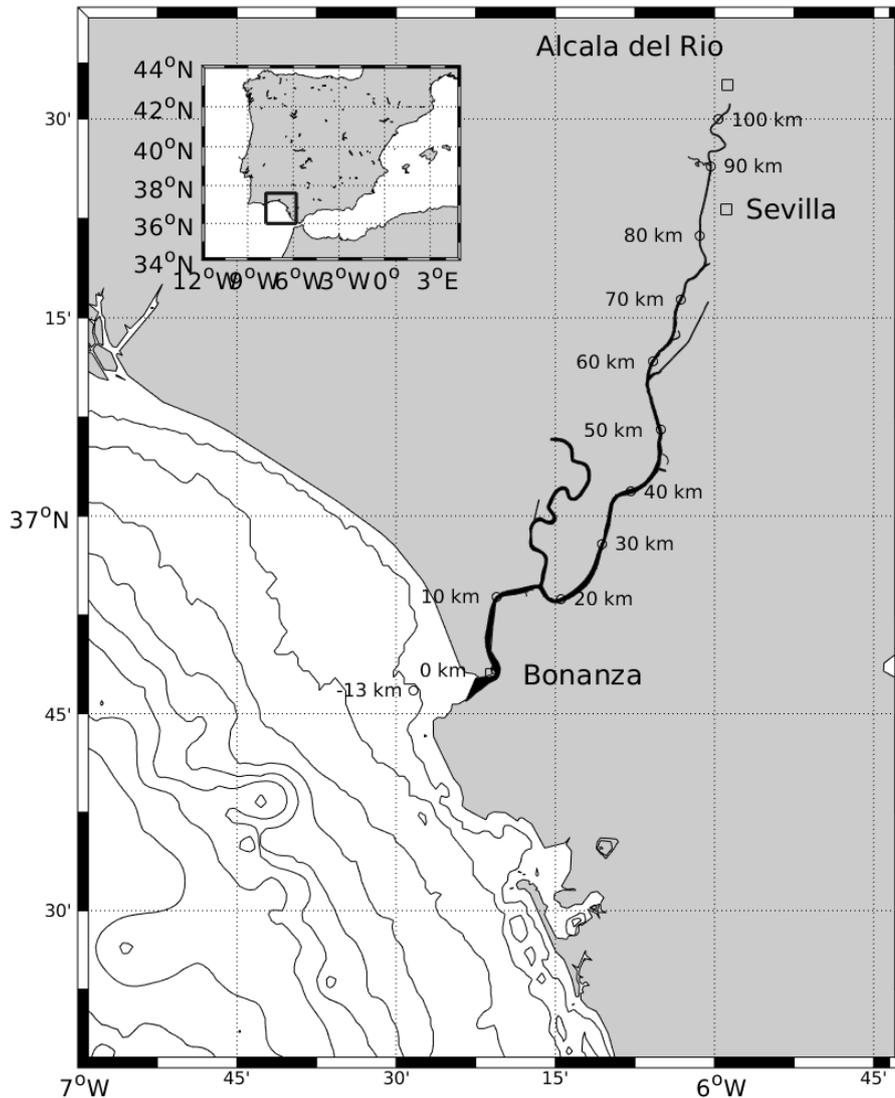


Figura 2.2.b.1. Mapa general con las distancias en kilómetros desde la desembocadura del estuario.

El primer bloque lo conformarían las observaciones de nivel el cual, a su vez, abarca dos categorías de observaciones. La primera incluye las sistemáticamente recogidas en lugares concretos donde hay estaciones permanentes de medida (Bonanza y Sevilla, mantenidas por Puertos del Estado y la propia APS, a las que se añade otra no específicamente diseñada para este fin en la cabecera del estuario mantenida por la CHG para tareas de monitorización de descargas de la presa). La segunda categoría, de especial valor por las dificultades experimentales que conlleva el adquirirlas, son las observaciones tomadas en distintas estaciones a lo largo del estuario y que son de especial interés para la calibración del modelo. Consisten en datos históricos de campañas de medida realizadas durante las últimas décadas, particularmente a finales de la primera década de este siglo en el marco del diagnóstico del estuario llevado a cabo bajo la dirección del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y datos actuales de calidad mucho más contrastada recogidos por el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y recientemente facilitadas a la APS. Estas últimas observaciones han sido las empleadas en la calibración fina definitiva del modelo (ver Figura 2.2.b.4).

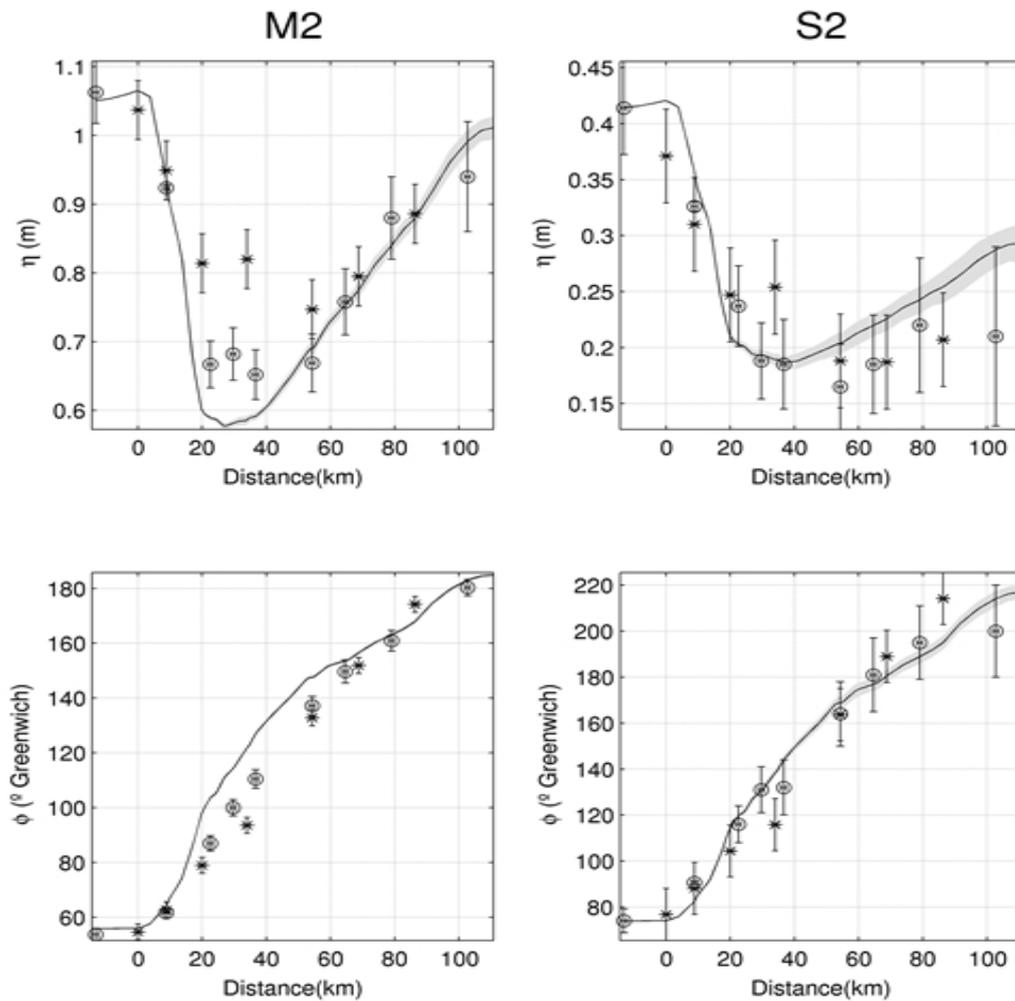


Figura 2.2.b.2. Constantes armónicas con sus barras de error obtenidas del primer conjunto de observaciones disponibles (círculos) y de las salidas producidas por el modelo para las dos constituyentes dominantes M2 (izquierda) y S2 (derecha). El modelo muestra un pronunciado mínimo local de amplitud sobre el kilómetro 25 (paneles superiores) que pasa bastante inadvertido en las observaciones y un ligero desajuste de fases para M2.

En las primeras comparaciones de las salidas del modelo con las observaciones más antiguas disponibles se hacían notar comportamientos inesperados e incoherentes en ciertos puntos del estuario (ver Figuras 2.2.b.2 y 2.2.b.3 y los comentarios del pie de la misma). Ante estas dudas se planteó la necesidad de obtener observaciones de mayor calidad, para lo que se solicitó el asesoramiento y ayuda del IHM, que finalmente puso a disposición del proyecto las observaciones de nivel del mar en el estuario que estaban recogiendo dentro de sus campañas de levantamiento batimétrico. La comparación de datos del modelo con estas observaciones de mayor calidad era mucho más satisfactorias y por ello se han usado para la calibración y tuneado fino final del modelo barotrópico.

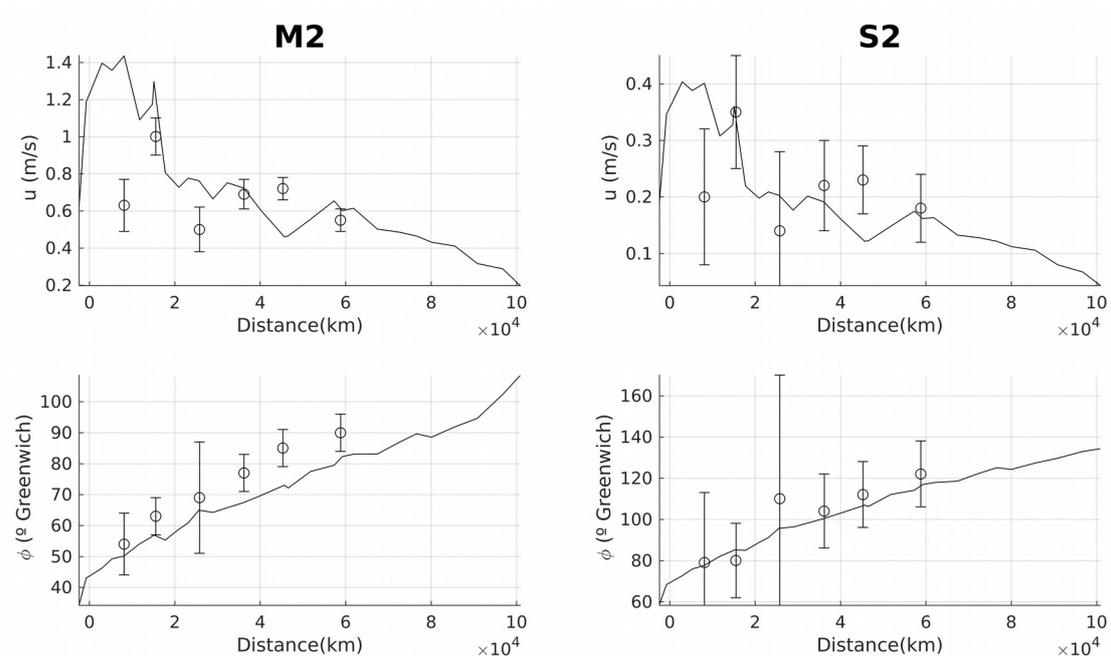


Figura 2.2.b.3. Idem a 2.2.b.2 pero para las constantes armónicas del semieje mayor y fase de las elipses de marea obtenidas de las series de velocidad. El modelo muestra un pronunciado máximo local en la entrada del estuario y una paulatina disminución de las corrientes producidas por la marea aguas arriba. Las diferencias entre las amplitudes de la M2 de las salidas del modelo y de las observaciones son notables en la desembocadura lo cual puede ser consecuencia de una mala ubicación del correntímetro que recoge las observaciones: las constantes armónicas calculadas con el modelo se corresponden con ubicaciones en la parte central del canal, en tanto que las observaciones no han sido tomadas en esas posiciones por cuestiones de seguridad en la navegación y razones técnicas. La fase muestra una desviación sistemática de 10-15°.

Respecto al segundo bloque, las observaciones de corrientes provienen de las mismas campañas que las antiguas de nivel comentadas arriba y son mucho más fragmentarias y ruidosas, por lo que su uso para tareas de calibración del modelo es cuestionable. Aun así, comparaciones hechas entre las salidas del modelo y esa información fragmentaria indican un acuerdo razonable en las amplitudes de las corrientes, que principalmente ocurren a lo largo del eje del río, y las fases como se puede apreciar en la Figura 2.2.b.3. Puesto que, la correcta predicción del nivel del mar por el modelo implica indirectamente una correcta predicción de flujos, el desacuerdo existente entre las observaciones y las salidas del modelo, deja abierta la posibilidad ya adelantada de deficiencias en esas observaciones de corriente. Se espera disponer de nuevas observaciones de corriente que garanticen una mejora del modelo aunque, se trata de una tarea pendiente a llevar a cabo por quien corresponda.

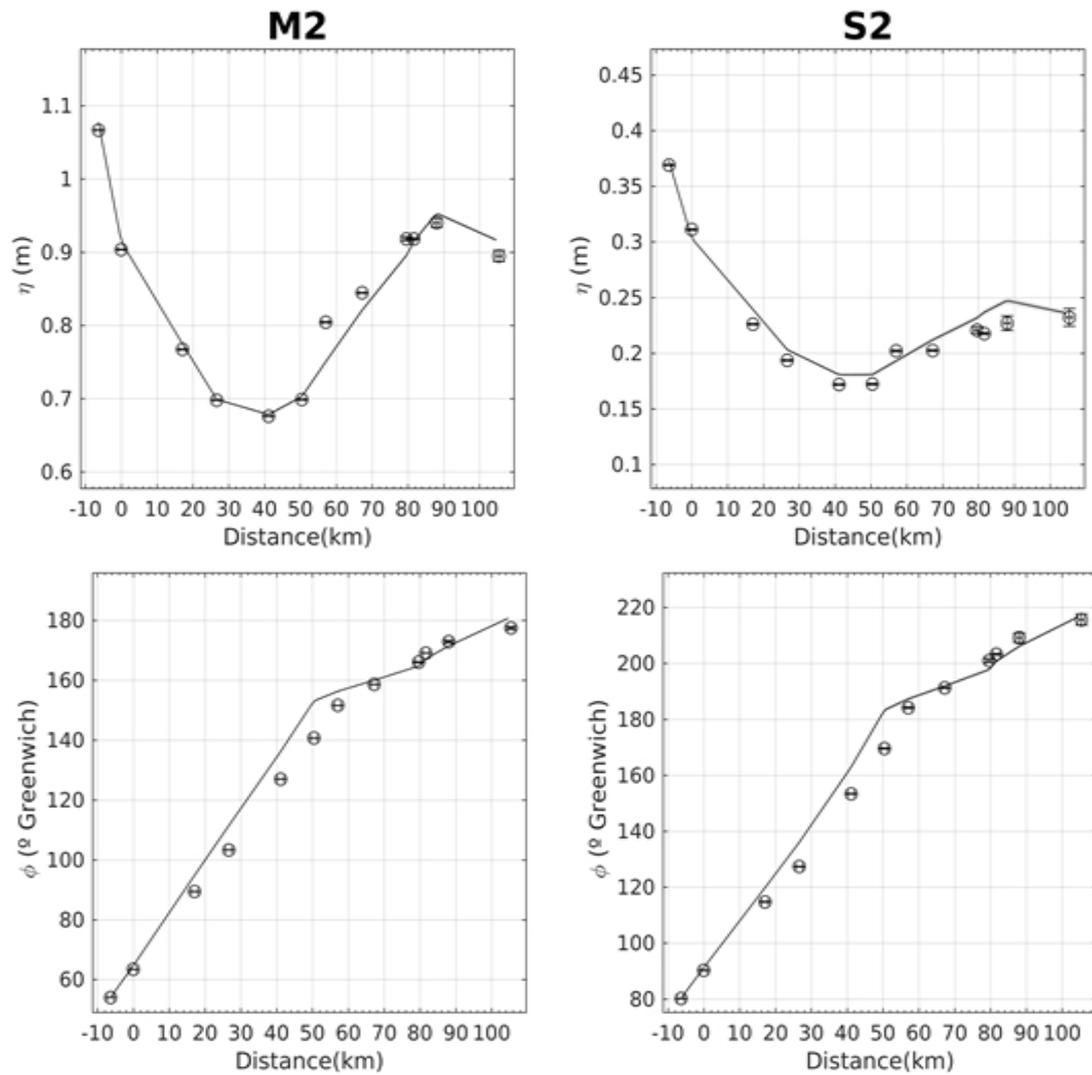


Figura 2.2.b.4. Constantes armónicas deducidas de las observaciones recientes recogidas por el IHM (círculos) y de las salidas del modelo calibrado. El patrón espacial de ambas coincide, dibujando en ambos casos un mínimo claro sobre el punto kilométrico 40, lo que apoya las dudas sobre la calidad de las antiguas observaciones.

Tras el nuevo ajuste de parámetros, el modelo predice las oscilaciones de la superficie libre a lo largo del estuario con una precisión de 8cm y 20 min de desfase respecto al instante de llegada de la pleamar/bajamar. Se estima que la calidad de predicción de corrientes debe ser similar a falta de contrastación definitiva con nuevos datos de calidad. Como conclusión se deja constancia de la disponibilidad de esta poderosa herramienta predictiva (Modelo barotrópico v.1) que pronostica el comportamiento mareal del estuario con una precisión de $\pm 8\text{cm}$ en la amplitud de la oscilación mareal (incertidumbre $< 4\%$) y de $\pm 20\text{min}$ en el momento de ocurrencia de la pleamar/bajamar.

2.3 El problema del cero del río y el espesor de la lámina de agua.

La batimetría implementada en el dominio del modelo ha sido facilitada con referencia al nivel medio del mar en Alicante. A falta de otra información, en las primeras fases de construcción del modelo se ha tomado también el nivel medio de Alicante como nivel medio del modelo, es decir, la oscilación mareal lo hacía alrededor de este cero hipotético. Sin embargo, el nivel medio del mar en esta parte de la península está por encima del cero de Alicante (hay medidas geodésicas y clavos de referencia que cuantifican esta diferencia en 30 cm en Bonanza, e información diversa que permite establecerla en 64 cm en Sevilla). Toda esta información sobre nivelaciones y ceros de referencia ha sido facilitada recientemente y, aunque aún no se considera definitiva, tiene ya mucho interés.

Bajo estas circunstancias, el espesor de la lámina de agua, variable fundamental para programar la navegación por el estuario, no se corresponde con la mera suma de la cota batimétrica y la altura instantánea del nivel producida por el modelo. A esto hay que añadir la diferencia entre el nivel medio del estuario y la referencia del cero de Alicante, es decir, sumar la desnivelación geodésica. Hay un segundo efecto de menor importancia debido a que la solución de las ecuaciones de movimiento depende del espesor de la columna de agua, por lo que las amplitudes y fases modeladas cambian al hacerlo el espesor.

Por esta razón se ha optado por hacer una corrección batimétrica del dominio simulado añadiendo ese desnivel, con lo que las predicciones que produce la nueva versión (v.1a) del modelo ya incluyen el efecto de una lámina de agua mayor. Esas predicciones sumadas a la nueva batimetría ajustada dan directamente el espesor de la lámina de agua.

Un último detalle a mencionar es que las medidas geodésicas indican un desnivel medio entre Sevilla y Bonanza de 34 cm, que tiene sentido físico pues está asociado a gradiente longitudinal de presión que mueve el flujo medio. El modelo también calcula un desnivel de, en este caso, 16cm, que no difiere mucho del anterior. Dado que las nivelaciones de precisión entre Sevilla y Bonanza con las que trabajamos son mejorables (al menos las de Sevilla), el anterior acuerdo es satisfactorio¹. En cualquier caso, a la hora de facilitar el dato del espesor de la lámina de agua, que es fundamental para la gestión de la navegación por el estuario para la APS, se ha procedido a introducir una mínima corrección lineal del espesor para ajustarlo a los valores de desnivel referidos en las mencionadas nivelaciones, que en ningún caso supera los 18cm en el lugar donde mayor es esa corrección. Se tienen más detalles en el anexo A de este documento.

¹ El análisis preliminar de las observaciones tomadas por el IHM arrojan un desnivel medio entre ambas localidades de 22 cm, muy similar al que produce el modelo y no lejos del deducido de las referencias geodésicas disponibles.

Como resultado final se dispone de un modelo barotrópico v.la que reproduce el espesor de la lámina de agua con una precisión promedio estimada de 8 cm en cuanto a amplitud (RMSE) y de 20 minutos en cuanto a la ocurrencia de las pleamares que está ya siendo utilizada con éxito en la gestión de la navegación del estuario por la APS.

3.- APLICACIONES DEL MODELO BAROTROPICO

3.1.- Productos finales operativos producidos por el modelo barotrópico v.1

Una vez calibrado y validado, el modelo se convierte en una herramienta versátil y útil que proporciona una serie de productos de interés para la gestión de la navegación en el estuario y del propio estuario. Se listan a continuación algunas de ellas:

- 3.1.a.- Tablas que dan la altura total de la superficie a intervalos de tiempo seleccionables, por defecto horarios, y que pueden suministrarse también como tablas de marea con horas y alturas de pleamar/bajamar). Actualmente, estas tablas han sido producidas para los años 2017 y 2018.
- 3.1.b.- Idem para corrientes de marea en el supuesto de una descarga media en la presa de Alcalá de 50 m³/s próximo al valor ecológico establecido por la CHG.
- 3.1.c.- Espesor de la lámina de agua a intervalos de tiempo seleccionables (salida de la mejora v.1a del modelo), en formato similar al de la altura de la superficie libre indicado en 2.1.a. 1
- 3.1.d.- Programa interactivo de apoyo a la navegación (Figura 3.1.a.2) que calcula el espesor de la lámina de agua en cualquier instante y gestiona unos mínimos de seguridad que hacen saltar alertas si se sobrepasan. Necesita las tablas de marea producidas en 3.1.a.1
- 3.1.e.- Diseño y generación de un índice local que refleje la intensidad de la marea y que sustituya a los obsoletos "coeficientes de marea" rutinariamente empleados y cuya validez es discutible. Los nuevos coeficiente (dos valores diarios) se obtienen del rango de marea en Bonanza.

Prediccion modelo	Estacion1	Estacion2	Estacion3	Estacion4	Estacion5	Estacion6	Estacion7	Estacion8	Estacion9	Bonanza	Sevilla
Posicion Est.											
Longitud Est.	-6.51910812	-6.34152526	-6.30261379	-6.24520663	-6.18513653	-6.08805168	-6.10096509	-6.05456784	-5.98886214	-6.34004831	-6.0075
Latitud Est.	36.79866095	36.79964561	36.90768947	36.89463347	36.93809217	37.06129072	37.15412012	37.27028924	37.46236310	36.89682482	37.3196
Dist (km_0_Bonanza)	-16.97669195	0.00000000	13.73559440	20.77192306	27.77822726	45.41951428	55.72619251	70.22541344	94.26291668	0.00000000	77.0277
Fondo Est.	13.39718797	11.94363486	6.41837140	9.66093265	7.56866167	8.27799765	9.66366818	7.40209317	4.06425572	7.83036084	7.40160442
Hora local											
2016-01-01 11:50:00	-0.46543290	-0.29961090	0.18878160	0.27367650	0.37418170	0.63750090	0.75319550	0.93390650	1.29803200	-0.27267120	1.01645400
2016-01-01 12:00:00	-0.52527760	-0.35446450	0.15831200	0.24349820	0.34587660	0.59832980	0.70822690	0.88112550	1.24632900	-0.32644260	0.96839080
2016-01-01 12:10:00	-0.58173510	-0.40059240	0.13060290	0.21742570	0.31946590	0.55588130	0.66075560	0.82576410	1.18399300	-0.37163570	0.91488440
2016-01-01 12:20:00	-0.63386330	-0.44082500	0.10572370	0.19404510	0.29270510	0.51196680	0.60990980	0.76856270	1.11264990	-0.41140390	0.85357400
2016-01-01 12:30:00	-0.68171640	-0.47809670	0.08323252	0.17115790	0.26443890	0.46693090	0.55548560	0.70827270	1.03369600	-0.44783240	0.78227940
2016-01-01 12:40:00	-0.72569320	-0.51275620	0.06241348	0.14703200	0.23473290	0.42049430	0.50026340	0.64309140	0.94921850	-0.48179820	0.70320920
2016-01-01 12:50:00	-0.76519370	-0.54466800	0.04236795	0.12144460	0.20417280	0.37319250	0.44516220	0.57257150	0.80164590	-0.51288320	0.62158160
2016-01-01 13:00:00	-0.80000000	-0.57330530	0.02175203	0.09534705	0.17306400	0.32626640	0.39004260	0.49045360	0.77224530	-0.54068230	0.54177590
2016-01-01 13:10:00	-0.83007850	-0.59965930	-0.00026408	0.06943069	0.14142000	0.28030280	0.33416780	0.42355230	0.68141220	-0.56628760	0.46514640
2016-01-01 13:20:00	-0.85462550	-0.62384890	-0.02367009	0.04328891	0.10937240	0.23453260	0.27718610	0.35024350	0.58997680	-0.59021780	0.39084090
2016-01-01 13:30:00	-0.87354890	-0.64565830	-0.04823939	0.01612968	0.07710569	0.18771410	0.21967470	0.27984820	0.49968770	-0.61217530	0.31760250
2016-01-01 13:40:00	-0.88682050	-0.66477130	-0.07396118	-0.01245595	0.04457556	0.13931370	0.16274010	0.21281520	0.41255550	-0.63207400	0.24483660
2016-01-01 13:50:00	-0.89446240	-0.68131100	-0.10102520	-0.04230304	0.01146809	0.08996699	0.10734510	0.14893290	0.32970960	-0.64595430	0.17330030
2016-01-01 14:00:00	-0.89664030	-0.69464060	-0.12935970	-0.07309498	-0.02277418	0.04103673	0.05403980	0.08763736	0.25103860	-0.64622160	0.10456860
2016-01-01 14:10:00	-0.89353220	-0.70468590	-0.15867180	-0.10482720	-0.05866103	-0.00658341	0.00301442	0.02855256	0.17594050	-0.67577640	0.03989372
2016-01-01 14:20:00	-0.88502000	-0.71148310	-0.18832440	-0.13775220	-0.09630518	-0.05266063	-0.04581865	-0.02831898	0.10412450	-0.68401250	-0.02031536
2016-01-01 14:30:00	-0.87107130	-0.71522970	-0.21813040	-0.17196170	-0.13531470	-0.09742635	-0.09283285	-0.06260268	0.03578119	-0.68971830	-0.07638240
2016-01-01 14:40:00	-0.85175470	-0.71607480	-0.24824460	-0.20709900	-0.17480900	-0.14111640	-0.13851870	-0.13416120	-0.02865850	-0.69251310	-0.12899550
2016-01-01 14:50:00	-0.82725560	-0.71277580	-0.27898560	-0.24256100	-0.21401820	-0.18393470	-0.18315990	-0.18243570	-0.08892807	-0.69163160	-0.17873580
2016-01-01 15:00:00	-0.79774560	-0.70513350	-0.31095650	-0.27764110	-0.25226140	-0.22602030	-0.22607280	-0.22757970	-0.14507720	-0.68672090	-0.22579680
2016-01-01 15:10:00	-0.76354060	-0.69237420	-0.34073800	-0.31217410	-0.28916590	-0.26738750	-0.26808540	-0.27003150	-0.19745120	-0.67686090	-0.27003340
2016-01-01 15:20:00	-0.72498130	-0.67451570	-0.37025770	-0.34528540	-0.32493110	-0.30786260	-0.30955560	-0.31036550	-0.24641430	-0.66214410	-0.31141330
2016-01-01 15:30:00	-0.68239270	-0.65193750	-0.39786060	-0.37679950	-0.35965290	-0.34712190	-0.34871920	-0.34900980	-0.29222420	-0.64269320	-0.35018820
2016-01-01 15:40:00	-0.63603970	-0.62486930	-0.42275280	-0.40649660	-0.39317090	-0.38484710	-0.38642610	-0.38616610	-0.33498340	-0.61866610	-0.38689220
2016-01-01 15:50:00	-0.58625260	-0.59314290	-0.44434560	-0.43400420	-0.42515510	-0.42088240	-0.42277230	-0.42192590	-0.37469290	-0.58988220	-0.42286860

Figura 3.1.a.1: Ejemplo de Tablas de alturas de la superficie del río en distintos puntos seleccionados del estuario que proporcionadas por el modelo barotrópico.

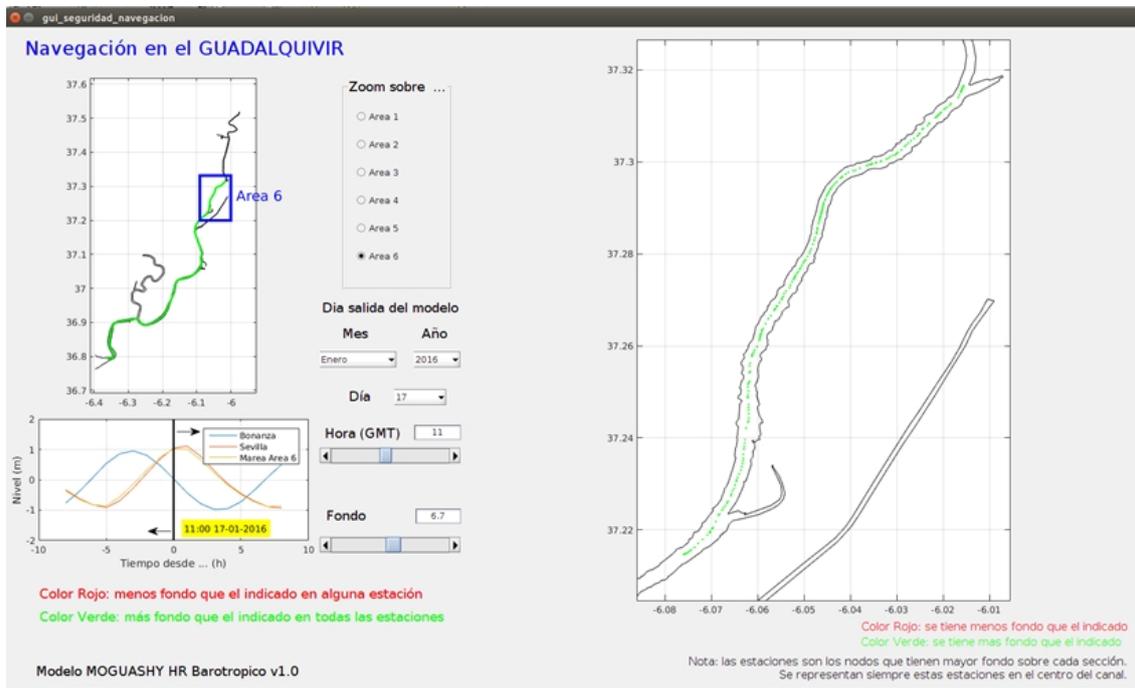


Figura 3.1.a.2: Imagen captura de pantalla del programa de apoyo a la navegación que informa de la profundidad instantánea a lo largo del río en función del momento de interés. Incluye un código de color que alerta sobre la superación de límites de seguridad preestablecido.

3.2.- Casos de Estudio

3.2.a.- Marea meteorológica

Añadida a la oscilación mareal determinista (astronómica) está la denominada marea *meteorológica* que se manifiesta como oscilaciones del nivel del mar inducidas por variaciones atmosféricas, fundamentalmente de la presión. Esta perturbación se impone en el contorno abierto del mismo modo que la marea astronómica. Se han realizado simulaciones de depresiones de nivel forzadas por altas presiones de diferente intensidad y duración así como de sobre-elevaciones asociadas a la llegada de bajas presiones, en este caso de mayor amplitud como suele ser el caso del paso de borrascas (Figura 3.2.a.1).

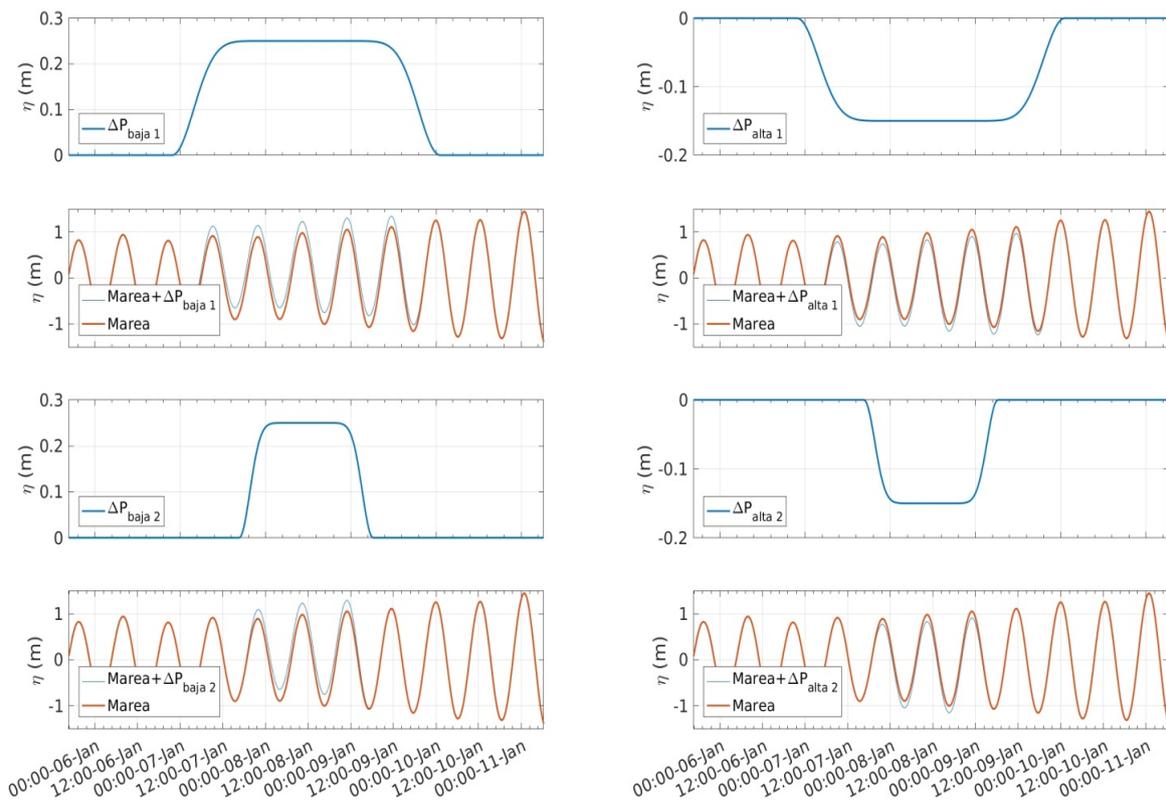


Figura 3.2.a.1: Paneles izquierdos: configuración de forzamiento para baja presión de diferentes duraciones, 2 días (panel 1º) y 1 día (panel 3º). En ambos casos la variación de desnivel (i.e., cambio de presión) ocurre gradualmente durante un periodo de 12h. Los paneles 2º y 4º muestran cómo cambia la respuesta del nivel del mar en un punto situado a 20 km de Bonanza. Paneles derechos: ídem para una situación de alta presión.

En el conjunto de test realizados, el forzamiento meteorológico se ha impuesto de forma similar a cómo se impone el mareal, es decir, como una variación de nivel cuya forma y duración se prescribe. Se ha optado por esquemas muy simples consistentes en una sobre-elevación de nivel, que se corresponde con una situación de baja presión, de amplitud 25 cm (correspondiente al paso de una borrasca profunda de 25HPa de depresión frente al valor de presión media) que se alcanza tras un periodo transitorio de 12h para mantenerse con ese valor durante un tiempo dado (ver pie de Figura 3.2.a.1) para decaer de nuevo a su valor normal en otras doce horas. Un esquema similar se ha seguido para una situación de altas presiones en las que se impone una depresión en el contorno, de menor amplitud (15cm, correspondiente a 15HPa en este caso, que refleja mejor la realidad de una situación anticiclónica intensa). Se excluyen en este análisis eventos reales más extremos que son discutidos aparte.

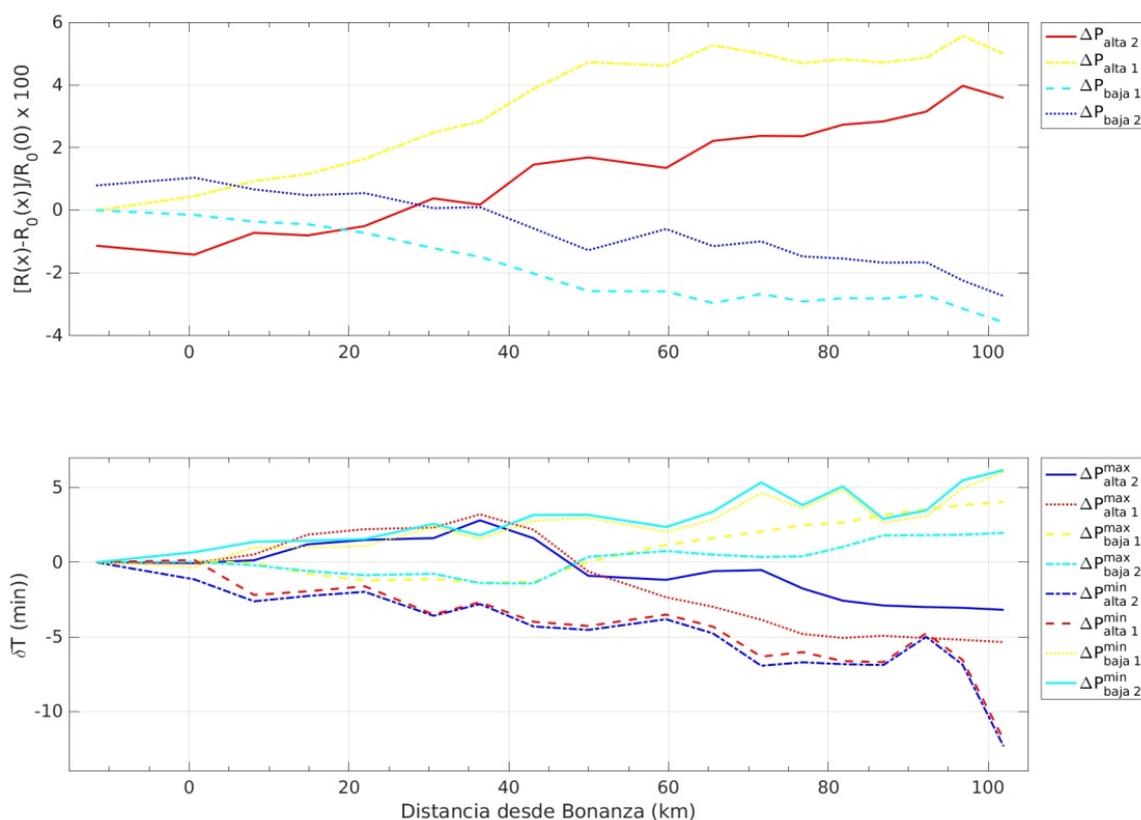


Figura 3.2.a.2: Panel superior: variación porcentual del rango de marea respecto a la situación media producido por la perturbación meteorológica en los 4 casos mostrados en la Figura 3.2.a.1 (subíndices “alta_i” y “baja_i”, i=1,2). Panel inferior: desvío temporal de la ocurrencia de las pleamares (superíndice “max” en la leyenda) y bajamares (“min” en la leyenda) respecto a la situación media. Los desvíos en todos estos casos de variaciones de presión muy altas no sobrepasan los 5 minutos respecto a la situación de referencia en la parte de interés del estuario (<80km).

El análisis de las situaciones estudiadas indica que:

- El rango mareal², tomado como la diferencia del rango medido con perturbación meteorológica menos el rango medido sin esa perturbación, normalizada por el rango en Bonanza (Figura 3.2.a.2, panel superior) se ve muy ligeramente modificado (~2%), más en situaciones de altas presiones y más aún si la situación es de larga duración (línea amarilla). En estos casos el rango puede variar hasta en un 4%.
- La fase no se ve esencialmente alterada ya que los máximos desvíos en las ocurrencias de bajamar y pleamar respecto a la situación de no perturbación no exceden los 5 minutos (Figura 3.2.a.2, panel inferior), tiempo que cae en el intervalo de confianza de las horas de pleamar y bajamar predichas por el modelo.
- La depresión o elevación producida por la perturbación se propaga hacia el interior del estuario con un retraso menor que el propio tiempo de cambio, por lo que puede considerarse a efectos prácticos instantánea. La conclusión se aplica también cuando el proceso se invierte, es decir, cuando la perturbación desaparece y se recupera la situación de referencia.
- El tamaño de la perturbación apenas sufre variación a medida que progresa en el estuario, es decir, produce los mismos cambios de nivel que los impuestos en el contorno.
- El que una alta presión produzca un descenso de nivel en el estuario junto con el incremento de rango mareal que también ocasiona, hace que las bajamares sean más acentuadas, reduciendo el espesor de la lámina de agua. En un caso de altas presiones estables e intensas, como el etiquetado “alta_1” en la Figura 3.2.a.1, la lámina de agua podría llegar a disminuir 20cm su espesor durante la bajamar en la parte más alta del estuario navegable, detalle importante a la hora de la gestión de la navegación.
- Notar que los anteriores valores se corresponden con situaciones atmosféricas exageradas y que en la realidad las fluctuaciones son menores o bastante menores incluso, lo que implicaría respuestas menores o bastante menores en consecuencia. Esto puede no aplicarse a casos extremos como el real descrito en un el epígrafe 3.2.e.

Como conclusión, la marea meteorológica produce una perturbación que suma linealmente con la marea astronómica aumentando o disminuyendo el nivel a lo largo del estuario en la misma cantidad que se observa en el contorno oceánico y que no retrasa frente al forzamiento. Los rangos mareales también se ven modificados, aumentando (disminuyendo) ligeramente en situaciones de altas (bajas) presiones. La

2 La reducida duración temporal de la perturbación impide hacer análisis armónico y, por tanto, hacer uso de M2 en la discusión de resultados. Por ello se emplea el rango mareal, diferencia entre las alturas de pleamar y bajamar sucesivas.

lámina de agua se ve pues afectada por ambos hechos: bajo altas presiones, se produce un descenso de nivel forzado meteorológicamente y un aumento de rango mareal que hace disminuir el espesor de la lámina alrededor de la bajamar en valores que deben ser contemplados y que restan margen de seguridad a la navegación. Las bajas presiones por el contrario aumentan el espesor y amplían ese margen.

3.2.b.- Descargas de agua dulce

Se ha analizado la respuesta del estuario a diferentes valores de descargas de agua dulce y de su duración en la cabecera del estuario. Los aspectos que se han estudiado es la variación de amplitud de la onda de marea y la *eventual* posibilidad de que la señal quedase totalmente amortiguada bajo grandes descargas, la aparición de un punto aguas arriba del cual la corriente nunca invierte (es decir, siempre fluye hacia el océano) y cómo ese punto cambia su posición en función del tamaño de la descarga y de la intensidad de la marea (marea-viva frente a marea-muerta) y los tiempos de respuesta para alcanzar un nuevo equilibrio en los distintos puntos del estuario (y su recíproco, es decir el tiempo que transcurre desde que se re-establece la descarga de referencia y el estuario recobra su comportamiento normal)

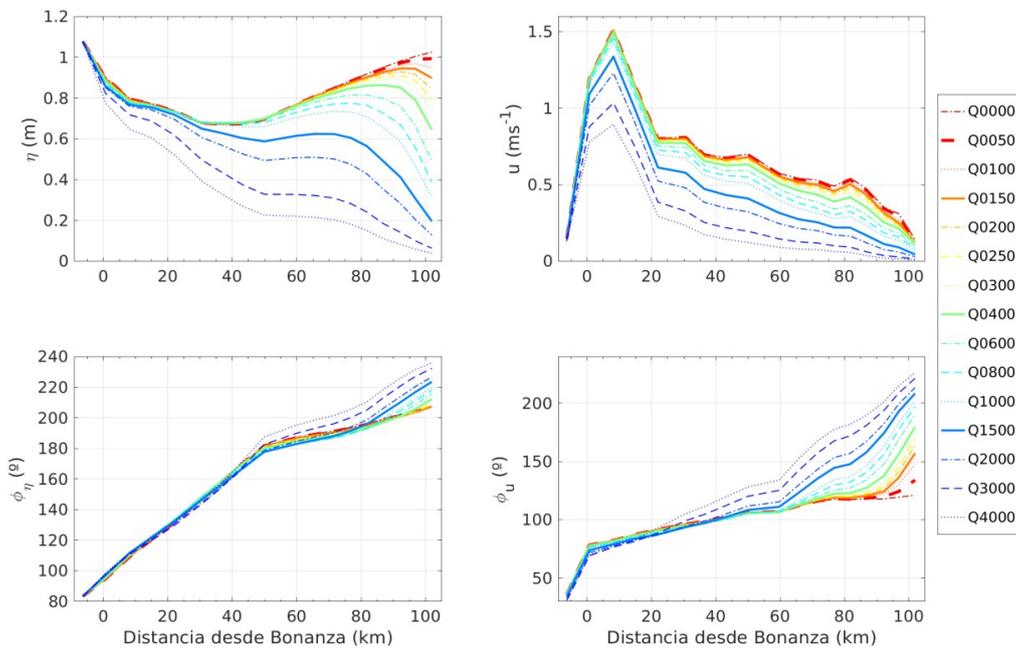


Figura 3.2.b.1: Columna izquierda: Amplitud (arriba) y fase (debajo) de la oscilación de nivel asociada a M2 a lo largo del estuario en función de las descargas (leyenda a la derecha, en m^3/s , según código Qxxxx; por ejemplo, Q1500 indica una descarga de $1500\text{m}^3/\text{s}$). Columna derecha: ídem para la corriente de marea asociada a M2. El eje x indica distancias medidas desde Bonanza ($x=0$). La esclusa del puerto de Sevilla se sitúa sobre los 75km .

En una situación real, el principal efecto que tienen las descargas de agua dulce es desplazar la cuña salina a lo largo del estuario. Este proceso no puede ser estudiado detalladamente con el modelo barotrópico que no considera la distribución de temperatura/salinidad en el estuario, sino que tiene que ser hecho con la versión baroclina del mismo. Se retoma este punto en la Sección 4 más adelante.

La Figura 3.2.b.1 muestra las variaciones de amplitud y fase de la oscilación de nivel y de la corriente asociadas a la constituyente principal M2. En las cercanías de la desembocadura (coordenada $x=0$) la influencia de las descargas es escasa. Solamente para descargas improbables de más de $2000\text{m}^3/\text{s}$ mantenidas durante cierto tiempo la amplitud de marea en Bonanza disminuye más del 10%. A medida que nos adentramos en el estuario, la amplitud de M2 se ve más y más afectada (menor amplitud cuanto más descarga), siendo la parte alta del estuario la más sensible, como cabe esperar. Curiosamente, la fase apenas cambia en la mitad más baja del estuario y sí lo hace en la cabecera, donde las grandes descargas retrasan la llegada de la onda de marea, aunque nunca de forma drástica (desfases inferiores a una hora siempre).

El espesor de la lámina de agua se ve también modificado porque la propia descarga aumenta el nivel medio del río en cada punto (Figura 3.2.b.2)³. En todos los casos, el espesor instantáneo computado como valor medio más amplitud mareal, aumenta con el tamaño de la descarga independientemente de que la amplitud disminuya.

La corriente mareal se ve más afectada tanto en amplitud como en fase, reduciéndose por encima del 80% para descargas por encima de $2000\text{m}^3/\text{s}$ en el último tercio del estuario. Para estos tamaños, la única contribución que cuenta es la velocidad del agua dulce liberada. Un resultado esperado en situaciones de alta descarga es que la corriente de llenante (la mareal dirigida aguas arriba) sea frenada por la propia descarga y no llegue a la cabecera del estuario, dejándolo dividido en dos partes, aquélla en la que la corriente siempre apunta hacia el océano y otra donde hay inversiones forzadas por la marea, aunque sean de breve duración. La Figura 3.2.b.3 indica el porcentaje de veces que se detecta la no inversión de corriente (es decir, la existencia de esa segunda zona) en función del tamaño de las descargas. El punto donde la gráfica se separa del valor 1 (100%) indica en promedio la ubicación de esa línea de separación entre zonas.

3 Para grandes descargas, el aumento de nivel predicho por el modelo en las inmediaciones de la presa es de varios metros. Ese aumento hace desbordar el río e invalida la configuración del dominio puesto que el agua inunda las riberas, situación no contemplada en el modelo. Las alturas en las proximidades de la presa de Alcalá en la Figura 3.2.b.2 serían las alcanzadas si las riberas del río fuesen más altas que las alturas del agua especificadas, lo cual no es el caso del Guadalquivir real cuyas riberas están a unos 2-4 m sobre el nivel medio. Para grandes valores de Q no pueden considerarse reales los niveles medios indicados en la Figura 3.2.b.2.

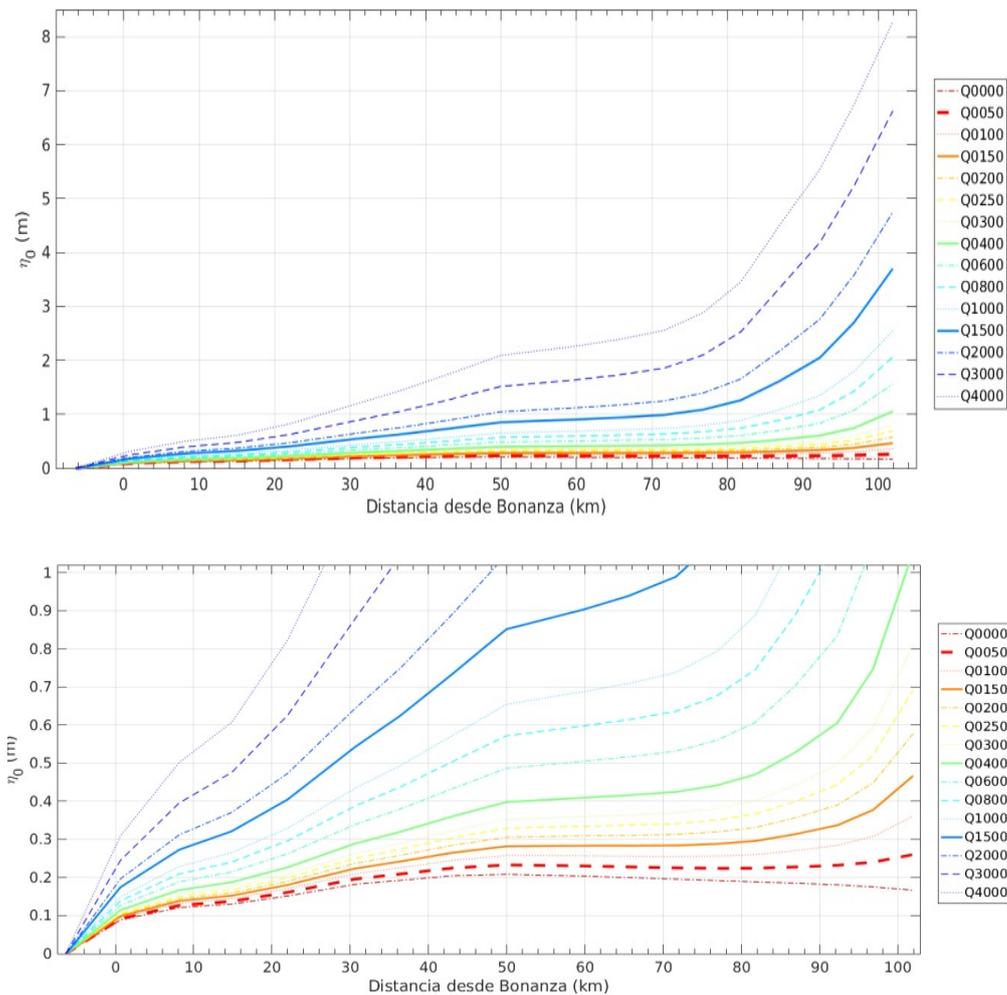


Figura 3.2.b.2: Panel superior: nivel medio a lo largo del estuario para diferentes valores de la descarga (mismo código que en figuras anteriores). Panel inferior: ampliación de la anterior en el rango 0-1m. Los valores de varios metros que pueden verse en el panel superior para descargas altas, son irreales en la configuración real del Guadalquivir (ver nota 2 al pie de página).

Descargas altas sirven para vaciar el estuario de agua salina la cual solamente podrá re-entrar cuando cese la descarga que promovió el vaciado. Las descargas arrastran materiales en suspensión, en particular huevos y larvas de especies marinas que usan como zona de puesta y cría la parte baja del estuario, como el boquerón. Puesto que el arrastre de larvas mar adentro implica mortalidad, evaluar qué condiciones de descarga producen este efecto es importante. La Figura 3.2.b.4 muestra los tiempos medios (mean en la leyenda), acotados por su desviación típica (std en la leyenda), que trazadores pasivos abandonados en la zona de Puntalete (20 km aguas arriba de Bonanza) tardan en abandonar el estuario por Sanlúcar (5 km aguas abajo de Bonanza) para distintos valores de descarga e intensidad de marea. Para descargas pequeñas existe una ligera dependencia de los tiempos de residencia con la intensidad de marea, que se hace inapreciable a medida que las descargas aumentan. Para descargas $Q \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ese tiempo es de 2-3 días, para $Q > 600 \text{ m}^3/\text{s}$, menos de 1 día, independientemente de que la marea sea viva o muerta.

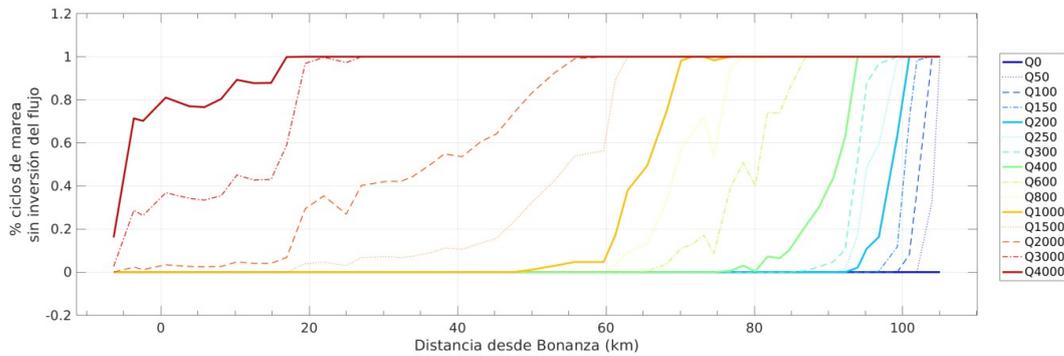


Figura 3.2.b.3: Porcentaje de observación de no inversión de corriente de marea en el estuario en función de la descarga. Para $Q=0\text{m}^3/\text{s}$ la corriente invierte en todo el estuario. A partir de $Q>0\text{m}^3/\text{s}$, hay veces que no llega a invertir (mareas muertas) y otras sí (vivas) por lo que el porcentaje no llega al 100%. A partir ya de $Q>100\text{m}^3/\text{s}$ se alcanza el 100% en las inmediaciones de la presa, indicando que la corriente allí no llega a invertir ni siquiera en mareas vivas. Y a medida que Q aumenta, el punto de no inversión avanza hacia la desembocadura. Para descargas tan grandes como $Q=4000\text{m}^3/\text{s}$, el punto se ubica apenas a 20 km de la desembocadura, aunque el porcentaje en Bonanza ($x=0$) nunca baja del 80%, indicando que sólo en mareas muy vivas el agua salina penetrara hasta allí.

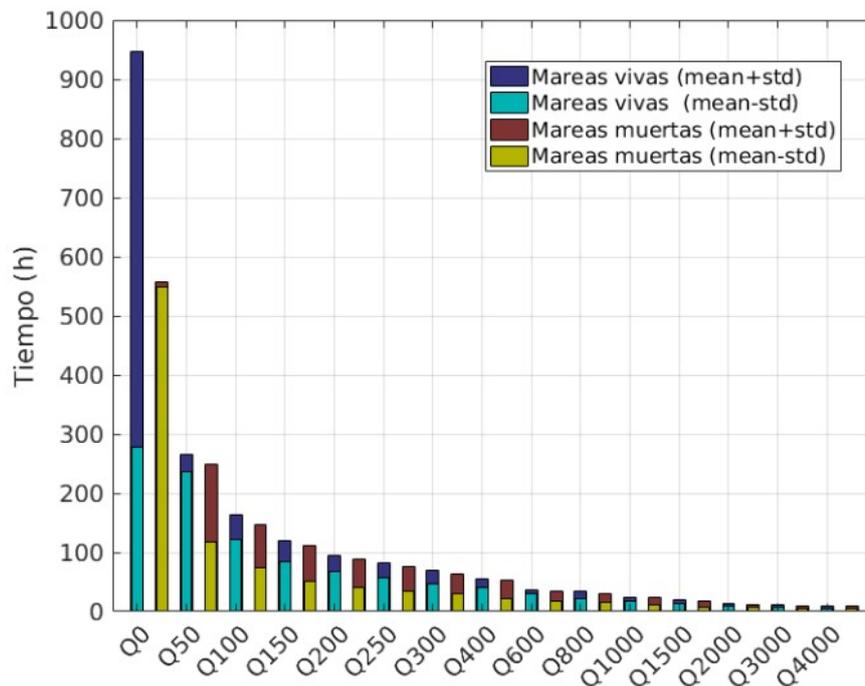


Figura 3.2.b.4: Tiempos de residencia dentro del estuario para trazadores abandonados en la zona de Puntalete (a 25 km de Bonanza) en función de la descarga e intensidad de marea (código de color en la leyenda). Los valores medios tienden a ser menores en mareas muertas aunque esa diferencia se reduce con el tamaño de la descarga.

Un último aspecto de interés es el tiempo de respuesta del estuario ante una nueva situación de descargas. La Figura 3.2.b.5 muestra el cambio brusco de nivel que ocurre

en un punto situado a 90km de Bonanza en las cercanías de la presa de Alcalá cuando llegan descargas de diferente tamaño e ilustra cómo se alcanza la nueva situación de equilibrio (y la recíproca, i.e., cómo se recupera la situación normal una vez que la descarga cesa). Los tiempos de respuesta en ambos casos son inferiores a 6 horas, indicando un rápido ajuste a las nuevas condiciones.

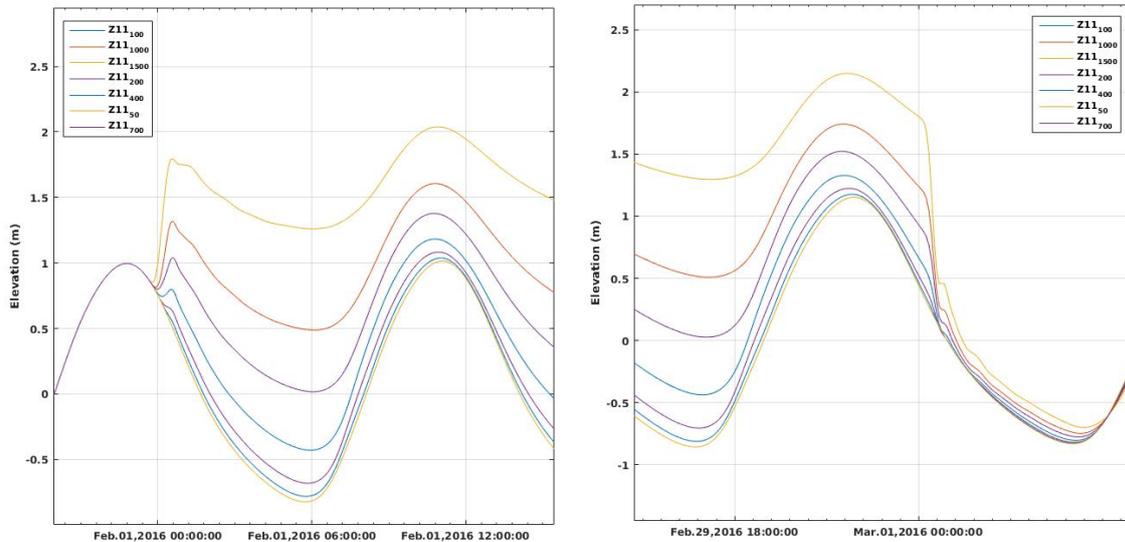


Figura 3.2.b.5: Panel izquierdo: modificación de la oscilación de marea en un punto localizado a 90km aguas arriba de Bonanza en las inmediaciones de la presa de Alcalá cuando llegan descargas de diferentes valores (subíndice en la leyenda, en m^3/s). Panel derecho: ídem en el caso de que una descarga grande desaparezca para retomar su valor de referencia de $50m^3/s$. El transitorio entre ambas situaciones no supera las 6 horas, es decir medio ciclo de marea.

En conclusión, las descargas tienden a disminuir la amplitud de la onda de marea y a retrasar su progresión, especialmente en la parte alta del estuario, mientras que el nivel medio aumenta hacia la cabecera del estuario. Ambos efectos combinados originan un aumento en todo instante del espesor de la lámina de agua. La velocidad mareal muestra un patrón similar al de oscilación aunque la reducción de amplitud y el retraso están más acentuados. La respuesta del estuario a una nueva situación de descarga se consigue en tiempos muy reducidos, inferiores a medio ciclo de marea.

Descargas grandes detienen la corriente de creciente dividiendo el estuario en dos zonas, una en la parte alta donde no invierte nunca la corriente, y la otra en la parte baja donde ocurren inversiones aunque sean de breve duración. La línea divisoria entre ambas se desplaza aguas abajo con la descarga. Descargas altas tienen el potencial de arrastrar larvas residentes en zonas de puesta y alevinaje mar adentro, produciendo previsiblemente mortalidad. Por ejemplo, una descarga de $200 m^3/s$ mantenida dos días es capaz de producir ese efecto. Descargas más intensas lo consiguen en tiempos del orden de un día o inferiores.

3.2.c.- Llanos mareales

La existencia de antiguas marismas y la posibilidad de poder recuperarlas en un futuro ha motivado este estudio que se centra en la variación que experimenta la onda de marea caso de existir llanuras inundables en el estuario. Para ello se ha realizado un ejercicio consistente en crear una llanura inundable ficticia en una de las márgenes del río (ver Figura 3.2.c.1), cuya superficie es fija (32km^2 sobre un área total de la zona modelada de 380km^2) pero con distintas profundidades para contemplar el abanico de situaciones que van desde una llanura permanentemente inundada (incluso en bajamar, cotas negativas en la Figura 3.2.1.b) hasta otras que sólo se inunda con marea alta (cotas positivas en esa Figura), quedando seca buena parte del ciclo mareal.

La Figura 3.2.c.2 muestra que la amplitud de la oscilación mareal disminuye a medida que parte del prisma mareal invade el llano (cota $+0.75$, que implica que el llano no se inunda hasta que el nivel del río no alcanza esa altura) llegando a un valor estable para cotas negativas. El llano produce retrasos crecientes de la onda de marea a medida que va siendo más inundable y que se estabilizan en torno a 45-60 min cuando las cotas son negativas en el caso de estudio. El desfase afecta básicamente a la porción del río aguas arriba del lugar donde se ha ubicado el llano.

La corriente de marea sufre un desfase similar pero presenta un comportamiento de amplitud curioso (panel superior derecha de Figura 3.2.c.2): tiende a tener más amplitud aguas abajo de la llanura inundable, reflejando el hecho de que la llanura demanda más agua oceánica para llenarse (mayor prisma de marea), pero disminuye a partir de la posición de la llanura, coherentemente con el hecho de que la oscilación disminuye también.

La influencia que cierres hipotéticos de subsidiarios (Brazo de la Torre, Guadaira, Ribera del Huelva) pudieran tener en la propagación mareal pueden ser abordados con este mismo procedimiento, puesto que el resultado final desde un punto de vista dinámico es similar: variación del prisma mareal. La gran cantidad de posibles configuraciones que pueden idearse hace que su estudio exhaustivo sea poco útil, salvo que ya se tenga decidida la configuración final.

En conclusión, los llanos mareales producen una disminución de la amplitud de la onda de marea que, para un perímetro de inundación dado, depende de la profundidad del mismo. Cuanto más profunda mayor la deformación, aunque para valores negativos (llanura inundada en situación media) alcanza un valor límite. En el caso ficticio estudiado, la oscilación mareal puede verse disminuida hasta en un 25% a la altura de la esclusa de Sevilla. Las corrientes mareales son mayores aguas abajo de la llanura y menores aguas arriba, en lógica con la retirada de un importante volumen de agua del cauce por la propia llanura.

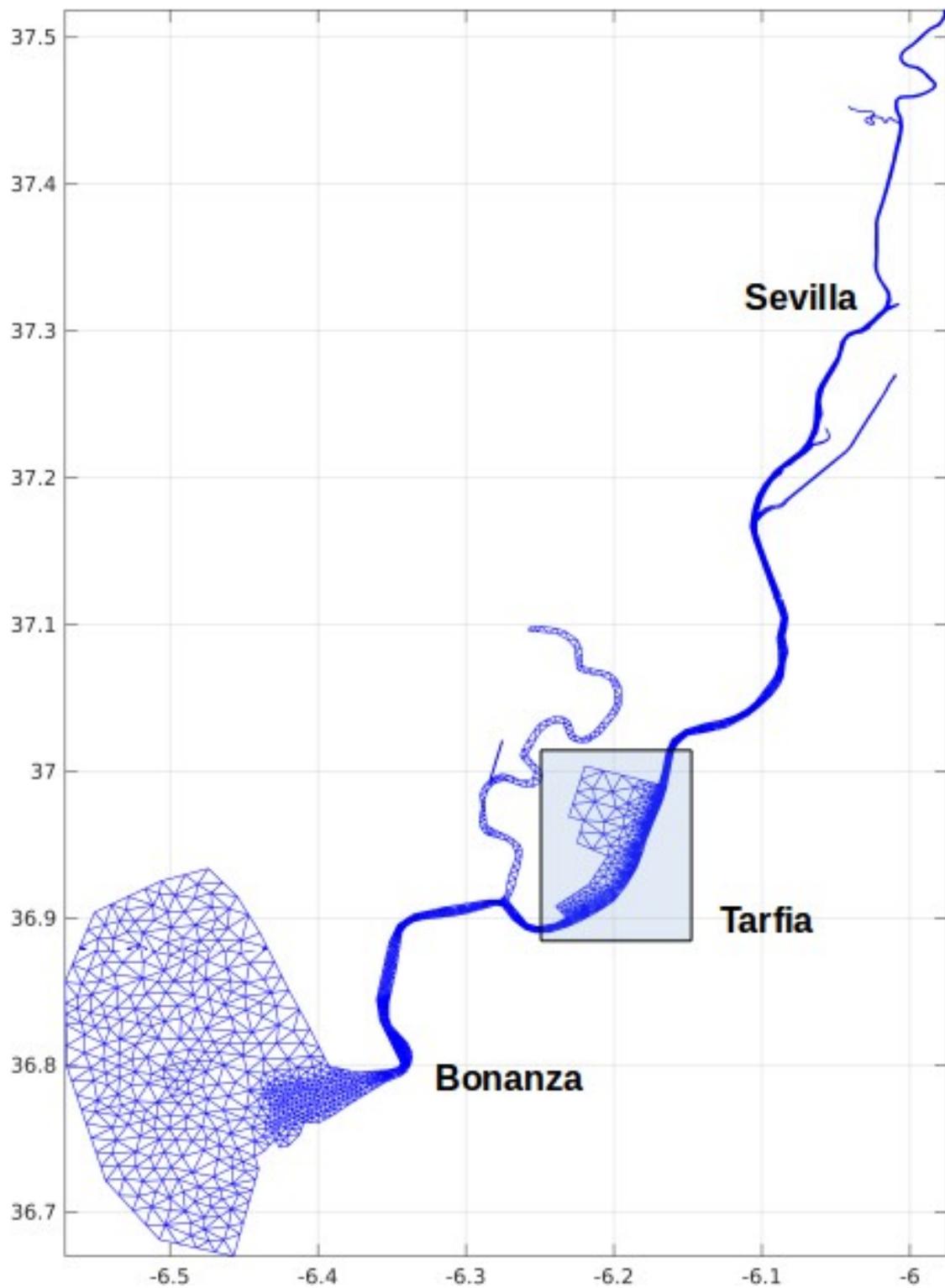


Figura 3.2.c.1.- Llanura mareal hipotética (caja azul) en la zona de Tarfia.

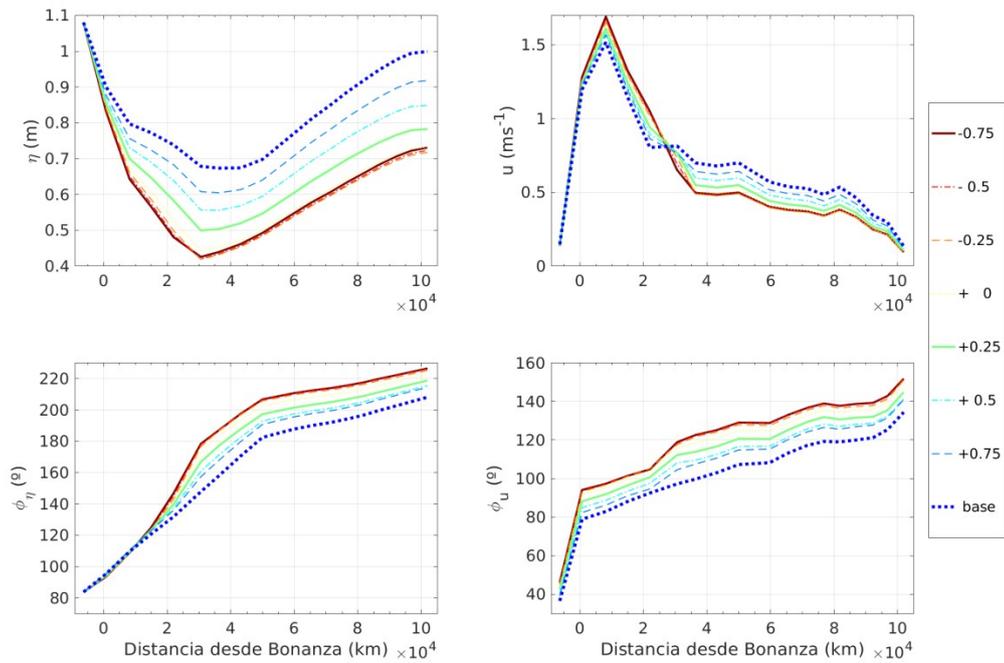


Figura 3.2.c.2.- Columna izquierda: Amplitud (arriba) y fase (debajo) de la oscilación de nivel asociada a M2 a lo largo del estuario en función de la profundidad asignada al llano mareal ficticio incorporado al estuario (Figura 3.2.c.1). Columna derecha: ídem para la corriente de marea. La simulación de referencia, denominada “base” en la leyenda, se corresponde con la configuración estándar del estuario sin llano mareal. El eje x es distancia medida desde Bonanza ($x=0$). La esclusa del puerto de Sevilla está sobre los 75km y la llanura inundable sobre los 22-35km.

3.2.d.- Cambio climático

El modelo ha sido también empleado para predecir cambios en la propagación mareal derivados del cambio climático. La principal consecuencia en dicha propagación surge de una mayor altura del nivel medio del mar asociado inducido por el calentamiento global. Técnicamente, este aumento de nivel puede abordarse como una profundización equivalente de la batimetría, por lo que la aplicación del modelo es muy simple: se han generado escenarios de diferentes batimetrías que consisten simplemente en añadir a la actual de referencia el incremento esperable de nivel del mar. No se ha cambiado el tamaño del forzamiento en la boca del estuario (se admite que las constantes armónicas en el océano no cambian) y también se ha mantenido la misma descarga ecológica de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en la presa durante el estudio.

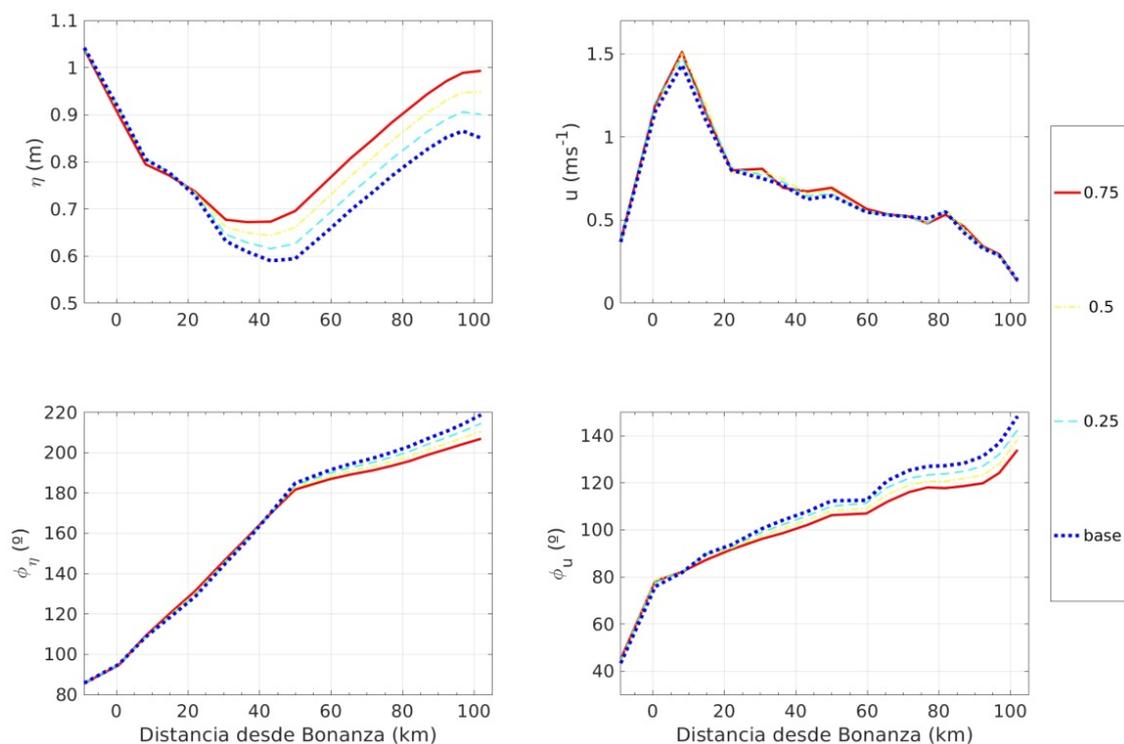


Figura 3.2.d.1.- Columna izquierda: amplitudes (panel superior) y fases (inferior) de la oscilación mareal asociada a M2 en función de la distancia para valores de aumento del nivel medio del mar en los diferentes escenarios especificados en la leyenda. La línea punteada azul corresponde con el escenario actual. Columna derecha: idem para la corriente mareal asociada a M2. La esclusa de Sevilla se encuentra sobre el km 75.

Los resultados pueden verse en la Figura 3.2.d.1 en la que se aprecia como el aumento de nivel del mar (valores en la leyenda) produce un aumento de la amplitud de M2 aguas arriba del kilómetro 20 (la mayor parte del tramo navegable) que es prácticamente lineal tanto espacialmente (más aumento cuanto más alejado del contorno oceánico) como en función del tamaño del forzamiento (mayor cuanto mayor el aumento de nivel medio del mar causado por el cambio climático). De la propia figura, se puede estimar un aumento local de la amplitud de M2 por cada cm de ascenso del nivel medio del mar en $C=0.002x$ cm, donde x es la distancia a lo largo del estuario en km medida desde ese contorno. Aguas abajo de ese punto kilométrico la amplitud no presenta cambios apreciables aunque el nivel medio del mar aumente. Teniendo en cuenta que el comportamiento del resto de constituyentes no debe diferir del de M2, se concluye que el rango mareal sigue una ley similar, aumentando en $C=0.002x$ por cada cm de aumento del nivel medio. En cuanto al tiempo de propagación (fases), el panel inferior izquierdo de la Figura 3.2.d.1 indica que no existe variación aguas abajo del kilómetro 50 respecto al escenario actual y sólo cambia muy ligeramente disminuyendo la fase (no más de $\sim 10^\circ$ en el peor de los casos, equivalente a ~ 20 min en tiempo) aguas arriba, adelantando por tanto la ocurrencia de la pleamar/bajamar en esa parte del estuario. Es

un resultado esperable dado que aumenta el espesor de la lámina de agua lo que implica mayor velocidad de propagación.

Respecto a las velocidades mareales (columna derecha de la Figura 3.2.d.1), la amplitud de M2 no se modifica en los diferentes escenarios en tanto que la fase indica un adelanto de los momentos de ocurrencia de los reparos mareales que depende linealmente del aumento del nivel del mar y de la distancia a la desembocadura, algo similar a lo observado para la amplitud de la oscilación discutido anteriormente. Ese adelanto es muy pequeño, no superando los 10° (20 min en tiempo aproximadamente) ni en el caso más desfavorable.

Es importante notar que en estos casos de estudio se considera una batimetría modificada por una cantidad constante exclusivamente, la misma del aumento del nivel del mar. Dada la escala temporal del cambio climático (cm/década) es muy posible que existan otras modificaciones locales inducidas por el propio uso del estuario o por la erosión/sedimentación que tengan más efecto que el propio cambio climático en las amplitudes mareales, lo que distorsionaría las conclusiones arriba indicadas.

El estudio apunta a la conclusión de un aumento lineal de amplitud de la onda mareaal cuanto mayor es el del nivel medio del mar, aumento que también es linealmente mayor cuanto más nos adentramos en el estuario. Puede resumirse en un coeficiente $C=0.002x$ (x distancia en km hasta la desembocadura) de aumento de amplitud mareaal por cada cm de aumento de nivel medio del mar. El aumento de amplitud es inferior al del nivel medio mar inducido por el cambio climático (en proporción 1/6 aproximadamente) por lo que la lámina de agua se verá siempre aumentada (el comentario ha lugar ya que un aumento de amplitud implica no sólo pleamares más altas sino bajamares más bajas también). La ocurrencia de la pleamar se ve sólo muy ligeramente adelantada en pocos minutos en la mitad superior del estuario, las corrientes mareales son insensibles a estos cambios de nivel y la ocurrencia de los reparos mareales también se ven adelantados en tiempos similares a los de la pleamar.

3.2.e.- Eventos extremos

Con objeto de probar la respuesta del modelo hidrodinámico con un forzamiento realista, tomamos el evento reciente más extremo del que hemos tenido noticia y sobre el que se tienen observaciones: la tormenta que azotó el golfo de Cádiz durante Noviembre del 2014.

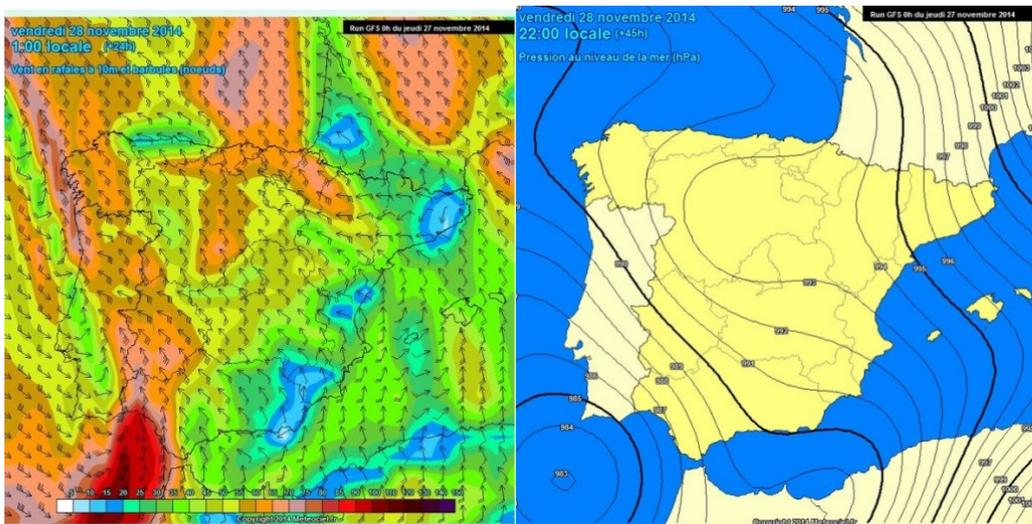


Figura 3.2.e.1.- Mapas de dirección y velocidad del viento y presión atmosférica el 28 Noviembre 2014.

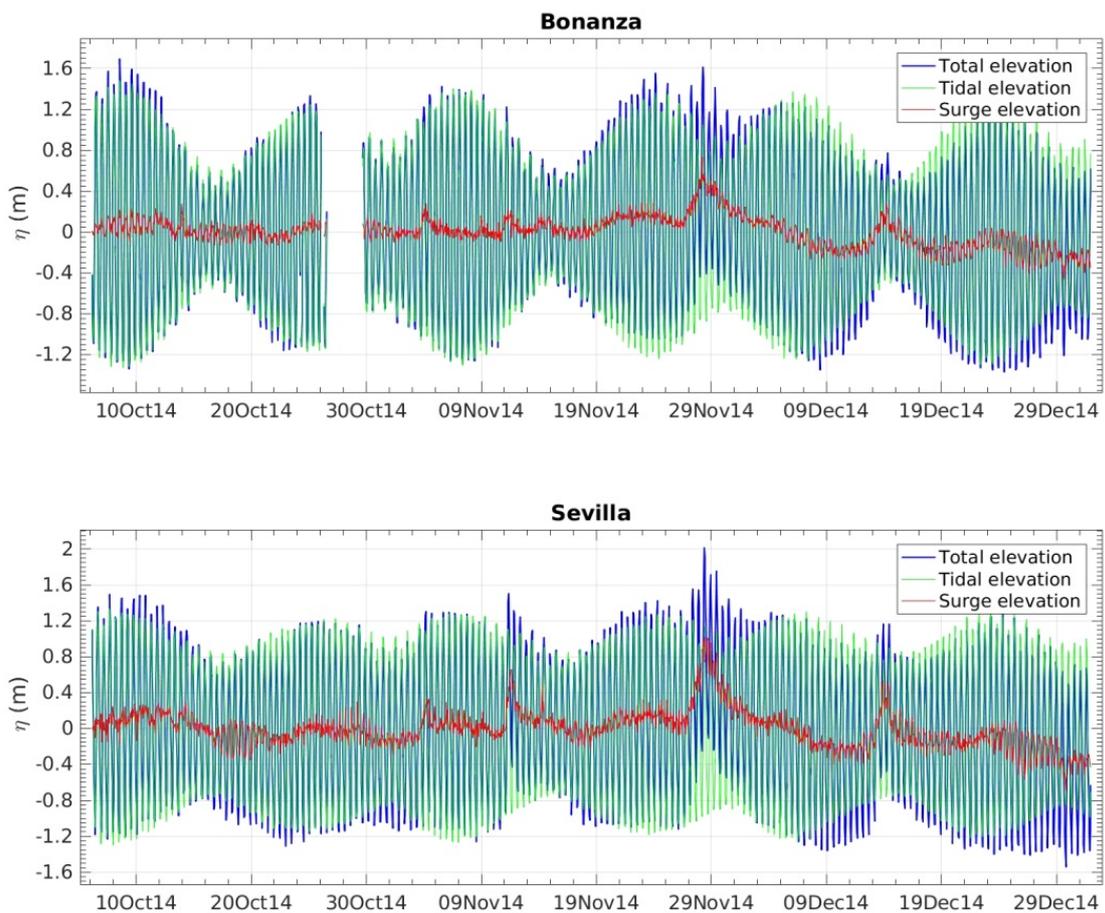


Figura 3.2.e.2. Series temporales de los residuos reales (puntos azules) y modelados obtenidas en los diferentes escenarios (líneas negro, rojo, verde y magenta) en Bonanza y Sevilla .

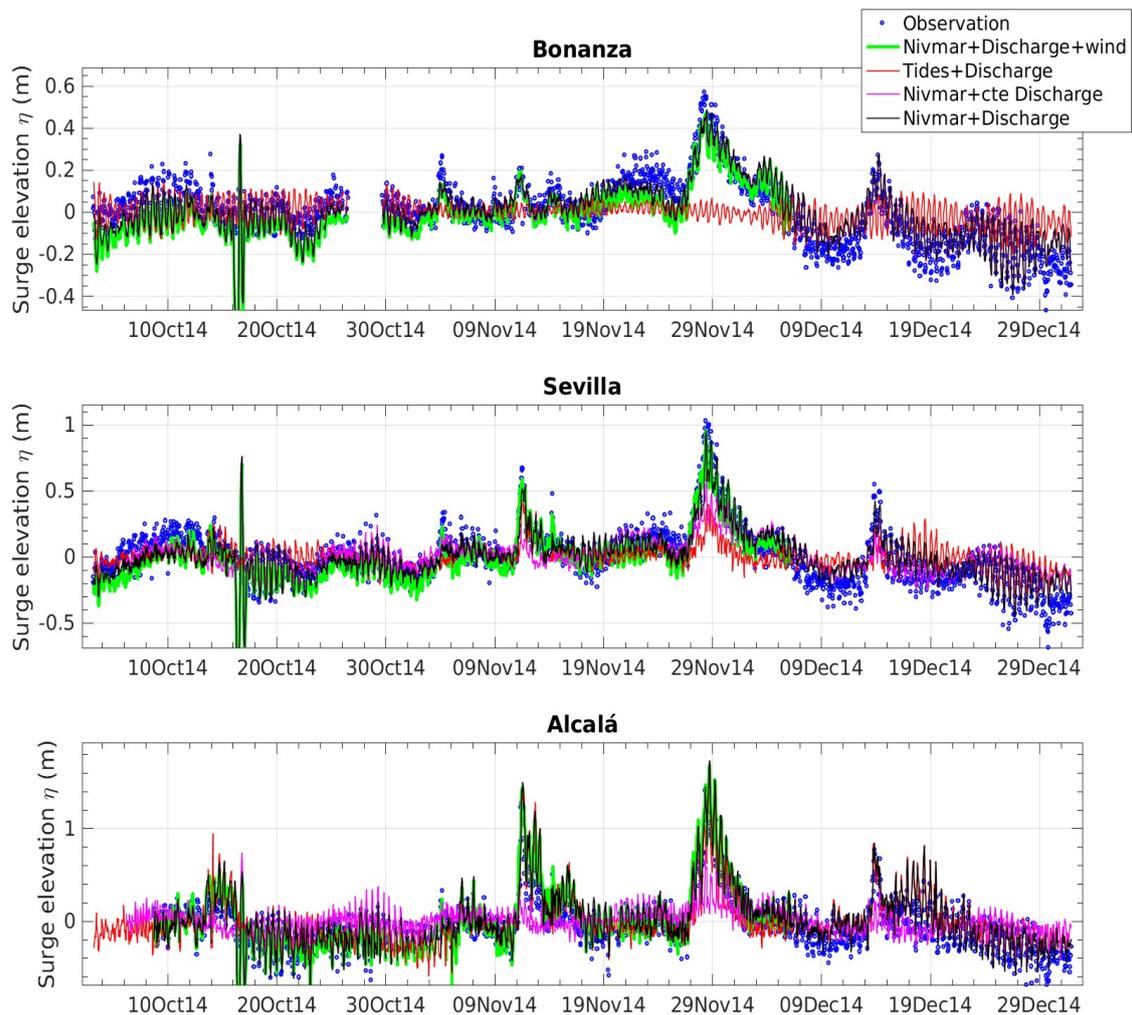


Figura 3.2.e.3.-. Series temporales de los residuos reales (puntos azules) y modelados obtenidas en los diferentes escenarios de forzamiento (líneas negro, rojo, verde y magenta, ver leyenda) en Bonanza, Sevilla y en la presa de Alcalá del Río.

Durante varios días (del 26 al 30 de Noviembre) se produjo una situación de mal tiempo (fuertes vientos, mala mar para la navegación, precipitaciones) como consecuencia del tránsito de dos depresiones en la parte sur de la península ibérica (Figura 3.2.e.1). Las rachas de viento llegaron a alcanzar los 90 km/h en algunos puntos y cuando la segunda borrasca se aproximó al Golfo de Cádiz, dejó un registro mínimo de presión de 980 HPa. En una charla informal con el práctico mayor del puerto con D. Luis Ibarrola se nos hizo saber que en aquella ocasión se tuvo que cerrar la entrada al Puerto de Sevilla.

Se recabaron los datos meteorológicos necesarios para recrear la situación en el estuario, concretamente, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y la elevación residual del mar producida por el modelo NIVMAR en los puntos cercanos a la frontera abierta en el Golfo de Cádiz, modelo que es ejecutado rutinariamente en modo operacional por Puertos del Estado. Con objeto de discriminar la importancia de los diferentes forzamientos sobre los niveles residuales se prepararon diferentes escenarios, combinando descargas constantes y reales, introduciendo o no el efecto del

viento y utilizando marea astronómica o niveles reales. Estos niveles reales son una combinación de marea y fluctuaciones de baja frecuencia producidas principalmente por las fluctuaciones en la presión atmosférica.

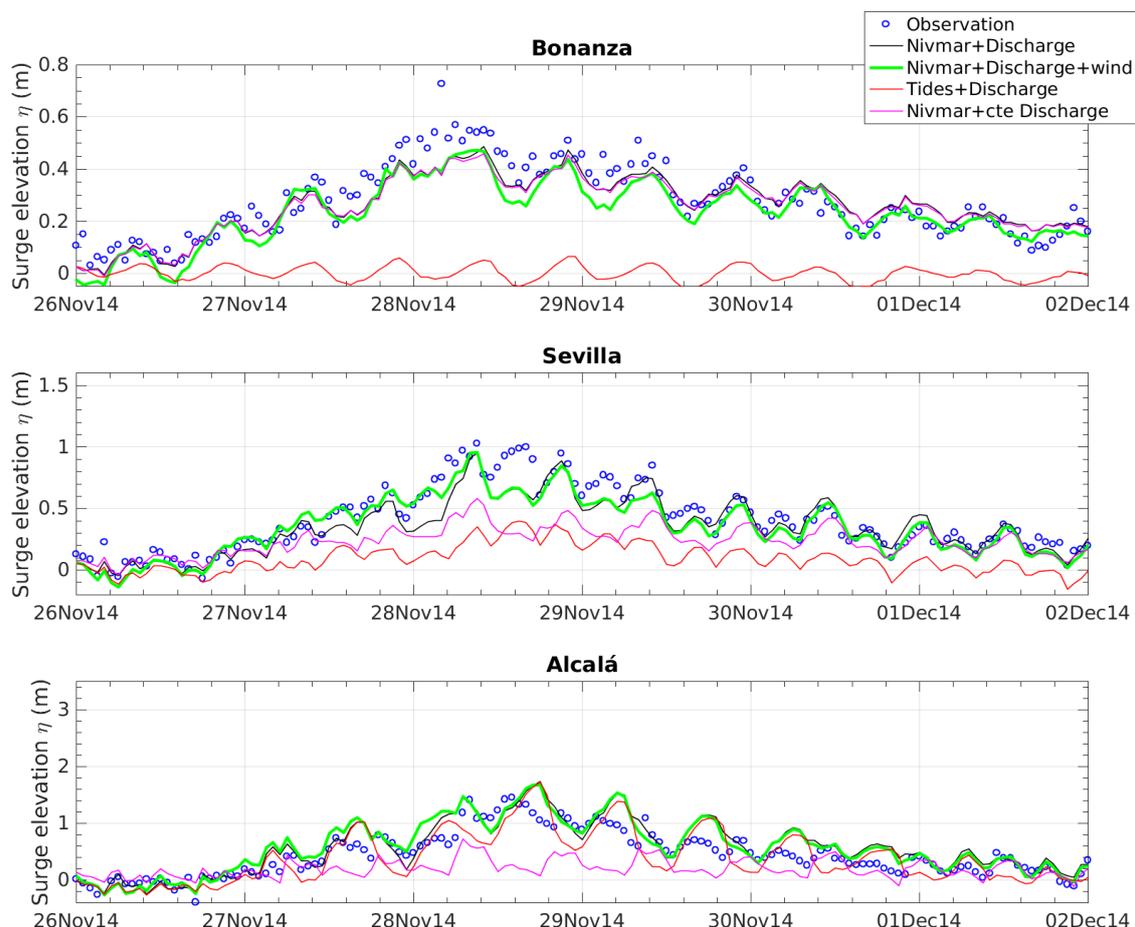


Figura 3.2.e.4.- Fragmento de la Figura 3.2.e.3 durante los días de la tormenta que motivó este estudio

En la Figura 3.2.e.2 se presentan las observaciones de la superficie libre en tres estaciones (Bonanza, Sevilla) utilizadas para validar las simulaciones con los diferentes escenarios propuestos. En la misma se recoge una descomposición de las fluctuaciones totales en una componente mareal y otra residual (elevación de mar menos la astronómica), que es la que resulta particularmente interesante.

Las Figuras 3.2.e.3 y 3.2.e.4 presentan los niveles residuales durante el tiempo modelado (tres meses, de Octubre a Diciembre 2014) con cuatro de los escenarios propuestos. El modelo aproxima bien los datos reales en los tres estaciones, tanto mejor cuanto más detalles se incluyen en el forzamiento (caso de la simulación con Nivmar+Descargas+Vientos). El incluir la parte del forzamiento meteorológico en la frontera de la plataforma mejora las observaciones cerca de la desembocadura (Bonanza), mejora que va perdiendo importancia aguas arriba (Sevilla y Alcalá) donde

la inclusión de las descargas reales es el factor que mejora los niveles residuales, más en la presa de Alcalá del Río, y algo menos en Sevilla. El efecto de las descargas se desvanece en la desembocadura (Bonanza). El efecto de los vientos, aun siendo tan fuertes como los de esta época, sólo tienen importancia secundaria en todo el estuario juzgando por las diferencias entre las simulaciones que los incluyen (líneas verdes) o no (líneas negras).

El modelo barotrópico reproduce adecuadamente los valores de nivel residual del río en condiciones meteorológicas extremas, que ponen en riesgo la navegación. Es un hecho aceptado que, como consecuencia del cambio climático, se produzca un aumento de los fenómenos meteorológicos extremos, los cuales son bien reproducidos por el modelo que se convierte en una herramienta útil en la gestión portuaria ante esos eventos.

El reanálisis del evento extremo acaecido en Noviembre de 2014 en el que coincidió una descarga importante debido a la pluviosidad y la llegada de una fuerte borrasca ha permitido valorar la influencia de cambios bruscos de condiciones de contorno en ambos extremos del estuario. El modelo barotrópico ha proporcionado una reconstrucción muy satisfactoria del evento, lo que permite aplicarlo para estudiar la importancia de cada agente forzante. El estudio separado de los efectos de cada uno de ellos permite concluir que el nivel residual del río (tras eliminar la marea) en la parte baja del estuario depende de cambios en el contorno oceánico que consisten básicamente en variaciones del nivel del mar meteorológicamente inducidas (la descarga influye menos, como se comentó en 3.2.b), en tanto que en la parte alta del estuario depende claramente del tamaño de la descarga.

4.- MODELO BAROCLINO

El modelo barotrópico utilizado hasta el momento utiliza una densidad constante y supone una aproximación correcta a la dinámica en el estuario en lo que se refiere a la descripción de la superficie libre y de las velocidades, como se ha explicado en las secciones precedentes. El siguiente nivel de complejidad consiste en utilizar un modelo baroclino en el que la densidad de la masa de agua no es homogénea, que reproduzca los campos 3D de velocidad, temperatura, salinidad y densidad, permitiendo que ésta influya en las ecuaciones del movimiento.

4.1 Dominio (topografía, diferentes batimetrías, morfología)

En lo que sigue no se detallan aquellos aspectos técnicos de la implementación del modelo que son compartidos por el modelo barotrópico como son el dominio, batimetría y mallado. Si se quiere dejar constancia de que el coste computacional se incrementa considerablemente: hay que plantear más ecuaciones a resolver y hay que utilizar un paso temporal de integración más pequeño con objeto de garantizar la estabilidad de las simulaciones. Se han seguido utilizando las mismas mallas mencionados en el epígrafe 2.1, de alta resolución y de baja resolución espacial horizontal. En la vertical se han definido 9 niveles (capas) comprendidos entre las siguientes profundidades: 0, 2.0, 2.75, 3.5, 4.5, 6, 8, 11, 15, 20.5. En un ejercicio preliminar se ha trabajado con ambos mallados para comparar los resultados producidos y los tiempos de ejecución. A la vista de ellos, por el momento, se opta por trabajar con el mallado de menor resolución que tiene tiempos de ejecución varias veces menores y produce resultados muy similares a los dados por el modelo de malla de baja resolución. Éste puede ejecutarse en un ordenador de sobremesa de gama alta, en tanto que las simulaciones con la malla de alta resolución requieren un superordenador tipo Picasso (del centro de supercomputación de la UMA) para que la ejecución se realice en tiempos razonables. Notar que aspectos relativos al tamaño de malla (extensión a modelar, especialmente en la zona de plataforma) y número de nodos (definición en el interior del estuario, especialmente el número de nodos entre las riberas) cobran importancia en este modelo. Muchas de las decisiones sobre los mallados a implementar en el modelo barotrópico fueron tomadas anticipando este hecho para que, al compartir mallado, ciertos resultados obtenidos en uno y otro fuesen fácilmente comparables.

4.2 Forzamientos y datos para la calibración del modelo.

4.2.a Forzamientos.

El modelo utiliza los mismos tipos de forzamiento en los contornos que la versión barotrópica, es decir, nivel del mar en el oceánico y descarga en la cabecera. Se prescinde en esta versión inicial de intercambios de calor con la atmósfera que podrían tener cierto interés en periodos de viento y gradiente térmico agua-aire acusados.

Este modelo necesita imponer condiciones de contorno sobre valores de temperatura y salinidad (series de temperatura y salinidad) y establecer unas condiciones iniciales de partida para la simulación. En el estuario del Guadalquivir, los valores de temperaturas no presentan grandes variaciones espaciales a lo largo del estuario ni tampoco en la vertical con excepción del periodo estival en donde tanto los gradientes horizontales como verticales se acentúan. La salinidad sí presenta un gradiente horizontal importante (0 psu en la cabecera y alrededor de 36.7 psu en la desembocadura) durante todas las épocas del año y, similarmente a la temperatura, no tanto en la vertical.

En los primeros estados de desarrollo del modelo, se han considerado condiciones en la plataforma y en la cabecera constantes pero diferentes entre sí, 22.5°C-36.7 psu y 28°C-0.8 psu, respectivamente, con objeto de forzar un gradiente horizontal termo-halino. En el caso de la salinidad esa constancia podría ser un buen reflejo de una realidad que prevalece en la mayor parte de las situaciones; en el caso de la temperatura, se obvian tanto las fluctuaciones diarias como las fluctuaciones anuales que existen entre la plataforma (temperatura agua Golfo de Cádiz) y la cabecera (temperatura de tierra), por tanto, el campo de temperatura modelada tendrá esa pequeña carencia. En cualquier caso, es un detalle poco relevante en este informe que se centra sobre el campo de salinidad.

El modelo requiere además de condiciones iniciales que se han establecido como un estuario en reposo lleno de agua con temperatura superficial de 26°C de un gradiente vertical de -0.7°C/m y salinidad superficial de 24 psu con gradiente vertical de 1 psu/m. Para alcanzar una estado estacionario con una distribución espacial coherente y razonable de ambas variables se precisa de 1 a 2 meses de spin-up del modelo, periodo en el que se descartan las salidas producidas (a modo de comparación, el tiempo de spin-up del modelo barotrópico es 1 día). El spin-up se reduce considerablemente si se ventila el estuario con descargas grandes de agua dulce mantenidas en el tiempo.

4.2.b Datos para la calibración.

Las observaciones de nivel de la superficie libre empleadas en el modelo barotrópico siguen siendo válidas. En este modelo baroclino, el campo tridimensional cobra protagonismo y por tanto requiere de observaciones en la vertical tanto de velocidades, como de temperaturas y salinidad. No se disponen de observaciones fiables de corriente mas allá de las mencionadas en los informes anteriores derivadas de las publicaciones

del anterior estudio del CSIC. Estamos pendiente de una futura instrumentalización del estuario con perfiladores de corriente (ADCP); la complejidad de la estrategia de fondeo, mantenimiento, recogida y procesamiento de datos está dilatando esto y por el momento no se tiene cerrada una fecha.

Más importante para calibrar este nuevo modelo es la disponibilidad de datos de salinidad, variable importante en el estuario debido a los usos diversos que se hacen del mismo (nicho ecológico de puesta y alevinaje de especies de interés comercial, regadío de arrozales, distribuciones de fitoplancton, zooplancton e ictioplancton...). Se está a la espera de poder colocar conductímetros en algunos puntos de la instrumentalización antes mencionada. A fecha de hoy sólo se dispone de algunos resultados publicados⁴, de los muestreos hechos por la Junta de Andalucía dentro del programa de Calidad de Aguas⁵ (ver Figura 4.2.b.1) y registros en continuo en diferentes estaciones (ver Figura 4.2.b.2), también dependientes de la Junta de Andalucía. Este último conjunto de datos son los más significativos, con series especialmente largas en las estaciones de el Mármol y Gélves. El orden de magnitud medio y las respuestas frente a descargas importantes (superiores a los 200 m³s⁻¹), con disminuciones reseñables de la salinidad, de alguna manera respaldan la calidad de estas series. En cualquier caso ambas estaciones quedan aguas arriba de la zona donde transita la intrusión salina: los valores medios están por debajo de los 4 y de los 2 psu respectivamente. La serie obtenida en la Esclusa está muy próxima a Gélves y los registros son bastante similares. La estación del Majuelo, con salinidades ligeramente por debajo de los valores registrados en Gélves o la Esclusa, sugieren un tramo alto del estuario con salinidades que no pueden ignorarse. Los valores en Sanlúcar en las inmediaciones de la desembocadura son, aparentemente, defectuosos.

4.3 Resultados preliminares del modelo Baroclino.

Dado las fechas de la mayor parte del conjunto de observaciones disponibles, se procedió a realizar una simulación de la situación durante el periodo Enero 2008- Octubre 2009. Se describe en los siguientes párrafos algunos aspectos de interés producidos por este modelo baroclino que está aún pendiente de una calibración definitiva como se ha comentado en varias ocasiones.

Las simulaciones barotrópicas y baroclinas producen desniveles medios entre la cabecera (Esclusa) y desembocadura diferentes (Figura 4.3.1) que se adscriben al efecto de las inhomogeneidades del campo de densidad⁶. Así, el modelo baroclino deja un

4 Datos del estudio previo del CSIC, con lagunas importantes.

5 Datos distribuidos en el tiempo irregularmente.

6 Físicamente, si se piensa en un estuario sin movimiento, la suma de fuerzas sobre un elemento de fluido debiera ser nulo, por tanto, a un gradiente en densidad generado por el gradiente salino (mas salinidad en plataforma que aguas arriba) tiene que ser compensado por otra fuerza generada por un gradiente mayor de la superficie libre (más altura aguas arriba que en la desembocadura).

gradiente horizontal medio mayor y más próximo a las mejores estimaciones experimentales de las que se disponen (véase Anexo A para más detalles). Es interesante notar también que el Instituto Hidrográfico de la Marina, a partir de los trabajos de levantamiento batimétrico que han realizado en el estuario estimó un gradiente experimental basado en desviaciones respecto al geode que respalda notablemente las predicciones de este modelo baroclino.

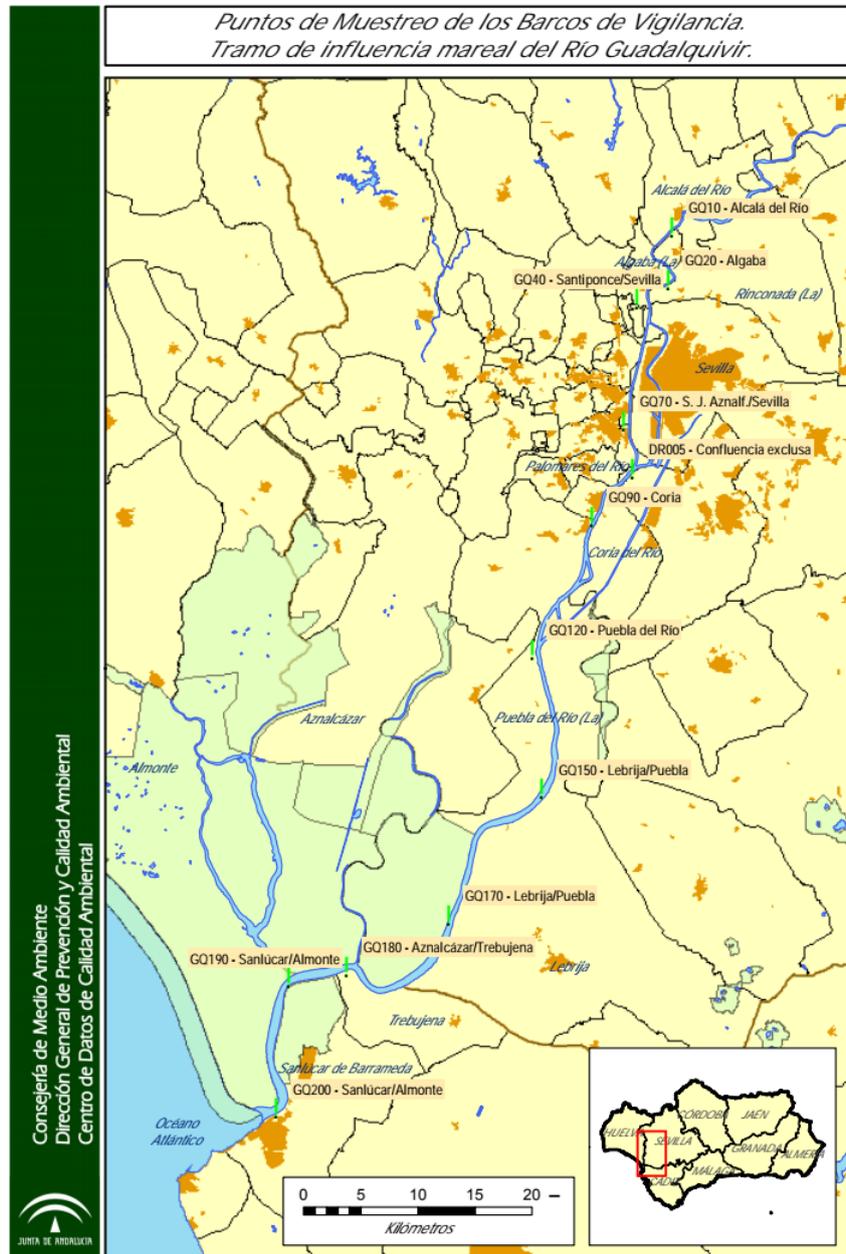


Figura 4.2.b.1.- Ubicación de las estaciones de muestreo visitadas regularmente (periodicidad superior a la semana) dentro del plan de vigilancia que la consejería de medioambiente de la Junta de Andalucía tiene establecido en el estuario. Las estaciones se marcan en verde y se identifican con un código y un topónimo.

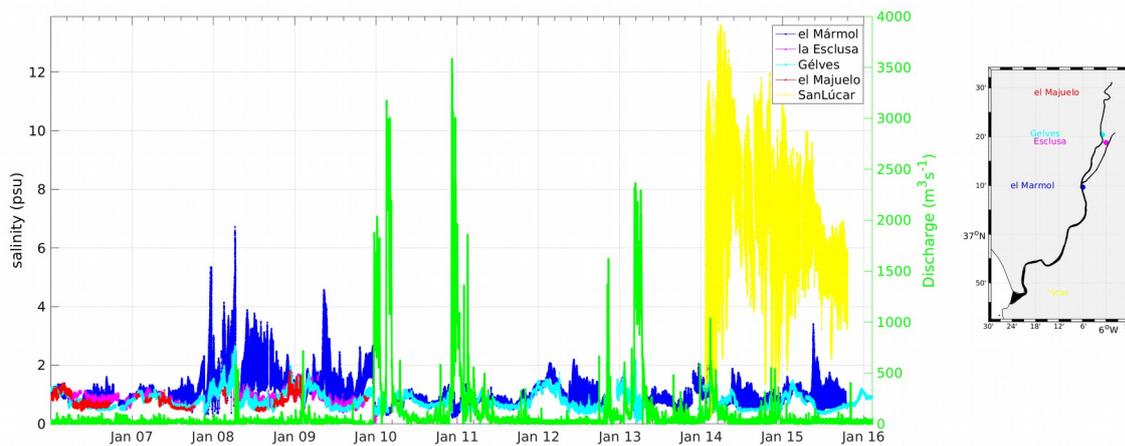


Figura 4.2.b.2.- Series temporales de salinidad en la red de medida de estaciones automáticas de la Junta de Andalucía. El mapa de la derecha presenta la ubicación de la estaciones. Los valores en Sanlúcar están divididos por 5 para emplear la misma escala; esta estación presenta valores poco razonables (salinidad por encima de 38 psu) la mayor parte del tiempo. Lamentablemente, en la actualidad la red no se encuentra operativa. En verde se muestran las descargas de agua dulce desde la presa de Alcalá del Río (eje de la derecha,).

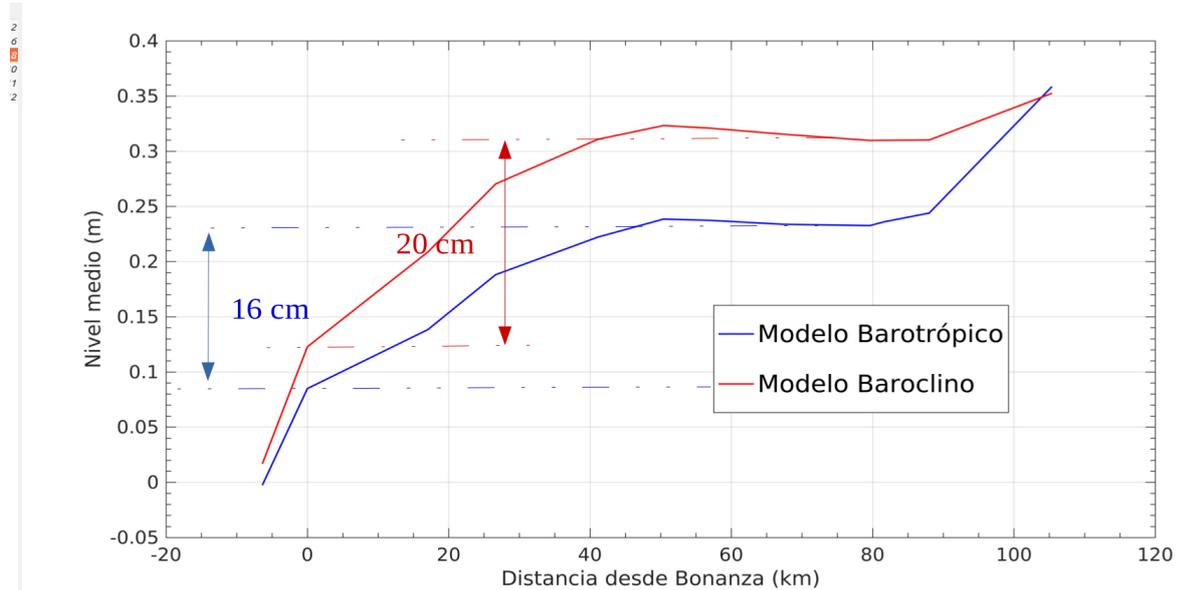


Figura 4.3.1.- Nivel medio generado por el modelo barotrópico y por el modelo baroclino tras eliminar la marea. Las diferencias entre ambos no son demasiado significativas (máximas de 8 cm) si consideramos la incertidumbre de todo el proceso (datos y modelo). En cualquier caso y como ha manifestado reiteradamente la APS, interesa ir acotando esta incertidumbre de todas las formas posibles. El modelo baroclino aproxima el desnivel longitudinal Bonanza-Sevilla observado experimentalmente (datos del IHM) de forma más satisfactoria, como era de esperar. Ver más detalles en el Anexo A.

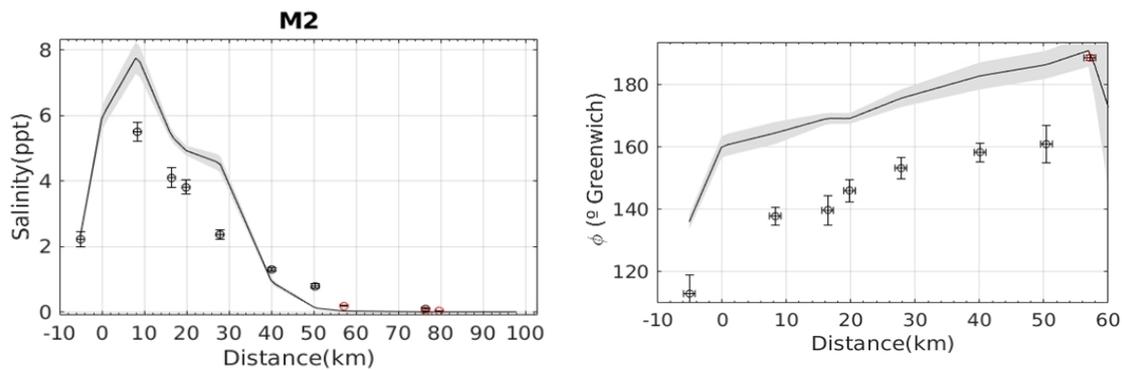


Figura 4.3.2.- Amplitud (izquierda) y fase (derecha) de la señal mareal de salinidad asociada a M2 en función de la distancia (el sombreado es su margen de error) producida por el modelo baroclino y resultados extraídos de los datos recogidos por el CSIC en su estudio-diagnóstico del estuario (símbolos). El patrón espacial de ambos conjuntos de datos es similar, aunque hay diferencias claras en los valores. En particular, hay un desplazamiento de unos 20° en la fase muy similar al observado entre velocidades modeladas y los datos disponibles ya comentado en un epígrafe anterior, que se propaga a la señal advectada de salinidad. Se abordará en detalle cuando se disponga de un conjunto sólido de observaciones de corriente y de salinidades.

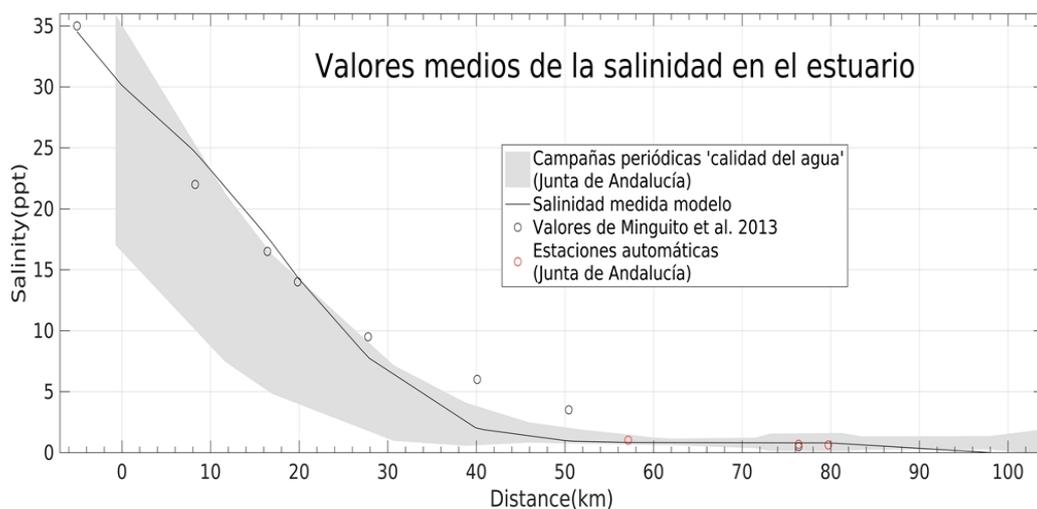


Figura 4.3.3.- Valor medio de la salinidad en el estuario obtenido de las diversas fuentes indicadas en la leyenda. La zona sombreada proviene de los datos recogidos periódicamente por la Junta de Andalucía, que tiene mucha dispersión debido al muestreo irregular que siguen. Los círculos negros son valores publicados en el trabajo indicado, deducidos de observaciones de corta duración recogidas durante el estudio del CSIC. Los círculos rojos provienen de estaciones automáticas desplegadas por la Junta de Andalucía que tienen mayor duración temporal y proporcionan datos más fiables. Finalmente, la línea continua es el valor medio producido por el modelo durante una simulación de 21 meses de duración forzado con descargas reales. Los resultados son satisfactorios aunque debe trabajarse más la calibración cuando se disponga de mejores datos para ello.

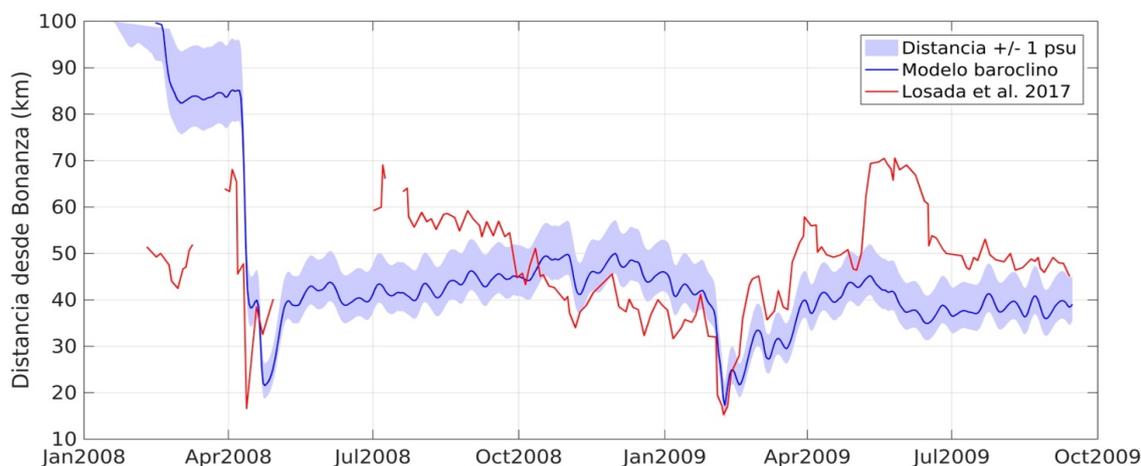


Figura 4.3.4.- Comparación de la posición de la línea de 2 psu de salinidad en el estuario (medida desde Bonanza) obtenida de los valores publicados en el artículo mencionado (línea roja), deducidos de las observaciones recogidas durante el estudio del CSIC, y los predichos por el modelo durante esa época usando las descargas reales facilitadas por la CHG (línea azul). El sombreado indica la extensión de la región de ± 1 psu alrededor del valor 2 psu de referencia. Como se comenta en el texto, el modelo tarda mucho tiempo en ajustar sus condiciones iniciales a un gradiente realista salvo que se produzca una importante descarga, que es lo que ocurrió en Abril de 2008. En esas circunstancias, el ajuste se realiza rápidamente. Otro hecho curioso es que las discrepancias entre ambos conjuntos de datos tiende a ocurrir en verano: los datos indican una penetración de la cuña salina en el estuario mayor durante el verano, hecho real bien conocido por los lugareños. La explicación para este comportamiento es la retirada de agua dulce para regadío que ocurre en esta época del año. Esta retirada no está contemplada en el modelo, que sigue forzado por las descargas facilitadas por la CHG, mayores en esta época del año por intereses de los arrozales. Sin embargo la mayor parte de ellas no prosigue aguas abajo hasta la desembocadura, lo que falsea necesariamente las predicciones del modelo, el cual necesitará correcciones para incorporar esta realidad.

En lo referente al campo de salinidad, las Figuras 4.3.2 a 4.3.4 recogen diferentes comparaciones con las observaciones (señal de marea en las series de salinidad, salinidad media a lo largo del estuario y posición de la isohalina de 2 psu respectivamente) y en general muestran un buen acuerdo (ver pies de figura para más detalles). En la figura 4.3.4 se han querido mantener los resultados producidos por el modelo durante los meses iniciales para mostrar dos hechos, el primero es el largo tiempo de spin-up al inicio (esos valores del modelo durante el inicio de la simulación hay que descartarlos, como ya se ha indicado) y, el segundo, para confirmar que una descarga fuerte de agua dulce (como la ocurrida en Abril de 2008) acelera enormemente el proceso de reajuste inicial (reduce el spin-up). De hecho, tras esta fecha, se puede asegurar que el modelo está produciendo sus resultados definitivos.

La comparación a realizar en esas figuras tiene, como se ha dicho, carácter preliminar puesto que las series temporales no presentan la buena calidad contrastada requerida para una calibración del modelo adecuada. Las estaciones de el Mármol y Gélves, con

series más largas y fiables, resultan insuficientes⁷ para proceder a una calibración más exigente. Aun así, el acuerdo es bastante estimulante y da pie para confiar en que la calibración definitiva pendiente de realizar va a producir resultados muy satisfactorios.

Al margen de lo anterior se ha analizado el funcionamiento general del modelo baroclino tomando los dos últimos meses de esa larga simulación de casi dos años. Para ello, se han seleccionado diferentes cortes longitudinales y transversales así como animaciones que ayuden a visualizar la evolución de la salinidad que genera el modelo del estuario. En este informe se han incorporado algunas figuras ilustrativas que se comentan brevemente. Más figuras y animaciones producidas por las salidas de este modelo baroclino pueden verse en el DVD que se adjunta con este informe⁸.

La Figura 4.3.5 muestra un corte longitudinal de las salidas del modelo a lo largo del centro del canal desde la desembocadura hasta los arrozceros el 28-09-2009 a las 15 horas. El estuario aparece bien mezclado en la vertical aguas abajo de los 5 km y aguas arriba de los 30 km, en tanto que en la zona comprendida entre estos límites registra un cierto gradiente vertical (estratificación) en consonancia con estudios⁹ y publicaciones previos. La Figura 4.3.6 presenta dos cortes transversales, uno del 28-09-2009 y otro el 3-10-2009, en la misma zona del corte presentado en la Figura anterior usando un código de color que resalta la isohalina de 15 psu. Comparando los dos cortes podemos identificar las fluctuaciones temporales-espaciales a las que está sujeta dicha isohalina (color magenta) forzadas por la marea puesto que es un periodo con descarga bajas. Se ha escogido esa isohalina por la importancia que parece tener en relación con la abundancia de ciertas especies, según han comentado los grupos dedicados a la ecología del estuario (Universidades de Sevilla y Cadiz) en diferentes reuniones mantenidas en el marco del proyecto. Este modelo, una vez calibrado satisfactoriamente, tiene un alto potencial para ayudar, gracias a su alta resolución espacio-temporal, en estudios de distribución de especies estuarinas y su ecología dado que la excursión que produce la marea cambia sustancialmente las condiciones hidrológicas en un determinado lugar del estuario. En otras palabras la fase de la marea no sólo condiciona las corrientes y el espesor de la lámina de agua sino que modifica sustancialmente los campos de temperatura y salinidad; esas figuras pretenden plasmar el potencial del modelo y la variabilidad a la que está sujeta el estuario.

7 Ambas estaciones se encuentran por encima de la región de máximo gradiente horizontal de la salinidad. A priori, lo ideal para la calibración de este modelo baroclino sería tener series continuas de salinidad en la zona de la desembocadura, en la zona de máximo gradiente horizontal y aguas arriba de dicha zona. También se necesitarían observaciones de temperatura.

8 En el DVD se proporcionan todos los cortes en formato pdf, animaciones en formato GIF y videos 3D ilustrativos de la evolución de la salinidad y también de la altura de marea.

9 Datos tomados con sondas multiparamétricas (CTD) durante las campañas de recogida de muestras por parte de grupos encargados de estudiar la ecología del estuario.

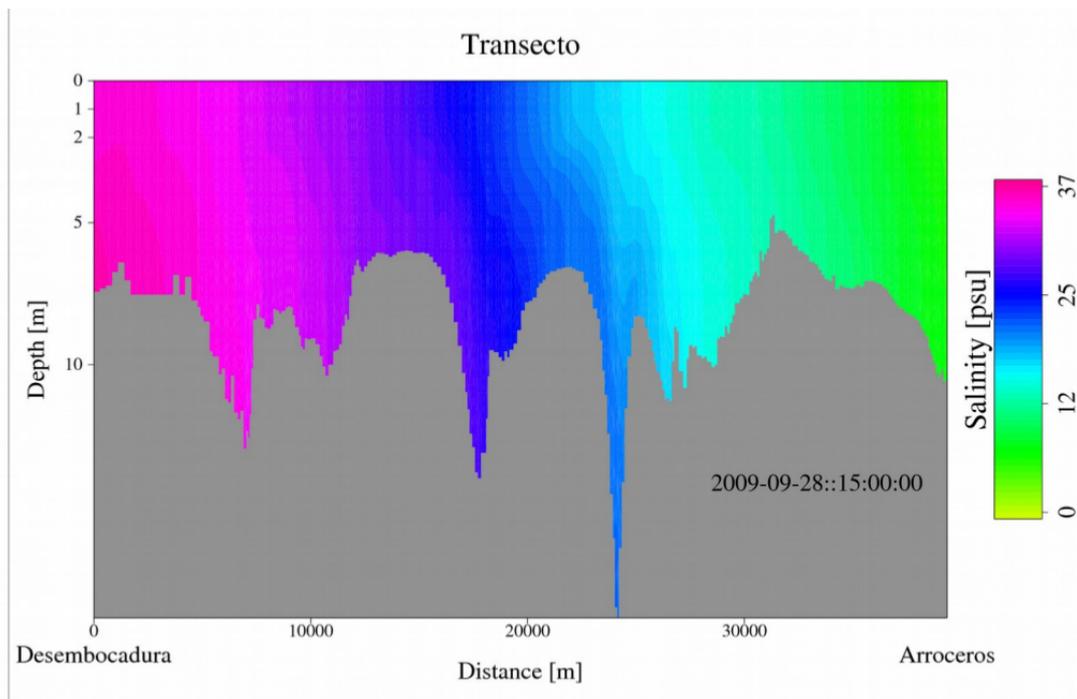


Figura 4.3.5- Datos preliminares de salinidad el día 2009-09-28 a las 15 horas. Corte longitudinal desde la Desembocadura hasta la zona de Arroceros. El estuario esta clasificado como bien mezclado, según la literatura científica, con zonas de salinidad homogéneas verticalmente y diferencias longitudinales desde la boca del estuario hasta la zona de arroceros. Se aprecia cierta estratificación en la zona central a las 15 horas del día 2009/09/28.

La Figura 4.3.7 muestra la salinidad superficial, en la misma zona de las figuras comentadas anteriormente¹⁰. En ella se aprecia además del gradiente horizontal principal, un gradiente lateral secundario (se aprecia muy bien a la altura de Salinas y Puntalete); este gradiente lateral físicamente se desarrolla durante la fase de llenado con aguas más salinas por la diferencia de velocidad entre la parte central (mayor fondo y por tanto mayor velocidad) y las riberas (menor fondo y por tanto menor velocidad) que hace que la aguas más salinas remonten (se advecten) más eficientemente por la parte central que por las riberas. Por tanto, el modelo confirma las diferencias de salinidad observadas por los mencionados grupos. Además se puede observar una mayor progresión por el brazo de la Torre de las aguas más salinas dado que por este ramal no se tienen aportaciones de agua dulce significativas en tanto que por el ramal principal del estuario si se tienen. La intensidad de las aportaciones de agua dulce no sólo cambian el nivel (especialmente en la cabecera del estuario), como se exploró con el modelo barotrópico, sino también y sobre todo la posición y evolución de la cuña salina (Figura 4.3.4) y la estratificación la vertical (comparar la inclinación de las isolíneas en las Figuras 4.3.5 y 4.3.6).

¹⁰ Se presenta el estuario 9 h después de lo que presenta el corte longitudinal de la Figura 4.3.5

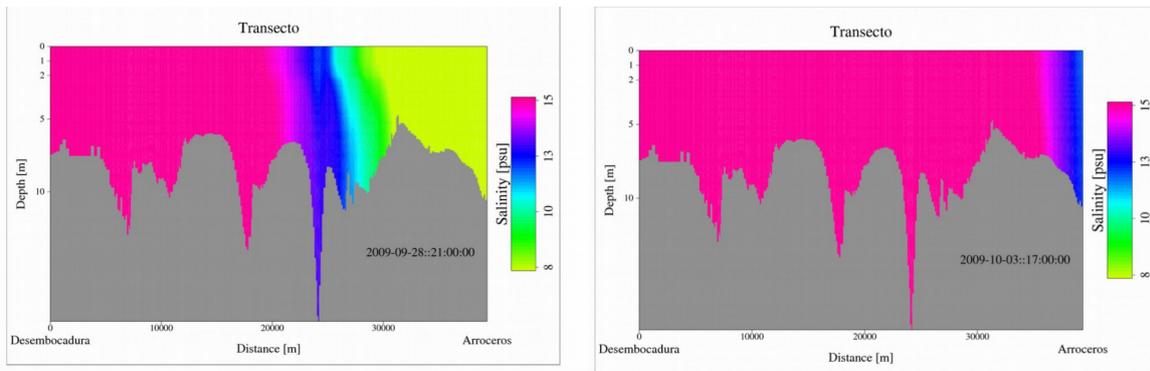


Figura 4.3.6.- Cortes longitudinales con valores de salinidad en los días y horas indicados en la esquina inferior derecha de cada subpanel. Se resalta el valor de 15 psu (color magenta) por su valor ecológico. El valor de 15 psu fluctúa desde la zona más baja en Puntalete, hasta la zona más alta situada en Tarfia. Notar las diferencias, en cuanto a la estratificación vertical, que existe entre la situación del panel izquierdo, con diferencias de 3-4 psu, y la del panel derecho, con diferencias inferiores a 1 psu, si nos fijamos en la isohalina de 14 psu.

Las Figura 4.3.8, y 4.3.9 muestran la salinidad y la anomalía de la salinidad para un corte transversal, zona de Tarfia, durante un ciclo mareal desde las 00:00 hasta las 12:00 del día 28 de Septiembre del 2009. Se ha seleccionado este corte por estar en la zona donde fluctúa notablemente la ubicación de la isohalina 15 psu. Inicialmente (a las 00:00 y las 01:00) la corriente entrante se está debilitando remarcando una mayor salinidad hacia el fondo de la ribera oriental; paulatinamente la corriente invierte su sentido y la sección comienza a homogeneizarse con las aguas menos salinas de la parte del estuario más interna; finalmente, después de las 08:00 comienza de nuevo el proceso de llenado del estuario dejando un núcleo de aguas más salinas pegado al fondo y aguas menos salinas en superficie como se espera por la diferente densidad de unas y otras. Aunque el modelo baroclino no tiene aún una excesiva resolución espacial entre riberas (por obvias razones de ejecución, que se mejorará en la medida que se implemente la paralelización del código numérico), la que tiene actualmente es suficiente para reproducir los gradientes de salinidad transversales y verticales esperables. En la Figura 4.3.9 se resalta esta estratificación con anomalías positivas en las zonas más profundas y próximas al margen derecho del estuario y anomalías negativas en superficie y por lo general próximas al margen izquierdo.

Se puede concluir que tanto los datos de los que se disponen como los procesos físicos descritos avalan el modelo baroclino en su estado actual, modelo que tiene mucho recorrido de mejora cuando se disponga de observaciones de calidad no sólo de salinidad sino, incluso, de datos que cuantifiquen extracciones/aportes de agua dulce en puntos intermedios del estuario que no están prescritas aún en el modelo porque no se posee esa información¹¹.

¹¹ Aporte de agua dulce desde el Guadaira, el Ribera del Huelva, el caño del brazo de la Torre, ... extracción para riego de los campos adyacentes. Recordar que, actualmente, solo se fuerzan las entradas de agua dulce en el Guadalquivir con las descargas desde la presa de Alcalá del Río

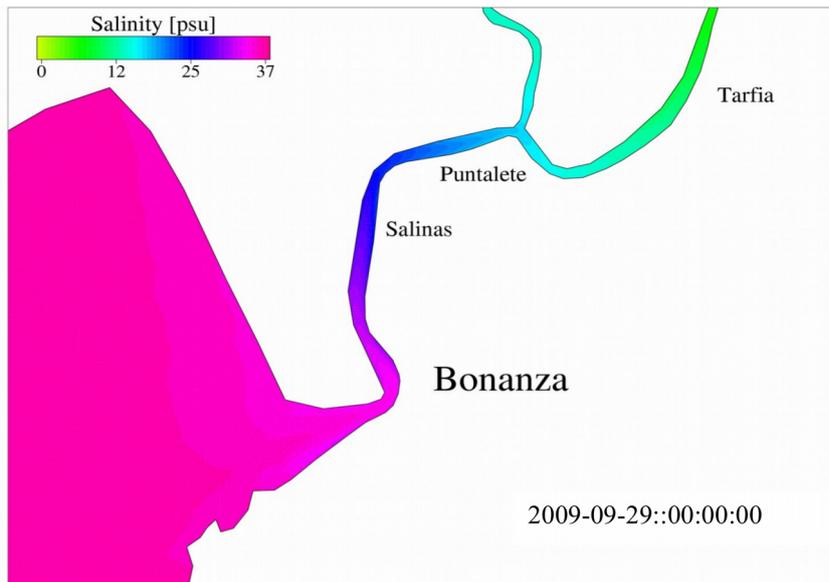


Figura 4.3.7.- Mapa de salinidades en superficie desde la desembocadura hasta la zona de Tarfia para las 00:00 del 29 de Septiembre de 2009. El código de color recoge todos los valores de salinidad que se pueden dar en el estuario.

Los primeros resultados muestran que el modelo baroclino da resultados coherentes con las observaciones disponibles y con la dinámica del Guadalquivir, especialmente la localización y evolución de los máximos gradientes de salinidad y su respuesta a descargas de agua dulce en la cabecera. Es importante constatar que este modelo requiere para poder finalizarlo de información experimental de calidad que permite su calibración; esto permitirá la predicción fina de diferentes parámetros de interés en el estuario. Los requisitos computacionales mínimos que permiten completar las simulaciones en tiempos razonables¹² nos lleva a utilizar el supercomputador Picasso de la UMA; el código está compilado y el ejecutable listo pero por el momento se puede considerar este modelo de alta resolución espacial baroclino en fase de desarrollo. De otra parte, la realización de pruebas en la malla de alta resolución pone de manifiesto las limitaciones de los computadores personales para realizar las simulaciones y por tanto la portabilidad del modelo baroclino.

¹² Se busca que el tiempo que necesita la máquina para simular un día sea una fracción de este. Pongamos que cada día simulado requiera de tiempos por debajo de la hora de computación. La idea es que el modelo en un futuro pueda trabajar en modo operacional.

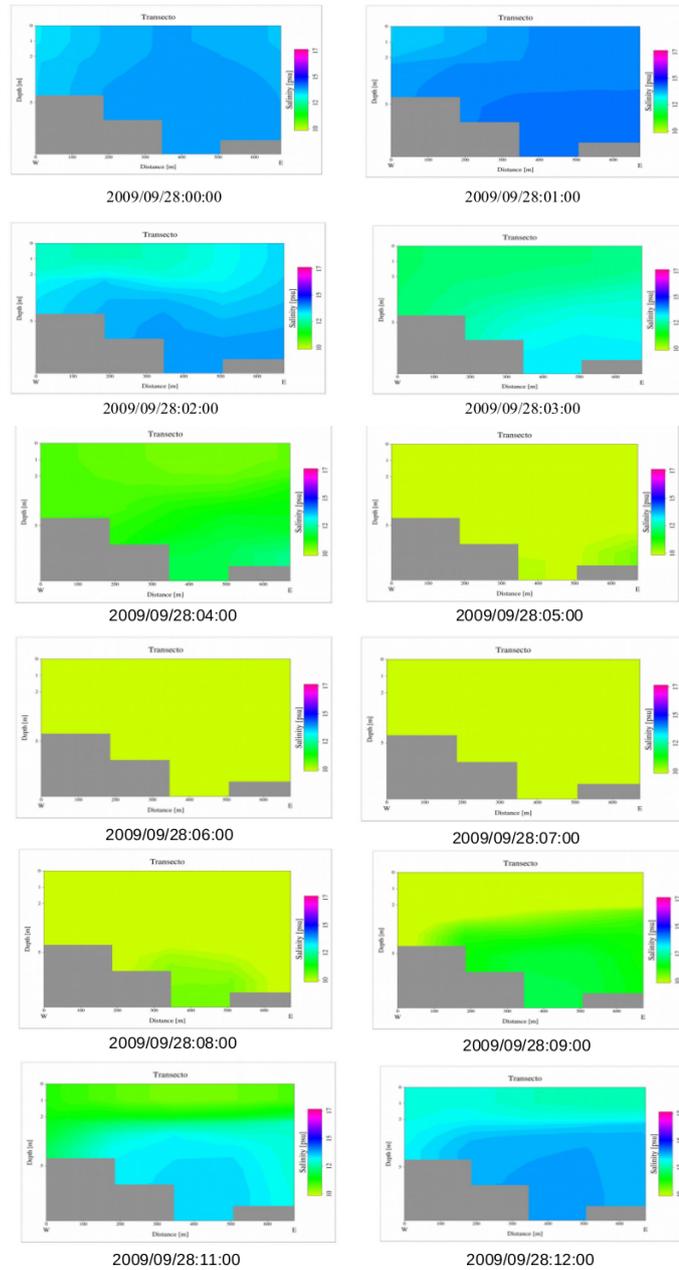
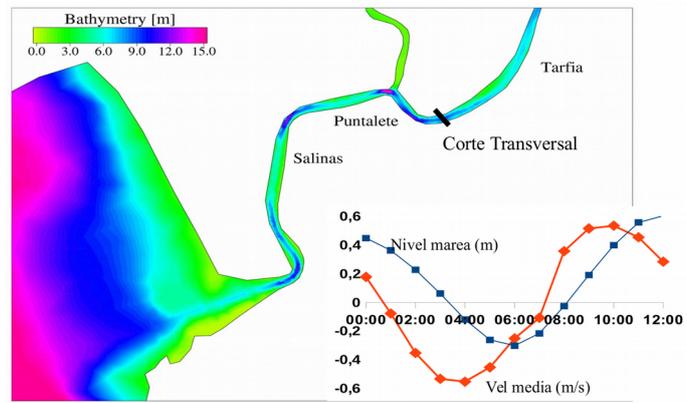


Figura 4.3.8 El panel superior presenta la batimetría de la zona y en su margen inferior derecho la altura de marea y la velocidad media en el corte durante la madrugada del 28 de Septiembre de 2009. Los doce paneles presentan cortes transversales de salinidad en Tarfia.

Anomalia salinidad 2009_09_28

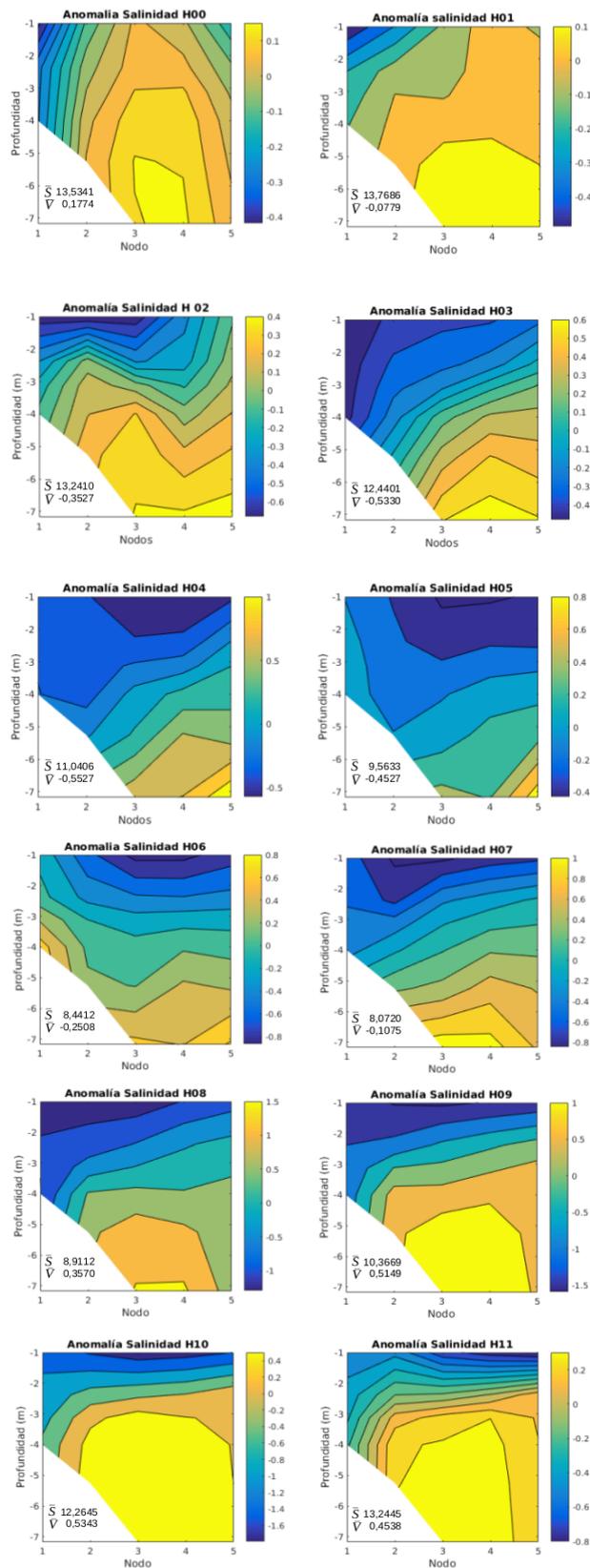


Figura 4.3.9 Anomalia de la salinidad (eliminando un valor medio sobre toda el corte, \bar{S}) de los cortes transversales presentados en la Figura 4.3.d. Esta anomalía permite destacar la evolución de la estratificación. En cada panel se incluye el valor medio de la velocidad \bar{V} , positivo hacia Sevilla y negativo hacia la desembocadura. La escala de color cambia de unos paneles a otros.

5. MODELO DE SEDIMENTOS.

La necesidad de garantizar el tráfico marítimo y la seguridad en la navegación desde el Puerto de Sevilla hasta su desembocadura exige la ejecución de campañas periódicas de mantenimiento de calados en la canal de navegación del estuario del Guadalquivir como se ilustra en la Figura 5.a.

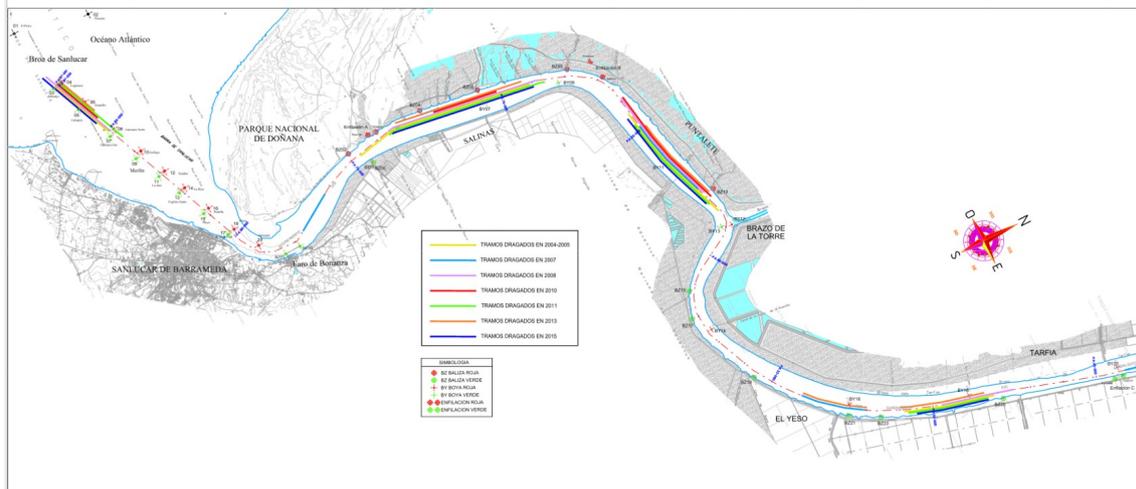


Figura 5.a. Mapa de la desembocadura del estuario con los tramos dragados en cada una de las campañas. El código de color indica la campaña y la longitud de la línea de color da cuenta de la extensión sobre la que se realizan los dragados de mantenimiento. Se destacan trabajos sistemáticos en Broa, Salinas, Puntalete y por encima del Yeso. Existe otra zona cercana a la Esclusa, por encima de la corta de la Isleta, en donde sistemáticamente se necesita dragar para mantener la rasante, que la APS tiene aprobada, en valores aceptable.

El modelo SHYFEM se ha aplicado en estudios de dinámica de sedimentos en zonas y lagunas costeras en diversas partes del mundo. Para el problema de los sedimentos en el estuario, en el presente estudio, se han probado dos posibles soluciones:

- ✓ la primera, la más sencilla, consiste en ir modificando la batimetría en las zonas sujetas tanto a dragados como a la evolución natural del lecho del estuario, esto es, se analizan los efectos producidos por estos movimientos de material de unas zonas a otras. Técnicamente, el trabajo es muy similar al realizado con las llanuras inundables; por el momento se tiene preparada la herramienta que permite confeccionar la batimetría, con la que alimentar el modelo, para una

fecha concreta¹³. Algunas pruebas realizadas sugieren que la propagación de la marea no cambia sustancialmente, como se indica en la sección 3.2c.

- ✓ la segunda, consiste en adoptar un modelo completo de sedimentos, esto es, se adopta un enfoque más fundamental del proceso de erosión, transporte y sedimentación. Como se recogía en las tareas del convenio y se ha comunicado en los informes previos, en esta fase final de proyecto se inicia la puesta a punto y el desarrollo del modelo de sedimentos. Los resultados presentados son preliminares y únicamente pretenden ilustrar el grado de desarrollo del mismo.

El modelo de sedimentos utiliza una versión del modelo barotrópico e incorpora información aportada por la APS (estudios de granulometría y diferentes datos ligados a los dragados de mantenimiento, como los que se muestra en la Figura 5a) y por el grupo de la Universidad de Huelva. De una forma simple se podría dividir el estuario en dos zonas diferenciadas, una dominada por sedimentos arenosos y otra de sedimentos más finos. En esta prueba se ha modelado una semana probando un suelo uniforme con diferentes diámetros de grano del sedimento: arenas finas (0.2 mm) y finos (0.063mm).

La Figura 5b muestra resultados preliminares de zonas erosión/sedimentación para un fondo inicial cubierto por finos al finalizar el periodo simulado. Se ha elegido la parte inicial del estuario por tener zonas bien diferenciadas, con una intensa actividad de dragado y por mover los mayores volúmenes de agua en cada ciclo de marea. Básicamente el modelo remarca las zonas donde el flujo acelera o ralentiza debido a cambios en el área transversal que dicho flujo experimenta cuando progresa aguas arriba o aguas abajo del estuario¹⁴.

Cualitativamente, los resultados preliminares definen las zonas en donde la sedimentación es un problema recurrente para la navegación (zonas dragadas con mayor frecuencia en la Figura 5a); algo similar se obtiene para el tramo próximo a la Esclusa (no mostrado). También, comparando con el *estudio de caracterización de sedimentos de la ria del Guadalquivir (Febrero 2018)*, las zonas con un suelo de finos coincide con las zonas predichas por el modelo donde ocurre una mayor sedimentación (las partículas finas se depositarían sobre el fondo existente cuando la velocidad del flujo decrece); las zonas con un suelo más grueso o de tipo gravas/roca coincide con las zonas en donde el modelo da más erosión (la velocidad de la corriente por encima de un umbral suspende los finos, no así los elementos más gruesos que quedarían en el mismo lugar).

13 En el estuario se dispone de una base de datos con batimetrías levantadas en diferentes zonas antes y después de los trabajos de mantenimiento de la cota mínima. Caso de que en una zona se tengan dos o más valores del fondo, se selecciona que valores a incluir en la batimetría del modelo utilizando como criterio la proximidad temporal con la fecha de interés. La dificultad principal de este enfoque, obtención de esta herramienta y la sistematización de las tareas que dan lugar a la base del modelo (contorno+batimetría), está resuelto.

14 Simplificando, los procesos de erosión, transporte y sedimentación son proporcionales al cubo de la velocidad de la corriente, v^3 .

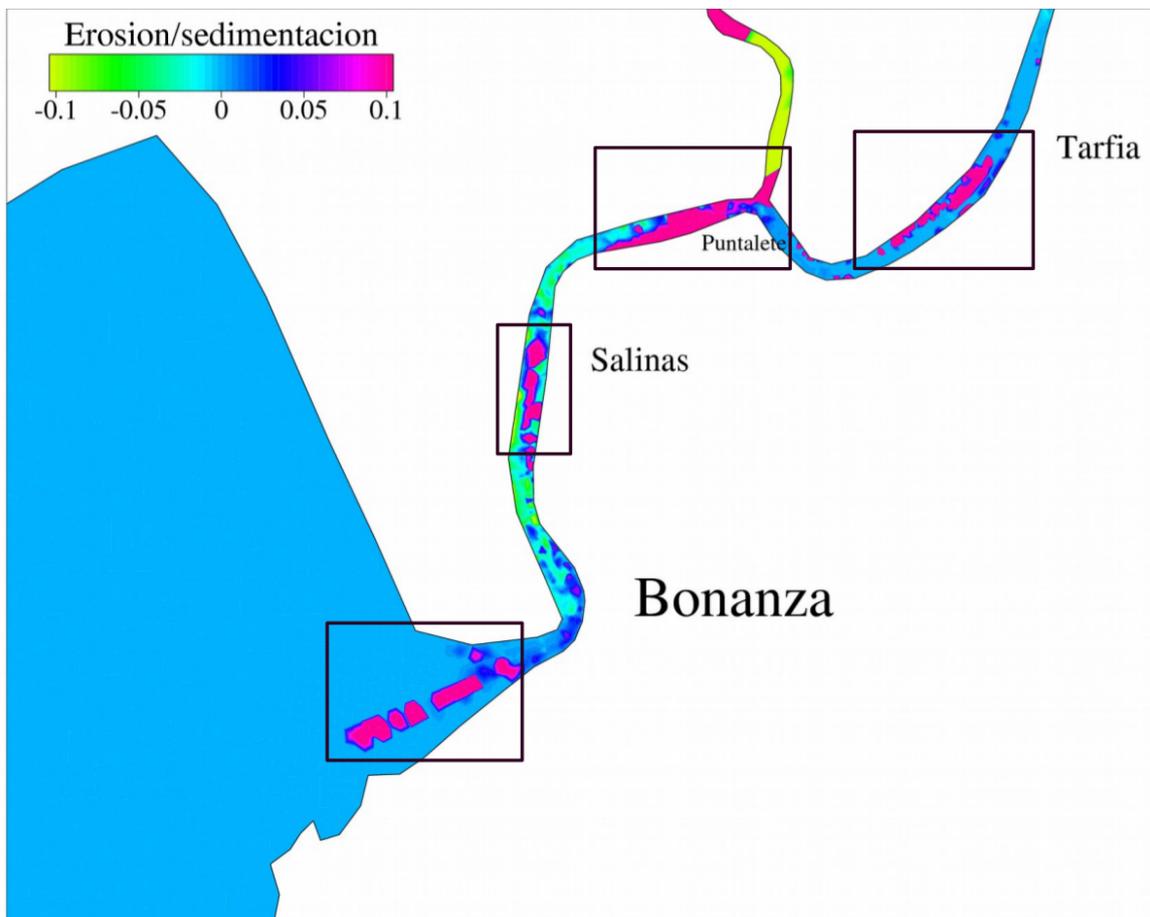


Figura 5.b. Mapa preliminar de áreas de sedimentación (color magenta, cuadros) y de erosión (color verde) de sedimentos finos. Se puede apreciar una similitud con las zonas dragadas para el mantenimiento del canal de navegación. Las zonas de erosión coinciden con las zonas de gravas/rocas. Las tasas de sedimentación y erosión están en unidades arbitrarias y no se indican expresamente en la escala de color porque no se quiere cuantificar el proceso (tarea pendiente para futuras colaboraciones). Se quiere insistir en que se trata de unos resultados muy preliminares.

La validación presentada respalda los primeros pasos del modelo de sedimentos pero es sólo una primera tentativa. Por tanto no es recomendable elaborar más las conclusiones sobre estos primeros ejercicios aunque sí extraer una hoja de ruta a seguir. La malla a utilizar para discretizar las ecuaciones, posiblemente, requiere una mayor resolución o al menos una resolución adaptada a la localización y tamaño de las zonas de erosión/sedimentación (ver en la Figura 5b las discontinuidades en la zona de salinas). Se precisa información de calidad sobre la granulometría y sus características físico-químicas y datos sobre sólidos en suspensión en la columna de fluido así como disponer de un mapa inicial fidedigno de la distribución granulométrica en todo el estuario. También deben probarse diferentes esquemas y métodos matemáticos de erosión-transporte-sedimentación y validar los resultados producidos por cada uno de ellos para seleccionar el óptimo. En definitiva existe una importante labor de calibrado y validado de las salidas de este nuevo modelo de sedimentación por delante, que se realizarían en

el futuro próximo en el marco de la extensión prevista del presente proyecto de investigación. En esa nueva fase se requerirá una colaboración más estrecha con el grupo de investigación de dinámica litoral de la Universidad de Huelva (UH) implicado en la caracterización geológica del estuario.

Los primeros resultados muy preliminares del modelo de sedimentos muestra su potencial para diferenciar y delimitar zonas de erosión y sedimentación, como se desprende de la comparación con las zonas de dragados rutinarios llevados a cabo por la APS. Por otro lado, las zonas de erosión y sedimentación predichas se correlacionan con el tamaño de partícula principal en las muestras de sedimentos, localizándose el sedimento fino en las zonas donde el modelo da sedimentación importante y sedimentos de mayor tamaño (gravas, rocas y arenas más gruesas) en las zonas de mayor erosión.

6. ESTADO ACTUAL, DEFICIENCIAS Y MEJORAS

El estado actual de los modelos se describe en la tabla 6.1. La recopilación de la información sobre los diferentes ámbitos implicados en la elaboración del proyecto, las capacidades computacionales necesarias y los diferentes aspectos relacionados con la generación de la malla (se utilizan dos mallas de diferente resolución), la manipulación de la batimetría (los continuos dragados de mantenimiento ha obligado a definir una estrategia para adaptar el dominio a la realidad en la que la batimetría depende del tiempo) y los forzamientos de contorno (datos para el forzamiento meteorológico que completan al modelo únicamente forzado por mareas) son tareas concluidas satisfactoriamente. Las tareas de calibración-validación están completadas para el modelo barotrópico y en fase avanzada para el modelo baroclino, aunque están pendientes de la disponibilidad de datos que deben ser recopilados para su conclusión. Debe decirse que, tras los numerosos ejercicios de calibración/validación realizados a lo largo del proyecto para los dos modelos, la parte técnica de la tarea está muy automatizada y suficientemente probada: cualquier actualización y/o mejora del modelo que pueda requerirse tras observar discrepancias en la comparación de sus salidas con observaciones de confianza es rutinaria y su implementación es rápida.

Estado actual Modelo SHYFEM	Estado inicial	Estado intermedio	Estado avanzado	Concluido satisfactorimente
Capacidades computacionales			X	
Generación de malla y batimetría				X
Forzamientos de contorno				X
Calibración-Validación				X
Descargas				X
Forzamiento meteorológico				X

Tabla 6.1 . Estado de desarrollo del modelo hidrodinámico (barotrópico y baroclino).

El modelo barotrópico, de baja y alta resolución, está ajustado para representar todas las observaciones actuales de la mejor forma posible. En el momento en que se escribe estas conclusiones, la ejecución resulta muy satisfactoria a la hora de reproducir la evolución de la onda de marea en el estuario entre Bonanza y Sevilla y por tanto se cubren las necesidades básicas del modelo como apoyo a la navegación. También se ha utilizado como base para diferentes aplicaciones.

El modelo baroclino implementado en una malla de alta resolución resulta poco operativo por su alto coste computacional (al menos por el momento, estamos

realizando pruebas en el superordenador Picasso); no así el modelo implementado en una malla de resolución más moderada. Se ha trabajado para tener calibrado y validado este modelo a la finalización del presente convenio pero, como se ha mencionado repetidamente, no ha sido posible calibrarlo adecuadamente debido a la falta de observaciones de calidad contrastada, por lo que su operatividad está en cuarentena. Esperamos los futuros trabajos de campo que proporcionen esos datos de calidad para validar definitivamente el modelo, el cual será la base de muchos de los trabajos de investigación iniciados por otros grupos de trabajo.

Consideramos por tanto, que los trabajos realizados hasta este momento cumplen con los planteamientos y objetivos del convenio de colaboración. El seguimiento de los trabajos desarrollados y la presentación de resultados se ha realizado regularmente a través de la Comisión de Seguimiento y quedamos a la disposición de dicha Comisión para la ampliación de los detalles que no queden suficientemente explicados en el presente informe.

A modo de epílogo, comentar unos logros experimentales importante acaecidos a lo largo del desarrollo del proyecto. En primer lugar, se debe mencionar la obtención de una buena batimetría de la parte alta del estuario (desde la Esclusa hasta la Presa de Alcalá del Río), que no existía al ser zona no navegable desde el punto de vista comercial. Es un hito relevante. En segundo lugar, y más importante desde el punto de vista de nuestro trabajo, ha sido la disponibilidad de observaciones de calidad del nivel de la superficie libre del río recogidas por los numerosos mareógrafos desplegados en el Estuario por el Instituto Hidrográfico de la Marina, las cuales han sido de extrema utilidad en las fases de calibración del modelo. Se quiere dejar constancia de nuestro agradecimiento a esta Institución por facilitar esa información.

ANEXO A: OSCILACIONES (MAREALES) DEL NIVEL DEL RÍO CON RESPECTO AL CERO DE ALICANTE.

El principal objetivo del presente proyecto en el que se enmarca estas notas aclaratorias, es la elaboración de un modelo hidrodinámico tridimensional que permita conocer el espesor cambiante de la lámina de agua a lo largo del estuario del Guadalquivir debido a la marea y otros fenómenos de menor importancia. Dicho conocimiento tiene incidencia directa sobre la navegación en el estuario, puesto que permite visualizar/anticipar las restricciones que el fondo en diferentes tramos del estuario impone sobre el calado de los buques que navegan desde SanLúcar a Sevilla y viceversa.

La descripción de la evolución de esta lámina de agua requiere de una referencia tomada sobre el eje vertical. El resto del documento pretende motivar y clarificar esta referencia tanto por la incidencia que tiene sobre las propias salidas del modelo así como por la manipulación de las mismas para la obtención instantánea del fondo en cada uno de los puntos del estuario.

A.1.- Sobre los “ceros” de los mareógrafos (Bonanza-Sevilla)

Las observaciones de la superficie libre provienen de diferentes mareógrafos ubicados a lo largo del estuario. De ellos ya se ha hablado con detalle en informes anteriores; destacaremos los que mantienen la Autoridad Portuaria de Sevilla (en adelante APS) y Puertos del Estado (en adelante PE) en la Esclusa y Bonanza. Estos mareógrafos proporcionan una serie temporal larga, continua y una referencia en la vertical que permite relacionar las observaciones entre las localizaciones.

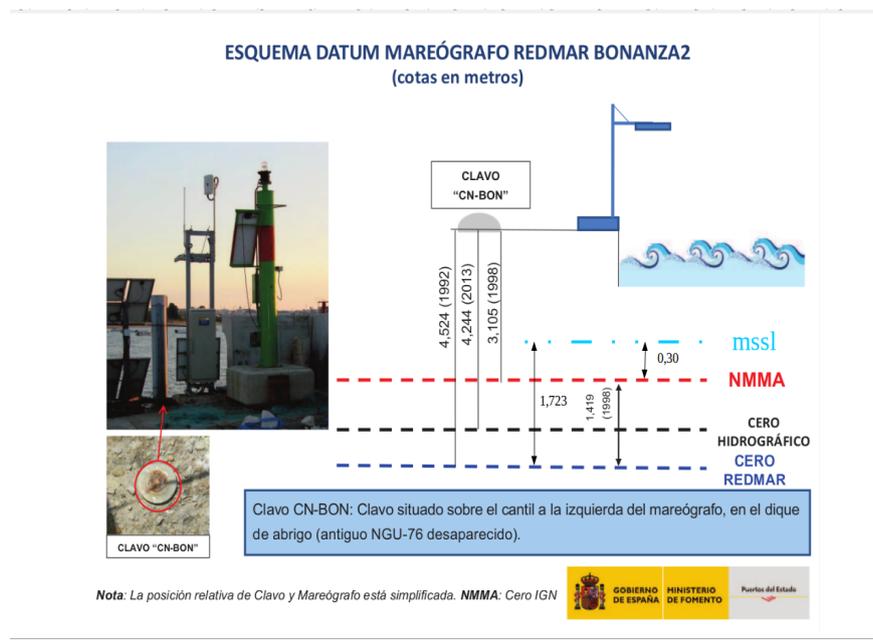


Figura 1.- Esquema del Datum de los mareógrafos de Bonanza.

Existen diferentes definiciones para ubicar la posición de la superficie libre en la vertical¹⁵: Nivel medio del mar en Alicante (NMMA), cero hidrográfico, cero del puerto y cero de la REDMAR que normalmente coincide con la anterior (ver documento de Puertos del Estado *Definiciones*). Como origen en la vertical se tomará el NMMA.

El esquema del Datum en Bonanza (ver Figura 1 o documento Esquema del Datum) establece que para obtener la posición de la superficie libre media (en adelante mssl, del inglés **m**ean **s**ea **s**urface **l**evel) en esta localización se necesita sustraer 1.419 m (distancia cero REDMAR a NMMA, ver Figura 1) al valor registrado por el mareógrafo. Si esta operación se realiza sobre el valor medio de los niveles registrados, 1.7231 m (valor medio del nivel del mar referido al cero REDMAR en Bonanza deducido de 24 años de datos), se obtiene que mssl se encuentra 0.3041 m (~30 cm) por encima del NMMA. El esquema del Datum en Sevilla, Esclusa, (ver Figura 2 o documento Esquema del Datum) carece de esta información de nivelación del clavo respecto al NMMA; recientemente se nos ha facilitado el informe realizado el pasado año en el que se referencia la ubicación de dicho clavo (ver A-6), que deja al cero de

15 El Instituto Geográfico Nacional (IGN) establece el origen de altitudes en tierra o cero geodésico. En la Península Ibérica se utiliza el Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA) obtenido a partir de datos de nivel del mar en este puerto, durante la década 1870-1880 (por esta razón, el mareógrafo de Alicante fue el primer mareógrafo español instalado con carácter permanente, y por tanto la serie de datos de nivel del mar más larga de nuestro país). Al Cero Geodésico se refieren las altitudes ortométricas de las señales o clavos geodésicos distribuidos por la geografía española. Constituye la única referencia nacional terrestre. Al llegar a la línea de costa aparecen nuevos ceros, ya dentro del agua, que describimos a continuación.

REDMAR 0.01 m por debajo del NMMA. Tomando el valor medio de los niveles registrados en la Esclusa (últimos 5 años de datos), se obtiene que mssl en la Esclusa se encuentra 0.6495 m por encima de REDMAR, esto es, el mssl queda 0.6395 m (~64 cm) por encima del NMMA.

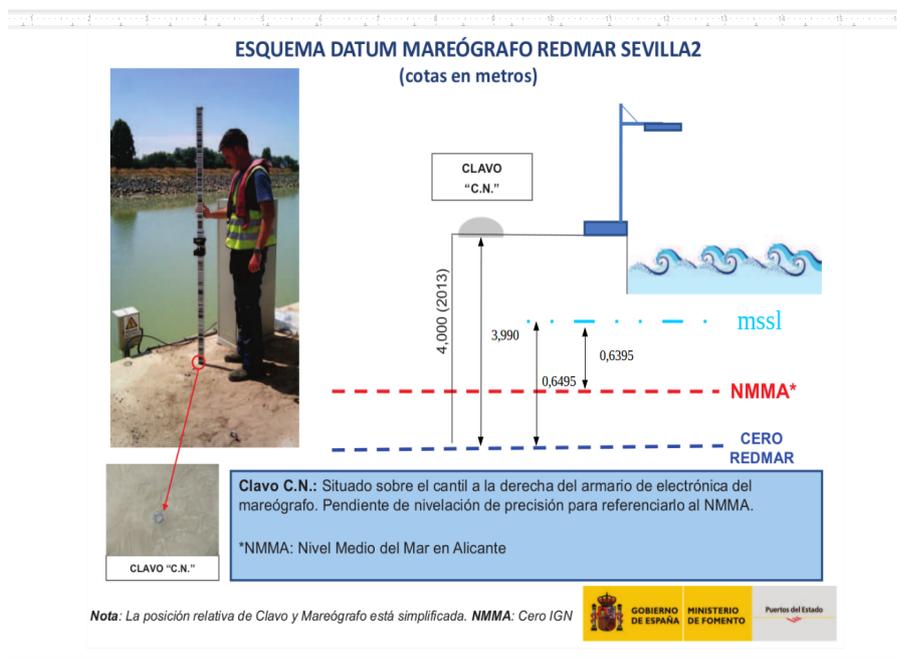


Figura 2.- Esquema del Datum de los mareógrafos de Sevilla. Se incluye la distancia entre el clavo C.N. y el NMMA, 3,990, que proporciona el documento técnico del anexo 1.

Por tanto vemos como, **en la entrada al estuario (Bonanza), el mssl se encuentra 30 cm por encima del NMMA (origen seleccionado)**. El mssl aumenta desde la desembocadura hasta la presa de Alcalá. En concreto, en la Esclusa el mssl es 64 cm por encima del NMMA, es decir, **en la Esclusa, el mssl respecto a Bonanza alcanza los 34 cm**.

El origen de este desnivel puede ser diverso. La dinámica mareal es capaz de explicar un desnivel de unos 15 cm entre Bonanza y la Esclusa, según el modelo barotrópico, a los que se podrían añadir 4 o tal vez 5 cm debido a que las aguas en Bonanza son más densas (más salinas) que en la Esclusa, tal y como también predice las primeras versiones del modelo baroclino del estuario.

	Inicio (km)	Fin (km)	Diferencia NMMA-Cero IHM
(ESCLUSA)	0	8,056	0,571
	8,056	18,006	0,57
	18,006	28,606	0,6
	28,606	37,806	0,71
	37,806	42,405	0,83
	42,405	48,856	0,89
	48,856	61,956	0,95
	61,956	68,906	1,08
	68,906	85,406	1,17
(BROA)	85,406	87,548	1,54

Tabla 1.- Diferencia NMMA y cero hidrográfico de estudio previo realizado por tramos.

Existe otra referencia entre la posición de la superficie libre a lo largo del estuario y el NMMA que proporcionó la APS hace algún tiempo. Se trata de una versión a la tabla presentada en la página 5 del documento “Tabla de mareas” del presente año. En ella se establece diferencias entre NMMA y el cero hidrográfico¹⁶ en diferentes tramos.

En Bonanza, los valores la tabla 1 indican que el NMMA está 1.17 m por encima del cero hidrográfico, en concordancia con los 1.139 m del esquema de la Figura 1; en otras palabras la diferencia entre el mssl y el NMMA es prácticamente el valor indicado anteriormente (0.26 m). En Sevilla, los valores de la tabla 1 indican que el NMMA está 0.571 m por encima del cero hidrográfico; en la Figura 2 no se da este valor. Utilizando la serie del mareógrafo de la Esclusa podemos ver que el mssl en la Esclusa está 1.3707 m por encima del cero hidrográfico, si sustraemos los 0.571 m encontramos la diferencia entre el mssl y el NMMA (0.7997 m). La estimación en la Esclusa de la diferencia mssl y NMMA dejaría un valor mayor que le presentado anteriormente, con una incertidumbre también mayor. El desnivel Esclusa-Bonanza aumentaría hasta los 0.5397 m.

Estos valores tan discrepantes del desnivel Esclusa-Bonanza son difíciles de conciliar por lo que debe optarse por uno de ellos. Por el momento adoptaremos el primer

¹⁶ El Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) tiene entre una de sus misiones el establecimiento de la referencia vertical de la cartografía náutica. Esta referencia se denomina cero hidrográfico y se utiliza tanto en la publicación del Anuario de Mareas y como en la elaboración de las cartas náuticas. Este cero coincide aproximadamente con el nivel de agua más bajo y varía con las características de la marea a lo largo de la costa. La Organización Hidrográfica Internacional (OHI) recomienda en su resolución 3/1919 el uso del LAT (Lowest Astronomical Tide) como referencia vertical de la cartografía náutica en zonas con apreciable rango de mareas (mayor de 30 centímetros). Se define el LAT como la menor bajamar que puede ser predicha en condiciones meteorológicas medias y bajo cualquier combinación de condiciones astronómicas.

desnivel, 34 cm, mas pequeñas correcciones (ver más adelante) para incorporar en la salidas que proporciona el modelo: físicamente este desnivel es más razonable y las observaciones experimentales más justificadas por el procedimiento más riguroso seguido en la nivelación (basado en los clavos de la red de nivelación). La segunda opción además de no resultar coherente con los resultados del modelo, parece menos sustentada científicamente. En cualquier caso se podría incorporar vía corrección en las salidas del modelo de llegar a la conclusión en un futuro de que esos desniveles sean convincentes científicamente hablando.

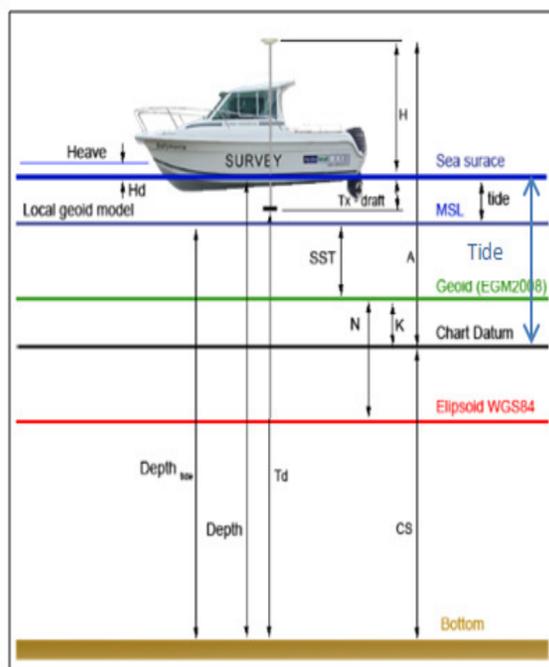
A.2.- Sobre la batimetría (referida al 0 de Alicante)

En el proceso de modelado de la onda de marea (modelo hidrodinámico del estuario) es necesario el conocimiento del espesor de la lámina de agua en cada uno de los puntos del dominio. Para ello, la APS nos ha facilitado la batimetría del canal de navegación entre la desembocadura (Broa) y la Esclusa (entrada al Puerto) que completamos con otra información disponible en la zona de plataforma y del tramo alto del estuario (mas información en el primer informe). La batimetría del canal de navegación viene referida al NMMA, que como se ha visto no proporciona el mssl, por tanto, resulta necesario introducir una corrección en dicha batimetría con objeto de que represente el espesor de la lámina de agua. De no hacerlo se modelaría un estuario más somero que, entre otras consecuencias, dificultaría la progresión de la onda de marea (amplitudes menores, retraso en la llegada de la pleamar, ...). El factor de corrección que se introduce es un término constante en todo el estuario de 30 cm, discrepancia observada en Bonanza entre el mssl y el NMMA. La discrepancia aguas arribas, como veremos, se soluciona parcialmente con la propia dinámica en el estuario; la parte del desnivel no corregida por la marea se soluciona mediante un término residual que por simplificar tomaremos lineal.

$$\Delta_{mssl-NMMA}(x) = \Delta_{mssl-NMMA}(Bonanza) + \Delta_{Residual_{mssl-NMMA}}(x) = 0.3 + a \times d_{Bonanza}(km)$$

[1]

donde a es una constante cuyo valor numérico se comenta más adelante.



$$\text{Depth}_{\text{DATUM}} = \text{Depth} - \text{tide}$$

$$\text{Depth} = T_d + \text{Draft}$$

$$\text{Tide} = Z_{\text{GPS}} - H$$

Figura 3.- Esquema del proceso de levantamiento hidrográfico realizado por Tecnoambiente.

Como se ha podido comprobar en el informe técnico que acompaña a uno de los levantamientos hidrográficos realizados por Tecnoambiente,

“es necesario conocer la altura de la marea mientras se realiza la adquisición de datos, puesto que las sondas obtenidas deben referirse a una referencia vertical fija. La altimetría de este trabajo se ha referido al Nivel Medio del Mar de Alicante. Para la obtención del registro de mareas, se han empleado los datos registrados por el GPS RTK ROVER que aplicaba directamente la variación de altura durante la adquisición de datos, y que está referido al Nivel medio del Mar de Alicante según la calibración. El GPS RTK que proporciona la posición a precisión subcentimétrica, también mide la altura del GPS Rover y por tanto, la variación paulatina de la marea el programa de hidrografía integra y corrige los datos batimétricos con el registro de mareas, con el fin de obtener todos los datos de profundidad bajo una misma referencia vertical fija”.

Una mejora futura al proceso de corrección mencionado sería tener acceso a los datos brutos con objeto de inferir la posición del mssl de forma iterativa como pasamos a describir:

- 1) Se parte de los datos brutos del espesor de la lámina de agua en un instante dado (“Depth” en el esquema de la Figura 3). Básicamente la profundidad que marca la sonda corregida su posición desde la superficie libre.
- 2) Se utiliza las salidas del modelo con la mejor batimetría disponible para conocer la contribución de la señal de marea en ese instante al mssl.
- 3) Se calcula el espesor de la lámina de agua media sustrayendo al espesor instantáneo de la lámina de agua (calculado en el punto 1) el espesor ocasionado por la marea (calculado en el punto 2).
- 4) Se modela la propagación de la señal de marea con este espesor y se vuelve a iterar desde el punto 2).

La convergencia de este bucle 2)-4) se espera en muy pocas repeticiones. Hasta el momento esto no ha sido posible puesto que Tecnoambiente descarta los datos brutos pasado un tiempo y únicamente guarda los datos finales elaborados que eliminan la señal de marea y proporcionan las medidas respecto al NMMA.

A.3.- Resultados

Actualmente se tienen dos modelos operativos, uno barotrópico (masas de agua homogénea) y otro baroclino (masas de agua con diferentes propiedades), cada uno de ellos con dos resoluciones (uno de baja resolución y otro de alta resolución). Con la incorporación de nuevas observaciones de la red de mareógrafos del Instituto hidrográfico de la Marina (IHM) podemos hablar de un modelo barotrópico finalizado. En la Figura 4 se representa una comparativa de las diferentes constituyentes de marea (M2, S2, M4 y K1) en las diferentes ubicaciones con las salidas del modelo barotrópico de baja resolución con la nueva calibración. En las misma, se puede observar como tanto las amplitudes como las fases son reproducidas muy bien por el modelo (línea continua). Las discrepancias no superan los 3-4 cm en amplitud o los 5-10° (unos 10-20 minutos de desfase para la señal semidiurna) en fase.

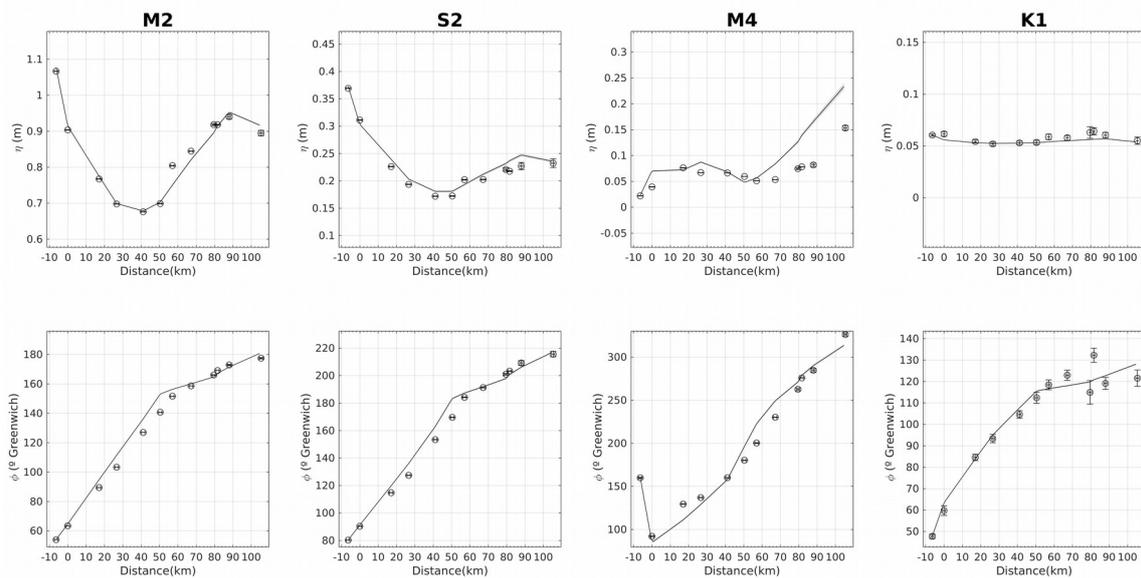


Figura 4.- Comparación entre las salidas del modelo barotrópico de baja resolución con la nueva recalibrando (línea continua) y las nuevas observaciones de los mareógrafos (puntos con las barras de incertidumbre) del IHM, además de las observaciones de PE y de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG).

En la nueva configuración del modelo barotrópico, el nivel medio a lo largo del estuario queda como muestra la Figura 5 (línea azul), básicamente por la deformación que experimenta la señal de marea a lo largo del estuario. En ella se aprecia cómo el forzamiento desde la zona de plataforma deja un desnivel en el estuario entre Bonanza y la Esclusa de 16 cm. Por tanto, la propia dinámica del modelo permite explicar la mitad del desnivel comentado en el epígrafe 1.

Actualmente se está trabajando en el modelo baroclino, y en una primera fase se están recopilando observaciones de temperatura y salinidad disponibles en distintos lugares. Por el momento, éstas resultan escasas y dispersas, de ahí que no se tenga el modelo más refinado, aunque ya es capaz de reproducir características básicas. La línea roja de la Figura 5, presenta el mssl del modelo baroclino, que aumenta ligeramente en unos 4 cm respecto a la versión barotrópica. Aunque el modelo baroclino es provisional, no esperamos que los cambios a realizar en la configuración afecten significativamente en el desnivel presentado.

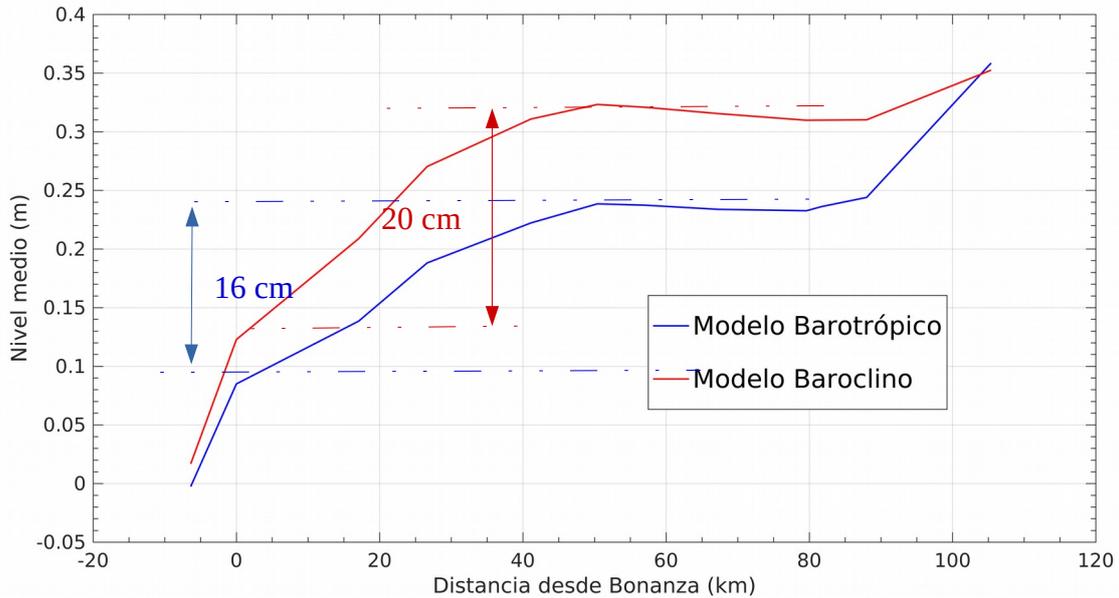


Figura 5.- Nivel medio de la superficie libre (mssl) a lo largo del estuario para el modelo barotrópico (línea azul) y para el modelo baroclino (línea roja). El desnivel entre Esclusa y Bonanza predicho por el modelo barotrópico es de 16 cm, en tanto que el modelo baroclino es de 19 cm.

Por tanto, con referencia al desnivel admitido de 34 cm entre la Esclusa y Bonanza quedan 18 cm/14 cm sin predecir (según el modelo barotrópico/baroclino) que serán corregidos “manualmente”. Para el resto de localizaciones del estuario y a falta de otra información, lo razonable es asumir una corrección lineal que cambie gradualmente de 0 cm en Bonanza a 18 cm/14 cm en la Esclusa, es decir, en la expresión [1] se tomará $a_{\text{barotrópico}} = 0.18 \text{ cm}/80 \text{ km}$ y $a_{\text{baroclino}} = 0.14 \text{ cm}/80 \text{ km}$ en según qué modelo.

A.4.- Salida que se envía a la Autoridad Portuaria de Sevilla

La descripción realizada aquí quiere dejar constancia del problema que se tiene a la hora de inferir el espesor de la lámina de agua de una batimetría referida al NMMA. Por otro lado, quiere definir un procedimiento para descomponer el espesor instantáneo de la lámina de agua en dos contribuciones, por un lado la batimetría que levanta la APS y que periódicamente debido a los trabajos de mantenimiento anda revisando, y las fluctuaciones de la superficie libre predichas por el modelo numérico del estuario

(forzamiento mareal, condiciones meteorológicas, descargas de agua dulce ...). Esto permite recuperar el espesor de la columna de agua en cualquier posición y en cualquier instante de tiempo sumando dos contribuciones:

$$Z_{APS}(t, x) = \text{Batimetría}_{NMMA}(x) + \eta_{\text{modelo}}(t, x) \quad [2]$$

donde

$$\eta_{\text{modelo Barotrópico}}(t, x) \equiv \Delta_{NMSL-NMMA}(x) + \zeta_{\text{modelo}}(t, x) = 0.3 + 0.18/80 \times d_{\text{Bonanza}}(km) + \zeta_{\text{modelo}}(t, x) \quad [3]$$

$$\eta_{\text{modelo Baroclino}}(t, x) \equiv \dots = 0.3 + 0.14/80 \times d_{\text{Bonanza}}(km) + \zeta_{\text{modelo}}(t, x) \quad [4]$$

El primer término de [2] es actualizado periódicamente por la APS, en tanto que el segundo término de [2] procede de las salidas del modelo, y tiene valor diferente según el modelo empleado ([3] ó [4]). Como se ha visto en los test de sensibilidad del modelo frente a las variaciones del fondo (ver segundo informe del presente proyecto), este segundo término depende del espesor de la lámina de agua. Por tanto, el conocimiento de la ubicación del mssl respecto al NMMA, como se ha indicado con detalle en el epígrafe 2, introduce una mejora en la predicción de la propagación de la onda de marea en el estuario.

En resumen, la batimetría y las fluctuaciones de la superficie libre vienen referidas al NMMA. Con objeto de determinar **el espesor de la lámina de agua hay que sumar los dos términos.**

Las fluctuaciones de la superficie libre proporcionadas con este documento constan de:

- Las salidas referidas a la posición media de la superficie libre del modelo.
- 30 cm adicionales en todo el estuario por la diferencia en Bonanza entre el mssl y el NMMA.
- Correcciones por desnivel no explicado por el modelo (ecuación [1]) que se plasman en las [3] ó [4] según el modelo empleado.

Las tres contribuciones ya aparecen sumadas en las tablas anexas.

A.5.- Bibliografía

Definiciones.- REDMAR: Red de mareógrafos de Puertos del Estado. Area de Medio Físico. Puertos del Estado (http://portus.puertos.es/Portus_RT/?locale=es)

Esquema del Datum.- REDMAR: Red de mareógrafos de Puertos del Estado. Area de Medio Físico. Puertos del Estado (http://portus.puertos.es/Portus_RT/?locale=es)

Informe Anual 2015.- REDMAR: Red de mareógrafos de Puertos del Estado. Area de Medio Físico. Puertos del Estado (http://portus.puertos.es/Portus_RT/?locale=es)

Levantamientos batimétricos previos a la actuación de dragado de profundización de la canal de navegación de la vía navegable e 60-02 inscrita en el cauce del río Guadalquivir.- Informe técnico elaborado por Tecnoambiente (2013). Documento facilitado por la APS.

Nota técnica de nivelación del clavo de referencia del mareógrafo de la Esclusa. Documento facilitado por la APS y reproducido en el Apéndice 1.

Tabla de mareas en la eurovía del Guadalquivir E.60.02. Documentado descargado de la página de autoridad portuaria (http://portal.apsevilla.com/wps/portal/puerto_es/accesoMaritimo_es?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/APS/puertosevilla/logistica/acceso_maritimo/accesomaritimo_InformacionGeneral/contInformacionGeneral#aqui).

A. 6.- Nota técnica de nivelación del clavo de referencia del mareógrafo de la Esclusa

		ENCARGO: 17395 "A.T. SUPERVISIÓN Y CONTROL DE LAS OPERACIONES DE MANTENIMIENTO EN LA NUEVA ESCLUSA DEL PUERTO DE SEVILLA"				
		TÍTULO: NOTA TÉCNICA: NIVELACIÓN CLAVO MAREÓGRAFO PUERTOS DEL ESTADO - NOTA TÉCNICA -				
IT. nº	18892					
C.D.						
FECHA:	23/06/2016					
ADJUNTO:		Copias IDOM 1	1			

MEDIDAS TOPÓGRAFO

El pasado día 23 de junio de 2016 se procedió a la nivelación del clavo de referencia del mareógrafo de puertos del estado.

Para la obtención de las coordenadas se decidió orientar la estación total por el método de bisección con las bases B58 y B7, orientando la observación entre las mismas.

DENOMINACIÓN: B58
 COORDENADA X: 765368.244
 COORDENADA Y: 4134659.697
 COORDENADA Z: 8.864

DENOMINACIÓN: B7
 COORDENADA X: 765330.409
 COORDENADA Y: 4134706.700
 COORDENADA Z: 8.884

En las observaciones de los puntos de control se utilizó un equipo topográfico compuesto por una estación total de la marca LEYCA 1200 PLUS, con las siguientes características técnicas:

Características técnicas:

- 10cc
- 2mm+2ppm
- Medición CON MINI prisma LEICA

La cota que se ha obtenido en dicha nivelación es la siguiente:

3,990 sobre el cero de Alicante

ANEXO B: CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MODELADO (Y PRODUCTOS PRODUCIDOS)

A.- Modelo barotrópico

1. Como resultado de esta actividad y trabajo previo se ha concluido con la elaboración del dominio a modelar que incluye todas las sucesivas mejoras y refinamientos, que es considerado como el mejor de los posibles en ese equilibrio coste/resolución y que conforma la versión v.1 base de todos los sucesivos cálculos.
 2. Tras el nuevo ajuste de parámetros, el modelo predice las oscilaciones de la superficie libre a lo largo del estuario con una precisión de 8cm y 20 min de desfase respecto al instante de llegada de la pleamar/bajamar. Se estima que la calidad de predicción de corrientes debe ser similar a falta de contrastación definitiva con nuevos datos de calidad. Como conclusión se deja constancia de la disponibilidad de esta poderosa herramienta predictiva (Modelo barotrópico v.1) que pronostica el comportamiento mareal del estuario con una precisión de $\pm 8\text{cm}$ en la amplitud de la oscilación mareal (incertidumbre $< 4\%$) y de $\pm 20\text{min}$ en el momento de ocurrencia de la pleamar/bajamar.
 3. Como resultado final se dispone de un modelo barotrópico v.1a que reproduce el espesor de la lámina de agua con una precisión promedio estimada de 8 cm en cuanto a amplitud (RMSE) y de 20 minutos en cuanto a la ocurrencia de las pleamares que está ya siendo utilizada con éxito en la gestión de la navegación del estuario por la APS.
- ✓ *.- Tablas que dan la altura total de la superficie a intervalos de tiempo seleccionables, por defecto horarios, y que pueden suministrarse también como tablas de marea con horas y alturas de pleamar/bajamar). Actualmente, estas tablas han sido producidas para los años 2017 y 2018.*
 - ✓ *- Idem para corrientes de marea en el supuesto de una descarga media en la presa de Alcalá de 50 m³/s próximo al valor ecológico establecido por la CHG.*
 - ✓ *.- Espesor de la lámina de agua a intervalos de tiempo seleccionables (salida de la mejora v.1a del modelo), en formato similar al de la altura de la superficie libre indicado en 3.1.a.*

- ✓ - Programa interactivo de apoyo a la navegación (Figura 3.1.d.1) que calcula el espesor de la lámina de agua en cualquier instante y gestiona unos mínimos de seguridad que hacen saltar alertas si se sobrepasan. Necesita las tablas de marea producidas en 2.1.a.
- ✓ - Diseño y generación de un índice local que refleje la intensidad de la marea y que sustituya a los obsoletos "coeficientes de marea" rutinariamente empleados y cuya validez es discutible. Los nuevos coeficiente (dos valores diarios) se obtienen del rango de marea en Bonanza.

B.- Casos de estudio (aplicación modelo barotrópico)

B1.-Marea meteorológica

La marea meteorológica produce una perturbación que suma linealmente con la marea astronómica aumentando o disminuyendo el nivel a lo largo del estuario en la misma cantidad que se observa en el contorno oceánico y que no retrasa frente al forzamiento. Los rangos mareales también se ven modificados, aumentando (disminuyendo) ligeramente en situaciones de altas (bajas) presiones. La lámina de agua se ve pues afectada por ambos hechos: bajo altas presiones, se produce un descenso de nivel forzado meteorológicamente y un aumento de rango mareal que hace disminuir el espesor de la lámina alrededor de la bajamar en valores que deben ser contemplados y que restan margen de seguridad a la navegación. Las bajas presiones por el contrario aumentan el espesor y amplían ese margen.

B2.-Descargas de agua dulce

1. Las descargas tienden a disminuir la amplitud de la onda de marea y a retrasar su progresión, especialmente en la parte alta del estuario, mientras que el nivel medio aumenta hacia la cabecera del estuario. Ambos efectos combinados originan un aumento en todo instante del espesor de la lámina de agua. La velocidad mareal muestra un patrón similar al de oscilación aunque la reducción de amplitud y el retraso están más acentuados. La respuesta del estuario a una nueva situación de descarga se consigue en tiempos muy reducidos, inferiores a medio ciclo de marea.
2. Descargas grandes detienen la corriente de creciente dividiendo el estuario en dos zonas, una en la parte alta donde no invierte nunca la corriente, y la otra en la parte baja donde ocurren inversiones aunque sean de breve duración. La línea

divisoria entre ambas se desplaza aguas abajo con la descarga. Descargas altas tienen el potencial de arrastrar larvas residentes en zonas de puesta y alevinaje mar adentro, produciendo previsiblemente mortalidad. Por ejemplo, una descarga de 200 m³/s mantenida dos días es capaz de producir ese efecto. Descargas más intensas lo consiguen en tiempos del orden de un día o inferiores.

B3.- Llanos mareales

1. Los llanos mareales producen una disminución de la amplitud de la onda de marea que, para un perímetro de inundación dado, depende de la profundidad del mismo. Cuanto más profunda mayor la deformación, aunque para valores negativos (llanura inundada en situación media) alcanza un valor límite. En el caso ficticio estudiado, la oscilación mareal puede verse disminuida hasta en un 25% a la altura de la esclusa de Sevilla. Las corrientes mareales son mayores aguas abajo de la llanura y menores aguas arriba, en lógica con la retirada de un importante volumen de agua del cauce por la propia llanura.

B4.- Cambio climático

1. El estudio apunta a la conclusión de un aumento lineal de amplitud de la onda mareal cuanto mayor es el del nivel medio del mar, aumento que también es linealmente mayor cuanto más nos adentramos en el estuario. Puede resumirse en un coeficiente $C=0.002x$ (x distancia en km hasta la desembocadura) de aumento de amplitud mareal por cada cm de aumento de nivel medio del mar. El aumento de amplitud es inferior al del nivel medio mar inducido por el cambio climático (en proporción 1/6 aproximadamente) por lo que la lámina de agua se verá siempre aumentada (el comentario ha lugar ya que un aumento de amplitud implica no sólo pleamares más altas sino bajamares más bajas también). La ocurrencia de la pleamar se ve sólo muy ligeramente adelantada en pocos minutos en la mitad superior del estuario, las corrientes mareales son insensibles a estos cambios de nivel y la ocurrencia de los reparos mareales también se ven adelantados en tiempos similares a los de la pleamar.

B5.- Eventos extremos

1. El reanálisis del evento extremo acaecido en Noviembre de 2014 en el que coincidió una descarga importante debido a la pluviosidad y la llegada de una fuerte borrasca ha permitido valorar la influencia de cambios bruscos de condiciones de contorno en ambos extremos del estuario. El modelo barotrópico ha proporcionado una reconstrucción muy satisfactoria del evento, lo que permite aplicarlo para estudiar la importancia de cada agente forzante. El estudio separado de los efectos de cada uno de ellos permite concluir que el nivel residual del río (tras eliminar la marea) en la parte baja del estuario depende de cambios en el contorno oceánico que consisten básicamente en variaciones del nivel del mar meteorológicamente inducidas (la descarga influye menos), en

tanto que en la parte alta del estuario depende claramente del tamaño de la descarga.

C.- Modelo baroclino

1. Los primeros resultados muestran que el modelo baroclino da resultados coherentes con las observaciones disponibles y con la dinámica del Guadalquivir, especialmente la localización y evolución de los máximos gradientes de salinidad y su respuesta a descargas de agua dulce en la cabecera. Es importante constatar que este modelo requiere para poder finalizarlo de información experimental de calidad que permite su calibración; esto permitirá la predicción fina de diferentes parámetros de interés en el estuario.
2. Un resultado curioso es constatar que el modelo predice intrusiones más cortas (menor penetración) de la cuña salina en verano de lo que dicen las escasas observaciones de las que se dispone y lo que confirma el saber popular, que puede ser debido a extracciones no documentadas de agua dulce durante el periodo estival en la zona intermedia de los arrozales, las cuales no están prescritas en el modelo.
3. Por otro lado, está el aspecto técnico de los tiempos de ejecución. Los requisitos computacionales mínimos que permiten completar las simulaciones en tiempos razonables nos lleva a utilizar el supercomputador Picasso de la UMA; el código está compilado y el ejecutable listo pero por el momento se puede considerar este modelo de alta resolución espacial baroclino en fase de desarrollo. De otra parte, la realización de pruebas en la malla de alta resolución pone de manifiesto las limitaciones de los computadores personales para realizar las simulaciones y por tanto la portabilidad del modelo baroclino.

C.- Modelo de sedimentos

1. Los primeros resultados muestran que el modelo puede diferenciar zonas de erosión (valores negativos) y sedimentación (valores positivos) que coinciden con las zonas de dragados de mantenimiento rutinarios que la APS desarrollo con carácter anual. Se ha de decir que el modelo está en fase inicial de desarrollo y calibración, por lo que no es posible extraer conclusiones muy elaboradas ni definitivas.

ANEXO C: CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE MODELADO. HOJA RESUMEN.

GOFIMA¹⁷ ha modelado la dinámica del estuario del Guadalquivir usando dos modelos de complejidad física y computacional creciente. El primero, que modela un estuario homogéneo (modelo “barotrópico”), es adecuado para estudio de propagación de marea. El segundo incluye las diferencias de salinidad/temperatura (“baroclino”) y aborda cuestiones como la distribución de las masas de agua en el estuario (cuña salina, por ejemplo).

MODELO BAROTROPICO Y CASOS DE ESTUDIO ANALIZADOS

1. Modelo totalmente desarrollado, calibrado y validado con observaciones. Pronostica la marea con un error inferior a $\pm 8\text{cm}$ en la amplitud (en el peor de los casos, incertidumbre $<4\%$) y de $\pm 20\text{min}$ en el momento de ocurrencia de la pleamar/bajamar en cualquier punto del estuario. Ensamblado a la batimetría, predice los espesores de la lámina de agua con esa precisión.
2. La marea meteorológica generada en el océano abierto por el efecto de presión y viento se propaga en el estuario sin retraso frente al forzamiento sumando linealmente con la marea astronómica, aumentando o disminuyendo su nivel en la misma cantidad observada en el contorno oceánico.
3. Las descargas de agua en la presa de Alcalá disminuyen la amplitud de la onda mareal, retardan su progresión y aumentan el nivel medio, tanto más cuanto más cerca de la cabeza del estuario. Ambos efectos combinados resultan en un aumento del espesor de la lámina de agua.
4. En mareas muertas, descargas a partir de $100\text{m}^3/\text{s}$ detienen la corriente de creciente dividiendo el estuario en dos zonas, una alta donde no invierte la corriente, y otra baja donde sí lo hace. La línea divisoria entre ambas se mueve aguas abajo a medida que aumenta la descarga. Descargas altas mantenidas en el tiempo ventilan el estuario en tiempos de días (p.e., 2 días para $200\text{m}^3/\text{s}$, pocas horas para $600\text{m}^3/\text{s}$) arrastrando larvas residentes en zonas de puesta y alevinaje hacia mar adentro, produciendo previsible mortalidad.
5. En escenarios de aumento de nivel del mar asociado al cambio climático, el modelo indica un incremento lineal de amplitud de la marea tanto mayor cuanto más nos adentremos en el estuario. La fórmula $C=0.002x$ estima ese incremento (cm) en cada punto del estuario situado a x km de Bonanza por cada cm de aumento que experimente el nivel medio del mar.
6. El modelo reconstruye satisfactoriamente el comportamiento del estuario ante eventos extremos, como lo prueba el reanálisis del evento extremo acaecido en Noviembre de 2014 en el que coincidió una fuerte descarga debido a la alta pluviosidad y la llegada de una profunda borrasca atlántica (marea meteorológica).

MODELO BAROCLINO Y CASOS DE ESTUDIO ANALIZADOS

1. Modelo desarrollado pero pendiente de calibración y validación definitiva con observaciones recientes. Entendida como el lugar donde la salinidad disminuye más rápido, la cuña salina se sitúa a unos 30 km de la desembocadura, según el modelo. El valor de salinidad $S=5$ psu, otra medida de la cuña salina, se ubica a unos 35 km. Ambos son valores promedio para descargas normales, que fluctúan ± 6 km debido a la marea. La falta de calibración definitiva del modelo aconseja prudencia a la hora de manejar estos valores.

¹⁷ Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga



PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN DE LA NAVEGACIÓN EN LA EUROVÍA E.60.02 GUADALQUIVIR
WORKING WITH NATURE

***“Realización de estudios hidrodinámicos y ambientales
en el marco del proyecto de Optimización de la
Navegación en la Eurovía E.60.02 GUADALQUIVIR.
Periodo 2021-2023”***

*Contrato firmado entre la Autoridad Portuaria de Sevilla y el
Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga,
noviembre 2021*

INFORME Nº 1, NOVIEMBRE 2021
Grupo Oceanografía Física, Universidad de Málaga (GOFIMA)



**Funded by
the European Union**

DISCLAIMER: The contents of this publication are the sole responsibility of GOFIMA and do not necessarily reflect the opinion of the European Union.

ÍNDICE

PRÓLOGO	3
CAPÍTULO 1.- Introducción y antecedentes	4
CAPÍTULO 2.- Objetivos del presente estudio	5
2.1.-Realización de estudios científicos hidrodinámicos y ambientales específicos para dar soporte a la redacción del Proyecto de Optimización y su tramitación ambiental.....	5
2.1.1.- <i>Calibración-validación del modelo baroclino implementado en el estuario por GOFIMA...</i>	5
2.1.1.a.- Recolección de datos para la calibración	5
2.1.1.b.- Modelación del uso de agua con fines agrícolas.....	5
2.1.2.- <i>Cambio del modelo numérico en el estuario</i>	6
2.1.3.- <i>Casos de estudio</i>	6
2.1.3.a.- Comportamiento del tapón salino y del prisma mareal al realizar dragados de Mantenimiento	6
2.1.3.b.- Análisis del comportamiento de la dinámica mareal al llevar a cabo inundaciones de llanos mareales	7
2.1.3.c.- Dispersión de contaminantes en el estuario	7
2.1.4.- <i>Contribución a estudios de transporte de sedimentos</i>	7
2.2.- Colaboración en las campañas de difusión que periódicamente se llevarán a cabo desde la APS..	7
2.2.1. <i>Informes y material gráfico</i>	8
2.2.1.a.- Resumen divulgativo sobre los principales resultados de los trabajos y relación de estos resultados con los objetivos del Puerto de Sevilla	8
2.2.1.b.- Provisión de material gráfico y audiovisual	8
2.2.1.c.- Visitas de prensa y/o colectivos de interés.....	8
2.2.2. <i>Otras actividades</i>	8
2.2.2.a.- Participación en entrevistas y reportajes de medios generales.....	8
2.2.2.b.- Exposición sobre los estudios científicos del estuario del Guadalquivir	8
2.2.2.c.- Difusión de la investigación entre la comunidad científica.....	8
2.3.-Implementación modelo operacional en colaboración con Puertos del Estado	9
2.3.1.- <i>Identificación de los forzamientos necesarios y disponibles</i>	9
2.3.2.- <i>Diseño de los protocolos de acceso y difusión de los datos remotos</i>	10
2.3.3.- <i>Implementación del modo operacional</i>	10
2.3.4.- <i>Calibración/validación del modelo operacional</i>	11
2.3.5.- <i>Integración del modelo en las instalaciones de Puertos del Estado</i>	11
2.4.- Participación en el Comité Científico-Técnico del proyecto.....	11
CAPÍTULO 3.- Temporización	12
CAPÍTULO 4.- Entregables	14
Referencias	16

PRÓLOGO

El presente documento es el primero de los seis informes comprometidos en el contrato “Realización de estudios hidrodinámicos y ambientales en el marco del proyecto de Optimización de la Navegación en la Eurovía e.60.02 GUADALQUIVIR. Periodo 2021-2032”, firmado entre la Autoridad Portuaria de Sevilla (APS) y el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA). Su contenido coincide con el Plan de Trabajo de la *Memoria Técnica* y constituye el entregable número 1 que figura en la “Estipulación Segunda” del contrato firmado. Dicho contenido se ha organizado en los capítulos que se presentan a continuación.

CAPÍTULO 1

Introducción y antecedentes

La Autoridad Portuaria de Sevilla (APS) está interesada en llevar adelante el “Proyecto de Optimización de la Navegabilidad en la Eurovía E.60.02 Guadalquivir” abordándolo dentro de la denominada filosofía *Working with Nature*, cuyo enfoque es lograr objetivos en un contexto de ecosistema e identificar soluciones beneficiosas para todos (estrategia “Win-Win”), en vez de centrarse en evaluar consecuencias de un determinado diseño y minimizar su daño ecológico.

Lo anterior requiere cambios importantes en la forma de enfocar el Proyecto de Optimización, que ahora debe ofrecer soluciones beneficiosas tanto para la propia APS como para los diversos organismos administrativos, ONGs, empresas, asociaciones locales, etc. que tienen intereses en la zona. *Working with Nature* prioriza el establecimiento de necesidades y objetivos y la identificación de oportunidades en el marco de la comprensión integral del entorno y siempre como proceso participativo de los agentes sociales implicados.

El Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA) colaboraría en el desarrollo del Proyecto centrandolo su trabajo **en cuatro actuaciones básicas** que se desarrollan con detalle en la Sección 3 de esta memoria técnica:

1. *Realización de estudios científicos hidrodinámicos y ambientales específicos para dar soporte a la redacción del Proyecto de Optimización (Capítulo 2, Sección 2.1).*
2. *Colaboración en las campañas de difusión de conocimiento que periódicamente se llevarán a cabo desde la APS (Capítulo 2, Sección 2.2).*
3. *Implementación del modelo operacional en colaboración con Puertos del Estado (Capítulo 2, Sección 2.3).*
4. *Participación en el Comité Científico-Técnico constituido en el ámbito del Proyecto (Capítulo 2, Sección 2.4).*

Antecedentes

La colaboración entre la APS y GOFIMA se remonta al año 2015 y a lo largo de este periodo de tiempo se han ido cumpliendo una serie de hitos. GOFIMA ha elaborado y validado un modelo barotrópico de la dinámica mareal enfocado a la comprensión integral de la hidrodinámica del estuario del Guadalquivir (GOFIMA 2018a). Además del forzamiento astronómico, el modelo incluye descargas variables de agua dulce en la parte alta del estuario (presa de Alcalá del Río) y subsidiarios, el forzamiento originado por la marea meteorológica importada desde el océano a través de la desembocadura y el efecto de cizalla del viento sobre la superficie. El modelo se usa actualmente como herramienta de gestión de la navegación por la Eurovía E.60.02.

Estudios de dinámica de la Dársena Portuaria de Sevilla. Aunque por su naturaleza de cuerpo de agua esencialmente aislado esa dinámica es muy débil, el estudio presenta aspectos relevantes relacionados con la calidad de aguas. Debido a su pobre renovación, la amenaza de vertidos de índole diversa constituye un riesgo a tener muy en cuenta. GOFIMA ha desarrollado y adaptado un modelo de advección-difusión para determinar el destino de supuestos vertidos accidentales bajo diferentes escenarios meteorológicos, que ayudaría en situaciones de emergencia (GOFIMA, 2018b).

GOFIMA tiene también desarrollado un modelo baroclino del estuario cuyo uso proporciona información sobre aspectos más sutiles de la hidrodinámica e hidrología del estuario, que son importantes desde diversas ópticas. Entre ellos está la intrusión salina (tapón salino) y su dinámica para forzamientos cambiantes, tópico de especial interés para el colectivo arrocero. El modelo ha sido pre-calibrado con los escasos datos disponibles y está actualmente a falta de una calibración/validación fina por falta de datos de calidad contrastada con los que realizarla.

CAPÍTULO 2.-

Objetivos del presente estudio técnico

2.1.- Realización de estudios científicos hidrodinámicos y ambientales específicos para dar soporte a la redacción del Proyecto de Optimización y su tramitación ambiental.

2.1.1.- Calibración-validación del modelo baroclino implementado en el estuario por GOFIMA.

Completar satisfactoriamente la calibración de este modelo es el objetivo central de esta primera actuación ya que el modelo es la piedra angular de todos los casos de estudio contemplados. La calibración requiere datos de buena calidad en caso de registros cortos o series temporales de cierta longitud para calcular valores representativos mediante promedios que minimicen fluctuaciones en los datos. Un segundo aspecto no menos importante es la parametrización de la compleja política de uso de agua con fines agrícolas que rige en el estuario (arrozales). Ambos se comentan a continuación.

2.1.1.a.- Recolección de datos para la calibración

GOFIMA realizará una labor de recolección de datos¹ en distintos puntos del estuario durante periodos de tiempo aceptablemente largos, disponibles en distintas administraciones (Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, CHG, Federación de Arroceros de Sevilla, FAS). Otras instituciones (Tecnoambiente, Universidad de Sevilla) poseen datos más acotados en el tiempo recogidos en diferentes puntos del estuario. Aunque la finalidad de estos últimos no es servir como herramienta de calibración del modelo, sí suministran información relevante para este fin. Tras el necesario control de calidad y procesado adecuado, todos estos datos se usarán para llevar a cabo un primer calibrado (más bien un primer refinamiento del calibrado²) del modelo.

El calibrado es una tarea abierta que se irá revisando y actualizando si fuese necesario a medida que se vayan recogiendo nuevos datos de mejorada calidad a lo largo de la vida del proyecto. Estos datos se recogerían en las futuras campañas de medición programadas por la APS, que tiene la intención de instrumentalizar y monitorizar el estuario, lo que permitirá obtener series temporales de calidad. También se contemplan campañas intensivas realizadas en periodos concentrados de tiempo con el fin de resolver detalles espaciales de escala fina, como la estructura transversal del campo de salinidad o el de las corrientes en secciones fijas del estuario durante ciclos completos de marea. A este respecto, GOFIMA planificó una primera campaña en mayo de 2021³ empleando recursos e instrumental propios, complementada con otra instrumentación facilitada por la APS.

2.1.1.b.- Modelación del uso de agua con fines agrícolas.

El modelo baroclino pre-calibrado con datos históricos (ver nota al pie nº 2), dentro de los márgenes de incertidumbre que permite esa pre-calibración, pronostica un comportamiento de la cuña salina diferente al observado durante el periodo de la campaña arrocera, mientras que lo reproduce bien en la época invernal. GOFIMA ha achacado esta discrepancia a que el uso real del agua para riego, durante el periodo de cultivo del arroz (mayo a octubre), no está

¹ Esta labor está ya comenzada y deberá ser continuada.

² GOFIMA ya ha realizado intentos de calibración previos en función de datos históricos disponibles con resultados satisfactorios (GOFIMA 2018a). Sin embargo, estos datos carecen de la calidad suficiente para una calibración - validación fina, que precisa nuevas observaciones.

³ La razón de programar esta campaña de medidas en estas fechas tan próximas (de hecho, no estará formalizado aún el presente estudio de colaboración entre la APS y GOFIMA) es que a finales de mayo comienza la campaña del arroz y, durante ella, el control del agua dulce en el estuario es mucho más complicado (apartado 2.1.1.b). Es preferible evitar esta complicación en la delicada tarea de calibración del modelo. De no realizar las medidas antes del inicio de la campaña arrocera, habría que posponerlo hasta octubre/noviembre tras finalizar la temporada del arroz, perdiéndose un tiempo importante.

representado adecuadamente en el modelo por falta de información sobre la estrategia de captación y revertido de agua en el estuario para labores agrícolas. El desajuste sería la consecuencia de no tener implementado de forma realista el proceso en el modelo. Es oportuno notar que este proceso típicamente baroclino afecta específicamente a la dinámica de la cuña salina y no a los caudales movidos por la marea, razón por la que no influye ni en la propagación de la onda de marea ni en las predicciones del modelo barotrópico.

Un encuentro *in situ* mantenido en marzo de 2021 con empresarios del sector arrocero ha servido para comprender el alcance real del problema del uso de agua y perfilar un modelo conceptual del proceso de su captación para riego de los campos de arroz. Los detalles concretos son complicados, e implementarlos adecuadamente en el modelo es inviable debido a la enorme extensión de terreno que ocupa el cultivo, surcado por infinidad de canales. Sin embargo, la comprensión de los aspectos esenciales de volúmenes captados para regar, la necesidad de devolver esa agua al estuario debido al aumento de la salinidad del agua producida por la evaporación en los campos inundados, los puntos donde ocurren esas tomas y vertidos de aguas, etc. permitirá elaborar un esquema conceptual para ser representado exitosamente en el modelo baroclino. Implementar ese esquema conceptual en el modelo e ir mejorándolo en la medida de lo posible es prioritario a la hora de la calibración.

2.1.2.- Cambio del modelo numérico en el estuario.

Con vistas a actuaciones relacionadas con la implantación de un modelo operacional (Sección 2.3), GOFIMA ha valorado desde hace algún tiempo el uso de diferentes modelos numéricos adaptados al estuario. El actualmente implementado, SHYFEM (GOFIMA, 2018a) trabaja con mallado no estructurado en volúmenes finitos, que permite resolver detalles de escala fina en tiempos relativamente breves de computación y en equipos relativamente modestos. Este mallado permite refinar los tamaños de las celdas en lugares de alta complejidad morfológica para resolver detalles pero, por el contrario, no favorece el post-procesado automatizado de las salidas, aspecto fundamental para el establecimiento de un sistema operacional en el estuario. Como alternativa, GOFIMA tiene implementado el modelo DELFT3D (Deltares, 2021) con el que ya ha realizado tareas de validación para reproducir satisfactoriamente la marea barotrópica: la calidad de sus predicciones iguala como mínimo las producidas por SHYFEM. La ventaja de DELFT3D es que trabaja con mallas rectangulares estructuradas que permiten la automatización del procesado de la información, aspecto esencial para el sistema operacional que se quiere desarrollar (Sección 2.3). Una significativa desventaja es su mayor coste computacional.

Las tareas de calibración/validación descritas en los apartados 2.1.1.a,b afectan a ambos modelos. Con ello se pretende comprobar la bondad del diseño conceptual de uso de agua implementado que, al ser testado por dos esquemas numéricos distintos, pondría a prueba su robustez. Si, como se espera, DELFT3D supera la performance de SHYFEM en estos aspectos baroclinos, se procedería a hacer la transición de éste al nuevo modelo, sin que ello conlleve problema ni discontinuidad alguna para la APS, que seguirá recibiendo la información bajo los mismos protocolos y formatos.

2.1.3.- Casos de estudio.

Utilizando el modelo calibrado, se llevarán a cabo simulaciones de situaciones (casos de estudio) que se quieran abordar en la redacción del Proyecto de Optimización a fin de proporcionar respuestas que ayuden en la toma de decisiones y en la mejora de medidas de sostenibilidad. Entre estos casos de estudio se consideran:

2.1.3.a.- Comportamiento del tapón salino y del prisma mareal al realizar dragados de mantenimiento.

Se estudiarán y evaluarán los posibles cambios de ubicación de la cuña salina y del tamaño del prisma mareal (cantidad de agua oceánica que entra en el estuario en un ciclo de marea) comparando el patrón salino del estuario y el prisma mareal antes y después de efectuar un dragado de mantenimiento. El estudio permitirá rebatir o confirmar científicamente la creencia (hasta la fecha infundada) de que un estuario más profundo conlleva más prisma mareal y mayor penetración de la cuña salina.

El procedimiento a seguir es repetir la simulación con batimetrías pre-dragado y post-dragado bajo exactamente los mismos forzamientos externos. El estudio puede hacerse tanto para situaciones en las que solamente se haya intervenido en un tramo específico del estuario como para situaciones de múltiples intervenciones.

2.1.3.b.- Análisis del comportamiento de la dinámica mareal al llevar a cabo inundaciones de llanos mareales.

La presencia de llanuras mareales inundables influye de manera relevante en la dinámica mareal. El estudio preliminar llevado a cabo en GOFIMA (2018a) indica que el sistema es sensible a la ubicación del llano mareal, su extensión y la cota a partir de la cual el agua inunda el llano. La amplitud mareal disminuye y el tiempo de tránsito de la marea (fase) aumenta.

Se repetirán los experimentos con el modelo calibrado para confirmar y cuantificar en su caso esos resultados preliminares y se abordarán nuevos aspectos como la influencia de estas llanuras sobre la dinámica de las corrientes, el prisma mareal, la posición de la cuña salina, etc. El procedimiento es el usual: generar una simulación de referencia con la batimetría/morfología actual, modificar éstas para los llanos mareales que deseen estudiarse y repetir la simulación bajo idénticos forzamientos externos para proceder a la comparación de resultados.

2.1.3.c.- Dispersión de contaminantes en el estuario

Haciendo uso de los módulos de advección-difusión desarrollados y probados por GOFIMA en estudios previos (GOFIMA 2018b) se llevarán a cabo estudio de dispersión de contaminantes, tanto ambientales (p.e., metales pesados provenientes de vertidos de buques) como orgánicos con origen en labores agrícolas (arroceros: nitratos, fosfatos y silicatos). También se abordarán simulaciones de evolución de vertidos accidentales (combustibles o similares). Se simularán distintos escenarios, bajos sendas condiciones de viento, marea, y descargas de agua dulce.

2.1.4.- Contribución a estudios de transporte de sedimentos.

Este tópico, que no está comprometido dentro de este contrato, lo abordaría GOFIMA como complemento anexo a las tareas de validación y como comprobación adicional del potencial predictivo del modelo desarrollado. No lleva vinculado ningún tipo de entregable por las razones ya comentadas. Debido al largo historial de colaboración, GOFIMA quiere dejar constancia de lo anterior como deferencia hacia la APS. Los puntos que abordaría este estudio en la medida que el tiempo permita desarrollarlo afectarían a:

2.1.4.a.- Implementación de un módulo de erosión/sedimentación.

2.1.4.b.- Turbidez generada durante las tareas de dragado de mantenimiento.

2.1.4.c.- Comportamiento del material vertido en fosas naturales de la ría.

2.2.- Colaboración en las campañas de difusión que periódicamente se llevarán a cabo desde la APS

Dentro de la estrategia *Win-Win* se debe prestar atención especial a esta segunda actuación por su potencial para crear sinergias entre los sectores implicados. La actividad es compartida por los demás equipos investigadores participantes en el estudio integral del

estuario, razón por la cual la APS ha diseñado las pautas comunes que son asumidas por GOFIMA. Por ello, el desglose que sigue es bastante generalista y contiene las contribuciones específicas de GOFIMA al objetivo más amplio de difusión del proyecto.

2.2.1. Informes y material gráfico

2.2.1.a.- Resumen divulgativo sobre los principales resultados de los trabajos y relación de estos resultados con los objetivos del Puerto de Sevilla.

Se materializarían en informes periódicos explicando las actuaciones llevadas a cabo durante el periodo considerado. En principio, este periodo sería anual, aunque pudiera reducirse ocasionalmente a petición de la APS si las circunstancias así lo aconsejasen. Los informes irían acompañados de breves resúmenes para no especialistas subrayando los resultados más llamativos e interesantes. Se prevé la posibilidad de complementarlos con vídeos ilustrativos en el caso de que tal formato beneficie la difusión de los resultados o actividades de las investigaciones.

2.2.1.b.- Provisión de material gráfico y audiovisual

Se proporcionará a la APS material gráfico (infografías de apoyo, animaciones con resultados de simulaciones) y audiovisual (vídeos y fotografías profesionales de calidad) para apoyar la difusión de los trabajos en sus canales de comunicación: notas de prensa, redes sociales, página web. Este material será también difundido desde las redes sociales y web de GOFIMA, que construirá una página dedicada íntegramente al proyecto. No se establece periodicidad para realizar esta actividad; es preferible hacerlo a petición expresa de la APS o en función de lo que dicten los resultados de la investigación.

2.2.1.c.- Visitas de prensa y/o colectivos de interés.

Dentro de la estrategia *Win-Win* y debido al impacto social y variedad de colectivos implicados en el uso del estuario del Guadalquivir, se contempla la posibilidad de mantener reuniones explicativas con estos colectivos y facilitar información en forma de notas de prensa. Al igual que en el caso anterior, no se establece periodicidad sino que se deja abierta para realizarla cuando las circunstancias lo aconsejen.

2.2.2. Otras actividades

2.2.2.a.- Participación en entrevistas y reportajes de medios generales.

Esta actividad está diseñada para presentar los resultados de la investigación y focalizada en TV y prensa como medios de difusión. Será coordinada con la División de Comunicación y RRII de la APS, que será quien establezca las fechas y circunstancias de los reportajes a realizar. En lugar de programarla con periodicidad predeterminada se considera más oportuno dejarla abierta para cuando se vea adecuada o necesaria su realización.

2.2.2.b.- Exposición sobre los estudios científicos del estuario del Guadalquivir.

Se prevé una exposición de esta naturaleza hacia el año 2023. GOFIMA contribuirá a esta actividad aportando material audiovisual y gráfico y otros elementos expositivos que inviten a la interacción con el público general. Participará en la supervisión y elaboración de contenidos y en la creación del discurso expositivo con objeto de facilitar la divulgación de los estudios científicos entre el público visitante.

2.2.2.c.- Difusión de la investigación entre la comunidad científica.

Se refiere a la publicación de resultados en revistas científicas de difusión internacional y en congresos nacionales e internacionales. En colaboración con personal de la APS, GOFIMA

publicará artículos científicos a lo largo del proyecto. Es difícil hacer una previsión exacta de cuántos debido al proceso exigente de revisión por pares que impera en revistas de alto impacto; la intención es publicar uno por año. La misma periodicidad se prevé para la presentación de trabajos a congresos. Aunque esta difusión es más selectiva en cuanto al colectivo destinatario, retroalimentará parcialmente a la dirigida a la audiencia no especialista.

2.3.-Implementación modelo operacional en colaboración con Puertos del Estado

Una aplicación científico-tecnológica cada vez más demandada en el ámbito de la gestión litoral, costera y portuaria, es la oceanografía operacional, dirigida a proporcionar información en tiempo real sobre el estado del océano. Un marco operacional encuadra dos aspectos principales: observaciones y modelación numérica. En el ámbito portuario la oceanometeorología operacional representa hoy en día un elemento necesario de ayuda a la navegación y gestión del tráfico marítimo, que en España se está instalando con notable éxito por muchas autoridades portuarias.

El (los) modelo(s) hidrodinámico(s) del estuario implementados por GOFIMA se ha(n) usado satisfactoriamente en la gestión de la navegación por el estuario. Sin embargo, el sistema consta de simulaciones numéricas ejecutadas bajo demanda basadas únicamente en el forzamiento astronómico y no reproduce otros (forzamiento meteorológico) ni los efectos de las manipulaciones humanas sobre el propio caudal (descargas de agua dulce). El paso siguiente es integrar el modelo hidrodinámico en un marco operacional que anticipe las condiciones del estuario en una fecha concreta, a partir de pronósticos de esos forzamientos en dicha fecha. Éstos deben ser facilitados por otros conductos (modelos más globales para la marea meteorológica, modelos atmosféricos para forzamiento superficial, gestión del caudal controlado en la presa de Alcalá del Río). El sistema operacional es el conjunto de la infraestructura que recupere esa información en tiempo real y el modelo hidrodinámico que ésta alimenta. Así es posible proporcionar una simulación fiable del estado del estuario con el horizonte temporal que tengan los forzamientos (modelo operacional predictivo).

Puertos del Estado tiene una gran experiencia en este tipo de desarrollos y su sistema operacional (<https://portus.puertos.es/>) es un ejemplo de excelencia en Europa. La implementación del modelo operacional en el estuario **requiere la colaboración imprescindible de este organismo, PUERTOS DEL ESTADO**, tanto por la mencionada experiencia probada en estos desarrollos como por la infraestructura computacional de la que dispone en su sede, fundamental para el correcto funcionamiento del sistema operacional. Mencionar que existen colaboraciones exitosas previas entre GOFIMA y Puertos del Estado en la implementación de sistemas operacionales (Proyectos SAMPA con la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, que han dado lugar al sistema operacional del mismo nombre, implementado posteriormente en muchos otros puertos españoles).

El desarrollo del modelo hidrodinámico operacional del Guadalquivir comprende cinco tareas. Cada una de ellas requerirá la estrecha colaboración de GOFIMA con las entidades involucradas en este proyecto: APS y Puertos del Estado.

2.3.1.- Identificación de los forzamientos necesarios y disponibles

Los forzamientos necesarios para alimentar el modelo operacional serán los relativos a las condiciones oceanográficas en la desembocadura donde los modelos hidrodinámicos interactúan con el océano, las condiciones atmosférico-meteorológicas en la superficie libre del estuario y las descargas de agua dulce en los distintos puntos donde existe información de que tal descarga se produce.

Las primeras afectan al residuo mareal oceánico debido al efecto meteorológico sobre el nivel del mar y se obtendría del modelo de predicción barotrópico NIVMAR distribuido por Puertos del Estado (Álvarez Fanjul et al., 2001). Esta contribución es la más necesaria pues, en promedio, es la tercera en importancia tras el forzamiento astronómico y las descargas de agua dulce. Están también las condiciones oceanográficas en las proximidades de la desembocadura, que pueden importarse del modelo hidrodinámico de predicción IBI (Iberian Biscay Irish, Sotillo et al., 2015) distribuido por el sistema COPERNICUS Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), con predicciones diarias de temperatura, salinidad y corriente, barotrópicas (promediadas en la vertical). De esta última variable se evaluará su necesidad, dada la clara dominancia de la corriente del estuario sobre las marinas costeras en la desembocadura. Se prevé que estas últimas condiciones oceanográficas van a tener una influencia insignificante y que por ello posiblemente no se integren en el sistema operacional. Es en cualquier caso un punto a confirmar.

Las segundas (condiciones meteorológicas) procederían del modelo de predicción atmosférica HARMONIE-AROME (Bengtsson et al., 2017) distribuido por la Agencia Estatal de Meteorología española (AEMET), que proporciona predicciones de temperatura del aire, humedad, flujos de calor y precipitación. La viabilidad y efectiva necesidad de cada una de estas variables se evaluará durante la fase de desarrollo del modelo operacional.

Finalmente, las descargas de agua dulce. Reguladas mediante apertura y cierre de la presa de Alcalá del Río y otras presas o embalses regulados, siguen pautas poco previsibles y han de satisfacer otro tipo de actividades, como la regulación del nivel del embalse o el regadío de los campos de arroz, gestión llevada a cabo por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG). Será necesario establecer protocolos de comunicación con la CHG para obtener predicciones realistas de caudal a corto plazo (mismo horizonte temporal que los otros forzamientos, unas 72h). Sin ellas, no sería posible considerar este forzamiento -el segundo en importancia tras el mareal- en el protocolo operacional del modelo.

2.3.2.- Diseño de los protocolos de acceso y difusión de los datos remotos

Dependiendo de la fuente de distribución del modelo empleado como forzamiento, se establecerán protocolos de acceso y redistribución del dato, primando la eficiencia y el bajo coste computacional. Las rutinas deberán poder acceder al modelo, recuperar la serie temporal de datos requeridos, interpolar la información espacial y temporal, y escribir los ficheros correspondientes. Se prestará especial atención a la robustez de los códigos, que deberán hacer frente a imprevistos (caída de los servidores, detección de datos espurios, ausencia de datos, etc.) para evitar que el modelo operacional rompa y deje de proporcionar una salida consistente. Para el lenguaje de programación se primarán la eficiencia, robustez y rapidez del código: Python, la Shell de Linux, y posiblemente FORTRAN, el mismo lenguaje empleado en una parte del modelo, serán las opciones preferidas.

2.3.3.- Implementación del modo operacional

El desarrollo propiamente dicho del modelo operacional consistirá en la adaptación del nuevo modelo hidrodinámico (DELFT3D) calibrado y validado (Sección 2.1) para asimilar la información procedente de los modelos remotos. Este proceso se desarrollará en primera instancia para una versión off-line, es decir un sistema que funcionará con datos ficticios equivalentes a los que se tendrán en la cadena operacional, con el fin de calibrar el código del modelo y verificar que la asimilación proporciona resultados consistentes. Sucesivamente se testará su empleabilidad, en términos de tiempos de ejecución y coste computacional, en una versión on-line del modelo, simulando su funcionamiento en el marco del sistema operacional propiamente dicho. Para poder satisfacer los tiempos de ejecución del modelo operacional, generalmente del orden de pocas horas, será necesario recurrir a la paralelización del código,

tarea para la cual resultará imprescindible la colaboración con Puertos del Estado, y el empleo de sus servidores multi-núcleos.

2.3.4.- Calibración/validación del modelo operacional

Las tareas de calibración y validación del modelo serán cruciales para testar el correcto funcionamiento del sistema. Involucra la parte observacional ya mencionada que debe existir en todo modelo operacional y para la que se cuenta con el apoyo total de la APS y de Puertos del Estado. Estas instituciones proporcionarían información disponible para contrastar las salidas del modelo con las observaciones in situ y en tiempo real a lo largo del río. No debe confundirse esta calibración/validación con la ejecutada en los ajustes del modelo hidrodinámico movido por la marea astronómica o la relativa a aspectos baroclinos, como la dinámica de la cuña salina, que se realiza en otras tareas (Sección 2.1). Es la calibración de las predicciones a corto plazo ejecutadas por el sistema operacional completo, con todos los forzamientos incluidos, respecto a las medidas tomadas por la instrumentación desplegada en el estuario.

2.3.5.- Integración del modelo en las instalaciones de Puertos del Estado

Una vez terminada la implementación del modelo operacional, verificada su empleabilidad en términos de coste computacional, y validado satisfactoriamente su rendimiento, se procederá a su instalación en las máquinas de Puertos del Estado. Durante el proceso de instalación uno o más miembros de GOFIMA tendrán que efectuar estancias en Madrid. Si la colaboración con expertos de Puertos del Estado en las fases previas es básica, en esta última fase es indispensable y fundamental. Sin este apoyo, el modelo operacional no podrá funcionar.

2.4.- Participación en el Comité Científico-Técnico del proyecto.

La APS tiene intención de crear un Comité Científico-Técnico interdisciplinar donde estén representados todos los colectivos y grupos de investigación implicados en el proyecto, GOFIMA entre ellos, para tratar los diversos temas relacionados con él. La dinámica del Comité debe ser proactiva y constructiva de tal manera que, a la hora de analizar posibles propuestas, se tengan en cuenta la mayor parte de los condicionantes presentes en el entorno, como son las actividades económicas agrarias y pesqueras, la actividad portuaria o las dinámicas de los ecosistemas presentes. Habrá reuniones periódicas, telemáticas la mayor parte de las veces, aunque no se tiene fijado un calendario para ellas. Sus funciones serán:

- ✓ Aunar el conocimiento que existe sobre el Estuario y su comportamiento, analizando y resaltando cuales son los principales condicionantes y problemas que existen en él, proponiendo cuáles deberían ser las posibles soluciones a ellos.
- ✓ Valorar el estado del estuario, resaltando y priorizando los aspectos más relevantes.
- ✓ Asesorar en todas aquellas acciones que se desarrollen durante la redacción del proyecto, proponiendo directrices, soluciones y evaluando cada una de ellas. Para ello, propondrían objetivos específicos que serían analizados y evaluados para ver si son viables y, se tendrían en cuenta a la hora de desarrollar las posibles soluciones.

CAPÍTULO 3

Temporización

La Tabla 1 muestra la temporización establecida para las diferentes tareas descritas en la memoria técnica.

Tabla 1. Cronograma tentativo de las actividades a realizar durante la extensión del proyecto.

Actividad – tarea	AÑO 1				AÑO 2				AÑO 3			
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
2.1 - 2.1.1 -	E1			E2								E6
2.1 - 2.1.1 -	E1			E2		E3						E6
2.1 - 2.1.2	E1			E2		E3						E6
2.1 - 2.1.3 -	E1			E2		E3						E6
2.1 - 2.1.3 -	E1			E2		E3						E6
2.1 - 2.1.3 -	E1					E3		E4				E6
2.1 - 2.1.4 .a,b,c	E1									E5		E6
2.2 - 2.2.1 -	E1					E3				E5		E6
2.2 - 2.2.1 -	E1											E6
2.2 - 2.2.1 -	E1											E6
2.2 - 2.2.2 -	E1											E6
2.2 - 2.2.2 -	E1											E6
2.2 - 2.2.2 -	E1					C&P				C&P		C&P
2.3 - 2.3.1	E1					E3						E6
2.3 - 2.3.2	E1							E4				E6
2.3 - 2.3.3	E1									E5		E6
2.3 - 2.3.4	E1									E5		E6
2.3 - 2.3.5	E1											E6
2.4	E1											E6

Se ha tomado como unidad de tiempo el trimestre (T1, T2, ...,T12) para los tres años de duración prevista del contrato y sombreado la duración de las distintas actividades. Respecto a la actuación 1, las actividades estrictamente comprometidas aparecen en azul intenso. El sombreado azul claro en 2.1.1.a indica que la labor de calibración estará permanentemente en revisión en función de los nuevos datos que se puedan ir obteniendo. Se ha hecho uso del color verde en el sombreado de las tareas 2.1.4 para diferenciar el grado de compromiso: estas tareas se refieren a estudios relativos a transportes de sedimentos, que se tiene la intención de realizar, pero que no están formalmente comprometidos en el contrato. No es un entregable como tal. Si finalmente se llevasen a cabo, como deferencia, se facilitaría a la APS un informe con los resultados más destacables en principio con el entregable E5, aunque bien podría ser por otra vía y momento dado el carácter especial con que es contemplada por GOFIMA esta tarea en este proyecto. Existen actividades para las que la temporización no se aplica o, al menos, no de forma rigurosa, y para ellas se ha empleado el tono amarillo pastel (por ejemplo, las concernientes a la actuación 2.3, COMITÉ CIENTÍFICO-TÉCNICO). Estas actividades están vigentes durante la vida del contrato pero se realizarían a demanda de la APS o cuando el material científico y los resultados acumulados así lo aconsejasen. Las E1, E2.... señalan las fechas de entregables comprometidos (ver Capítulo 4) con indicación de los contenidos previstos en cada uno de ellos.

Su periodicidad es semestral para encajar con las pautas de facturación establecidas por la APS. Los códigos E1 y E6 se extienden por toda la columna para indicar que o bien se trata de un entregable generalista (caso de E1, que se reduce a la entrega del presente Plan de Trabajo y no afecta particularmente a ninguna de las tareas) o contiene los resultados de todo el proyecto, que afectan a todas las tareas. El anagrama “C&P” indica las fechas tentativas en las que GOFIMA completaría la difusión de resultados de los estudios en el circuito más específicamente científico (congresos, publicaciones).

CAPÍTULO 4

Entregables

De acuerdo con la pauta de facturación en el contrato, se establece el siguiente calendario de entregables:

Entregable 1, al inicio de los trabajos (noviembre 2021):

Plan de Trabajo y la descripción del alcance de las distintas tareas ofertadas.

Entregable 2 (diciembre 2021):

Inter-comparación de resultados producidos por ambos modelos del estuario, pre-calibración de los modelos baroclinos en función de los datos disponibles. Exportación definitiva al nuevo modelo. Primeros resultados del esquema conceptual de uso de agua para labores agrícolas (arroceros). Primeros resultados de los casos de “estudio comportamiento del tapón salino y prisma mareal al realizar dragados de mantenimiento”; ídem para la “implantación de llanuras mareales”.

Entregable 3 (junio 2022):

Implementación del esquema conceptual de uso de agua para labores agrícolas (arroceros). Casos de estudio “comportamiento del tapón salino y prisma mareal al realizar dragados de mantenimiento” e “implantación de llanuras mareales” completados. Primeros resultados del caso de estudio “dispersión de contaminantes”. Informe sobre la identificación de los forzamientos necesarios y disponibles para el sistema operacional. Primer resumen divulgativo de los resultados del proyecto en soporte audiovisual o infográfico.

Entregable 4 (diciembre 2022):

Caso de estudio “dispersión de contaminantes” completado. Informe sobre “Diseño de los protocolos de acceso y difusión de los datos remotos” dentro del sistema operacional.

Entregable 5 (junio 2023):

Informe sobre la implementación del sistema operacional off-line. Primer informe sobre la calibración/validación del sistema operacional. Primer informe (opcional) sobre el estado de implementación del módulo de sedimentación-erosión por parte de GOFIMA, con el grado de compromiso explicado en el informe, y primer análisis sobre estudios de turbidez, erosión y sedimentación realizados. Segundo resumen divulgativo de los resultados del proyecto en soporte audiovisual o infográfico.

Entregables 6a y 6b (diciembre 2023):

Entregable 6a. Informe sobre la calibración validación del sistema operacional y sobre la instalación del modelo operacional en los equipos de Puertos del Estado. Estudio (opcional) sobre el estado de implementación del módulo de sedimentación-erosión por parte de GOFIMA, con el grado de compromiso explicado en el informe, y primer análisis sobre estudios de turbidez, erosión y sedimentación realizados completado.

Entregable 6b. Informe final con los resultados y logros del proyecto. Tercer resumen divulgativo de los mismos en soporte audiovisual o infográfico.

El proyecto contempla otras tareas de índole divulgativa en medios sociales y entre colectivos implicados en los usos del estuario, cuyo calendario no puede definirse a corto medio plazo. Cuando cualquiera de estos acontecimientos o actividades tenga lugar, el entregable comprometido en fecha inmediatamente posterior a su celebración se hará eco de la misma incluyendo un resumen explicativo de la colaboración, responsabilidad y/o participación de

GOFIMA en el evento. En ese sentido, el resumen de entregables es una indicación de contenidos mínimos.

NOTA: El calendario de entregables anterior puede sufrir alguna modificación debido al retraso sufrido en la firma del proyecto. Estaba previsto que la misma hubiese tenido lugar en junio-julio de 2021, lo que daba un plazo razonable de 6 meses entre el primer entregable (el presente documento, a entregar a la firma del contrato) y el segundo, comprometido para el mes de diciembre de 2021, según figura en el documento citado. Sin embargo, el contrato fue finalmente firmado el 29 de noviembre, dejando un margen de un mes escaso entre las fechas comprometidas de ambos informes. Aunque GOFIMA trabajará para ceñirse a las fechas estipuladas en el contrato, debe anticipar la posibilidad de que ocurra algún pequeño retraso en la entrega del segundo de los informes.

Referencias

Álvarez Fanjul, E., Pérez Gómez, B., Rodríguez Sánchez Arévalo, I., 2001. Nivmar: a storm surge forecasting system for Spanish waters. *Sci. Mar.* 65, 145–154. <https://doi.org/10.3989/scimar.2001.65s1145> M4 - Citavi

Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W., Gleeson, E., Hansen-Sass, B., Homleid, M., Hortal, M., Ivarsson, K.-I., Lenderink, G., Niemelä, S., Nielsen, K.P., Onvlee, J., Rontu, L., Samuelsson, P., Muñoz, D.S., Subias, A., Tijm, S., Toll, V., Yang, X., Køltzow, M.Ø., 2017. The HARMONIE–AROME Model Configuration in the ALADIN–HIRLAM NWP System. *Mon. Weather Rev.* 145, 1919–1935. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1>

Deltares. Delft3D-FLOW User Manual. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Version: 3.15.72274, 21 July 2021.

GOFIMA (2018b) *MODELO HIDRODINÁMICO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL DE LA DÁRSENA: HERRAMIENTA DE AYUDA AL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS PORTUARIAS EN LA DÁRSENA*. Autoridad Portuaria de Sevilla, 76pp.

GOFIMA (2018a) Informe final del proyecto "*MODELO HIDRODINÁMICO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL DEL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR Y ZONAS ALEDAÑAS*", Autoridad Portuaria de Sevilla, 73 pp.

Sotillo, M.G., Cailleau, S., Lorente, P., Levier, B., Aznar, R., Reffray, G., Amo-Baladrón, A., Chanut, J., Benkiran, M., Alvarez-Fanjul, E., 2015. The MyOcean IBI Ocean Forecast and Reanalysis Systems: operational products and roadmap to the future Copernicus Service. *J. Oper. Oceanogr.* 8, 63–79. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1014663>



PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN DE LA NAVEGACIÓN EN LA EUROVÍA E.60.02 GUADALQUIVIR

WORKING WITH NATURE

***“Realización de estudios hidrodinámicos y ambientales
en el marco del proyecto de Optimización de la
Navegación en la Eurovía E.60.02 GUADALQUIVIR.
Periodo 2021-2023”***

*Contrato firmado entre la Autoridad Portuaria de Sevilla y el
Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga,
noviembre 2021*

INFORME Nº 2, ENERO 2022

Grupo Oceanografía Física, Universidad de Málaga (GOFIMA)



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



**Funded by
the European Union**

DISCLAIMER: The contents of this publication are the sole responsibility of GOFIMA and do not necessarily reflect the opinion of the European Union.

ÍNDICE

PRÓLOGO	3
1. Inter-comparación de resultados producidos por los dos modelos del estuario implementados por GOFIMA	4
1.1.- Validación de los modelos en términos de nivel (barotrópica)	4
1.2.- Inter-comparación de modelos. 1.- Nivel.	6
1.3.- Inter-comparación de modelos. 2.- Corrientes.....	7
2. Pre-validación del modelo baroclino en función de los datos disponibles.....	10
2.1.- Validación de corrientes, campaña GOFIMA de mayo de 2021.	11
2.2.- Validación de salinidad, campaña GOFIMA de mayo de 2021.	12
2.3.- Temperatura	14
3. Esquema conceptual y descriptivo del uso del agua en el estuario para labores agrícolas (arrozales).....	16
3.1.- El problema de la salinidad en la zona media del estuario.....	16
3.2.- Aproximación al problema.....	17
3.3.- Algunos resultados preliminares.	18
3.4.- Actuaciones futuras.	19
4. Caso de aplicación 1. Comportamiento del tapón salino y del prisma mareal ante dragados de mantenimiento.....	21
4.1.- El problema de las batimetrías.	21
4.2.- Planteamiento del estudio e identificación de algunas zonas de dragado.....	22
5. Caso de aplicación 2. Comportamiento del tapón salino y del prisma mareal ante el establecimiento de llanuras mareales.	24
5.1.- Selección de la ubicación de la llanura	24
5.2.- Detalle de las simulaciones realizadas	25
5.3.- Variaciones de la oscilación mareal	27
5.4.- Variaciones del prisma mareal (caudales)	31
5.4.- Algunos resultados preliminares sobre la salinidad.	32
Referencias.....	34
Anexo 1	36
Anexo 2	40

PRÓLOGO

El presente documento es el segundo de los seis informes comprometidos en el contrato “Realización de estudios hidrodinámicos y ambientales en el marco del proyecto de Optimización de la Navegación en la Eurovía E.60.02 GUADALQUIVIR. Periodo 2021-2023”, firmado entre la Autoridad Portuaria de Sevilla (APS) y el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA). Sus contenidos se corresponden con los establecidos en el “Entregable 2” del *Plan de Trabajo* entregado a la APS en noviembre 2021 como Informe nº 1 y en la “Estipulación Segunda” del contrato firmado. Dichos contenidos se desarrollan en los capítulos de este informe. El mapa inferior del estuario (Figura 0), con los principales acrónimos mencionados en el documento, se incluye como ayuda para su lectura.

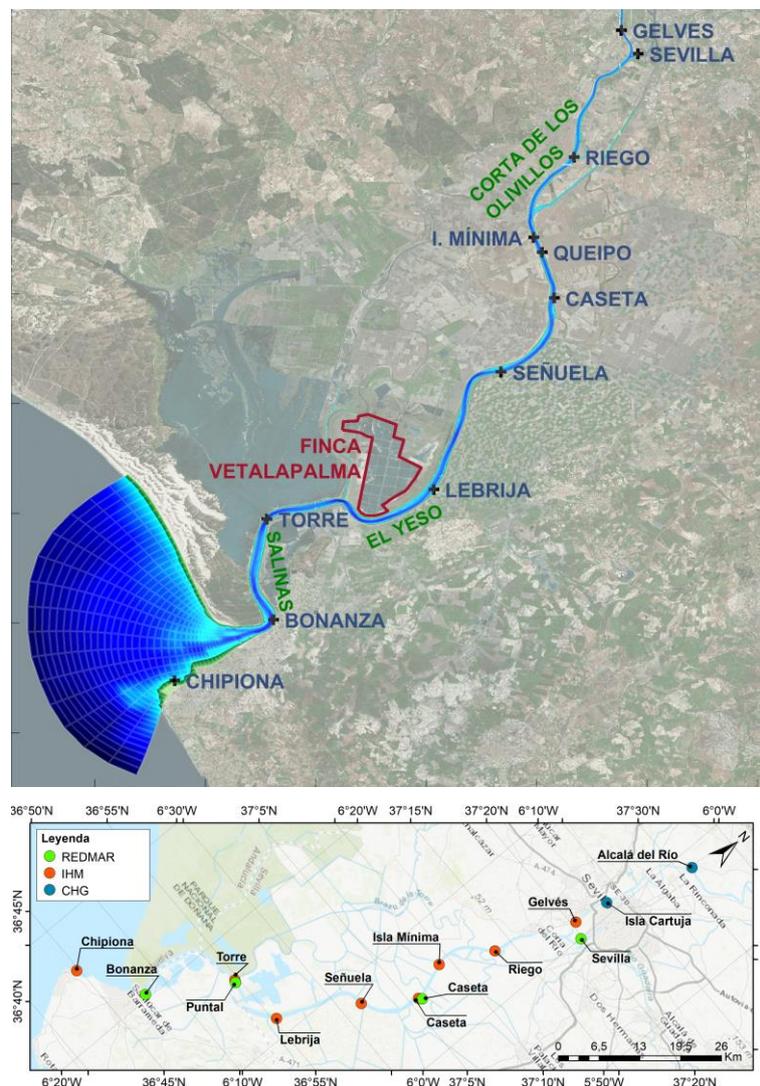


Figura 0. Panel superior: mapa del estuario del Guadalquivir con la toponimia mencionada en el texto. Panel inferior: estaciones donde existen observaciones de nivel del mar con las que validar las salidas de los modelos. El código de color indicado en la leyenda especifica la institución responsable de la estación de medida. Son: Puertos del Estado (REDMAR), Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CGH).

1. Inter-comparación de resultados producidos por los dos modelos del estuario implementados por GOFIMA

De colaboraciones previas con la APS, GOFIMA tiene implementado y calibrado la versión barotrópica del modelo numérico SHYFEM en el estuario del Guadalquivir. Con vistas a la implantación del modelo operacional comprometida en la Memoria Técnica del Proyecto, GOFIMA ha decidido sustituir ese modelo por el DELFT3D-FLOW module (al que nos referiremos como DELFT3D en lo sucesivo), que trabaja sobre mallas rectangulares estructuradas en vez de con mallados triangulares no estructurados en volúmenes finitos con los que opera SHYFEM (Figura 1.1), ya que éstos no favorecen el post-procesado automatizado de las salidas que se requiere para el establecimiento del sistema operacional. La comparación de resultados producidos por uno y otro modelo es el objetivo de este primer Capítulo del informe.

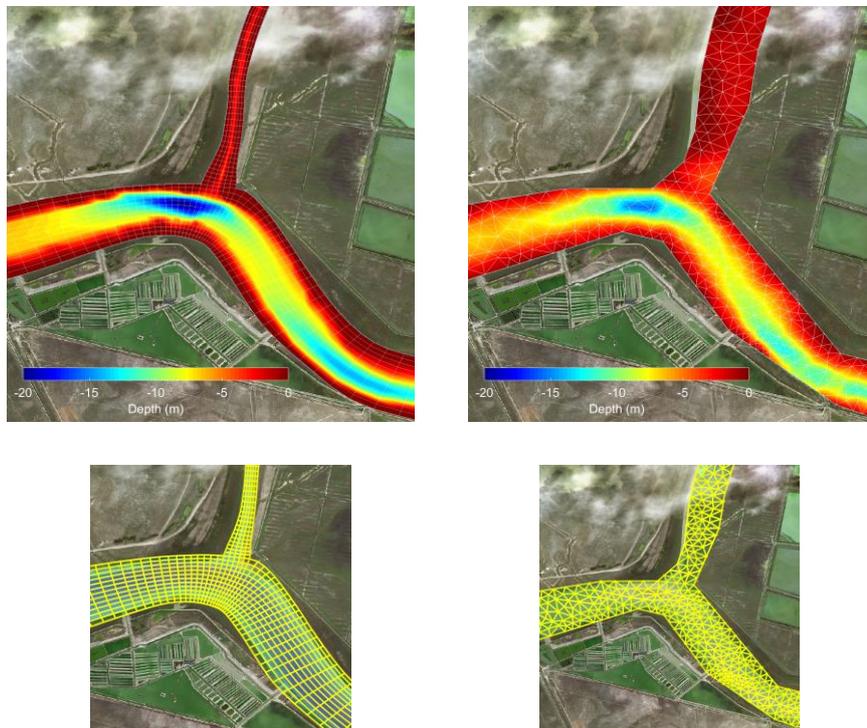


Figura 1.1. Panel superior: Batimetría del modelo en la región donde el brazo de la Torre se une al estuario. Panel inferior: mallado de ambos modelos. En ambas filas el modelo DELFT3D se muestra a la izquierda, y el SHYFEM a la derecha.

1.1.- Validación de los modelos en términos de nivel (barotrópica)

Antes de proceder a la inter-comparación de los modelos es interesante ilustrar su potencial predictivo contrastando la predicción de nivel a lo largo del estuario que predicen con los valores del mismo deducidos de observaciones. Dada la preponderancia que tiene la marea astronómica en las oscilaciones de nivel, la validación de los modelos se ha hecho en este ámbito, comparando las constantes armónicas deducidas de las salidas de los modelos con las obtenidas de observaciones in situ a lo largo del estuario (ver Figura 0). Para ello se recurre al análisis armónico que calcula amplitud y fase de las constituyentes más importantes en la oscilación mareal. Las Figuras 1.2 y 1.3 muestran esas comparaciones para los modelos DELFT3D y SHYFEM, respectivamente.

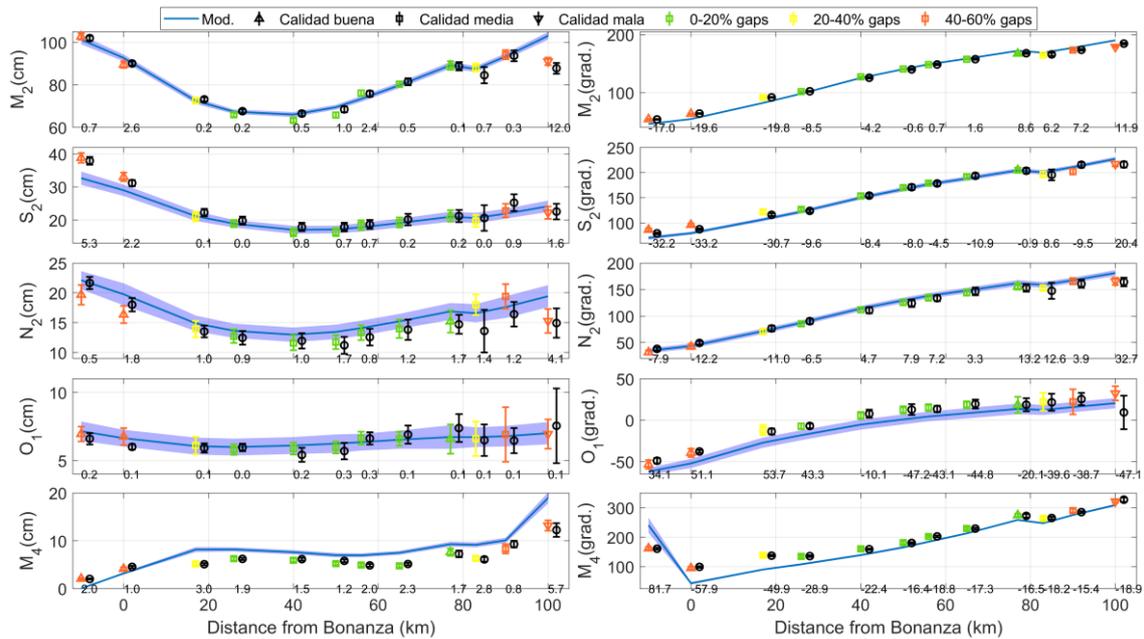


Figura 1.2 - Validación del modelo DELFT3D en la banda de frecuencia mareal (la dominante con mucha diferencia) respecto a observaciones disponibles a lo largo del estuario (ver Figura 0). La validación se hace a través de las constantes armónicas deducidas de las salidas del modelo (líneas continuas) y de las propias observaciones (símbolos). Los paneles de la izquierda muestran amplitudes de una selección de las constituyentes más importantes de las bandas semidiurna, diurna y cuartidiurna, y los de la derecha, sus fases. La incertidumbre en el cálculo de las constantes armónicas se indica con la franja sombreada para el modelo y con las barras para las observaciones. Éstas han sido sometidas a un control de calidad que lo resume el código de símbolos y colores especificado en la leyenda superior. Las cifras en el eje de abscisas indican diferencia de amplitud (cm) y de fases (convertida a minutos) entre modelo y observaciones.

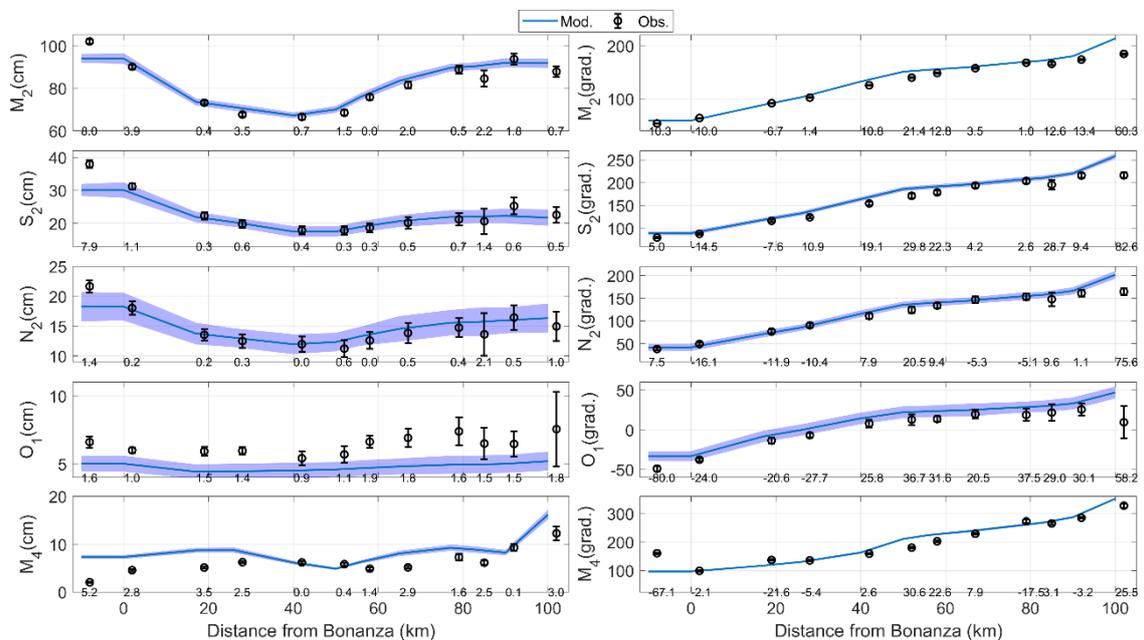


Figura 1.3 - Mismo que Figura 1.2 para el modelo SHYFEM. Se ha omitido el código de color para las observaciones.

En ambas figuras, la validación se ha hecho a escala mareal, es decir, comparando solamente la parte astronómica de la señal. Como complemento a lo anterior, la Tabla 1.1 extiende esa comparación a observaciones de nivel con todas sus contribuciones a efectos de

ilustrar la calidad que puede asignarse al modelado del estuario forzado exclusivamente con marea astronómica. Aunque el modelo tiene integrados los forzamientos meteorológicos y de descargas y, por ello, podría hacerse una comparación más precisa (y favorable para el modelo), se ha decidido incluir la Tabla 1.1 por la siguiente razón: la APS, para gestionar la navegación por el estuario, usa rutinariamente la predicción de los modelos a medio plazo, la cual sólo puede incluir el forzamiento astronómico. Comparar las predicciones astronómicas con la realidad más compleja del estuario con todos sus forzamientos proporciona una idea cuantitativa del desvío que se produce al considerar sólo la parte puramente astronómica de la predicción. Las cifras en esta Tabla indican que ambos modelos producen resultados muy satisfactorios y que la predicción astronómica que hacen resulta suficiente para ayudar a planificar la navegación eficazmente.

Tabla 1.1 - Estadísticas de comparación entre nivel observado en las estaciones de Bonanza, Puntal, Caseta y Sevilla (ver Figura 0), y simulado por los dos modelos ejecutados con forzamiento astronómico exclusivamente. En estos últimos, no existe más forzamiento que el astronómico, en tanto que las observaciones contienen implícitamente todos. Las diferencias reseñadas en la Tabla tienen gran parte de su origen en esta causa. La columna "distancia" indica la distancia de las estaciones hasta Bonanza, que se ha tomado como origen.

Estación	Distancia (km)	Modelo	Coefficiente correlación	$\Delta\xi$ (cm) RMSE	Δt (min) Pleamar	$\Delta\xi$ (cm) Pleamar	Δt (min) Bajamar	$\Delta\xi$ (cm) Bajamar
Bonanza	0.0 km	Shyfer	0.99	9.6	-8.5	6.3	-6.9	-3.2
		Delft3D	0.98	11.8	-24.0	0.6	-23.5	-6.9
Puntal	17.1 km	Shyfer	0.99	7.6	-14.7	6.4	-1.1	5.7
		Delft3D	0.99	6.7	-24.9	-1.6	-11.7	-1.8
Caseta	50.4 km	Shyfer	0.98	9.9	2.6	11.6	2.4	5.0
		Delft3D	0.99	5.9	-13.3	1.9	-5.8	-2.4
Sevilla	79.4 km	Shyfer	0.99	11.0	4.7	-4.8	36.1	-2.0
		Delft3D	0.99	9.7	-3.3	-5.9	37.0	-2.5

1.2.- Inter-comparación de modelos. 1.- Nivel.

La Figura 1.4 muestra las diferencias entre las constantes armónicas calculadas a partir de las predicciones de los modelos DELFT3D y SHYFEM. A esta diferencia se le ha asignado una incertidumbre Δ_{DIF} calculada como

$$\Delta_{DIF} = \sqrt{\Delta_{DELFT3D}^2 + \Delta_{SHYFEM}^2}$$

donde $\Delta_{DELFT3D}$ y Δ_{SHYFEM} son las incertidumbres asociadas a las constantes armónicas calculadas con las salidas de los modelos DELFT3D y SHYFEM, respectivamente.

La comparación tiene matices redundantes con lo que se observa en las Figuras 1.2 y 1.3, por lo que solamente se presentan los resultados para las dos constituyentes mareales más relevantes, la principal lunar (M2) y solar (S2), ambas de la especie semidiurna. Puede verse que, dentro del intervalo de incertidumbre asociado, no existe diferencia significativamente distinta de cero para las amplitudes en toda la parte navegable del estuario (aguas abajo de Sevilla) y sí se observa una pequeña diferencia de no más de 5cm en las proximidades de la cabecera. Exceptuando esta zona de nulo interés para la navegación, ambos modelos producen las mismas amplitudes en el resto del estuario.

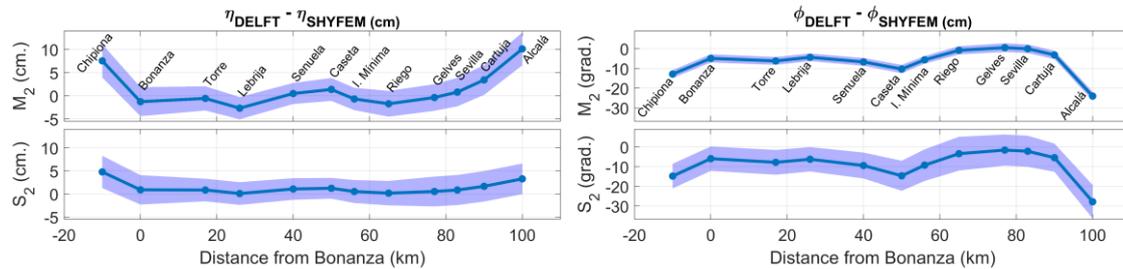


Figura 1.4 - Diferencia de amplitud para las constituyentes M2 y S2 calculada con los modelos DELFT3D y SHYFEM (paneles izquierdos) y de fases (paneles derechos). Se indican las localidades donde hay observaciones (ver Figura 1.2).

Sí hay una pequeña diferencia en las fases, siendo las del modelo DELFT3D ligeramente inferiores a las del SHYFEM, en la parte central del estuario en particular, donde alcanzan 10° (equivalente a 20min en tiempo). Hacia la desembocadura y hacia Sevilla, las diferencias se reducen a 5° (10min). Es complicado decir qué modelo se ciñe mejor a las observaciones (Figuras 1.2 y 1.3), pues depende de la zona de interés. En todo caso, las diferencias son irrelevantes por la incertidumbre temporal (decenas de minutos) con la que, por causas diversas, ocurren en el mundo real las pleamares/bajamares. Por ello, las diferencias de fase en la Figura 1.4 no son significativas y lo dicho para las amplitudes es extensible a las fases. Se concluye que la predicción de nivel astronómico de ambos modelos es la misma y que la sustitución de uno por otro en el estudio dinámico del estuario no produce menoscabo en la calidad de la predicción.

1.3.- Inter-comparación de modelos. 2.- Corrientes.

Antes de presentar los resultados de la inter-comparación de datos de corriente, es necesario hacer un par de aclaraciones. Físicamente, la variación del nivel del río en cada punto depende del flujo de agua que llega a ese punto. El flujo es el producto de la corriente a través de la sección por la superficie de ésta. Para un flujo completamente barotrópico (la velocidad no varía con la profundidad), el transporte $Q(t)$ instantáneo se calcula según:

$$Q(t) = \sum_{m=1}^M u(t, m) \cdot w(m) \cdot h(t, m)$$

donde $u(t, m)$ es la componente longitudinal de la corriente en el instante t y en la celda m , $w(m)$ es el ancho de la celda y $h(t, m) = h'(m) + \eta(t)$ es su altura, que es la suma de un término independiente del tiempo $h'(m)$ (batimetría de la celda en ese punto, ver Figura 1.5) más la oscilación vertical de la superficie, $\eta(t)$, que depende del tiempo y es la misma para todas las celdas de la sección. El sumatorio se extiende a las M celdas de la sección.

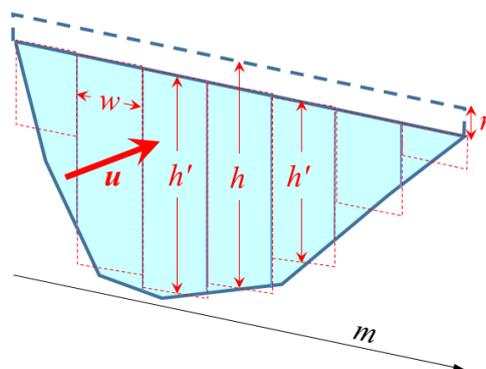


Figura 1.5 - Esquema ilustrativo para el cálculo de flujo $Q(t)$ en el estuario. El trazo azul muestra la batimetría de la sección en tanto que los rectángulos discontinuos en rojo indican su discretización numérica en el modelo. Cada celda "m" tiene su propia batimetría $h'(m)$ a la que se añade la contribución $\eta(t)$, igual para todas.

La oscilación $\eta(t)$ se despeja de las anteriores relaciones y puede ser escrita como

$$\eta(t) = \frac{Q(t) - \sum_{m=1}^M h'(m) \cdot u(t, m) \cdot w(m)}{\sum_{m=1}^M u(t, m) \cdot w(m)}$$

Considerando el muy buen acuerdo de nivel $\eta(t)$ en ambos modelos (Sección 1.2), acuerdo que ha de tenerlo también el flujo $Q(t)$ por continuidad de volumen, y que la batimetría h' de la sección transversal en los dos modelos es muy similar, cuando no idéntica, el producto $u \cdot w$ en la anterior ecuación también debe serlo. Y por ello, u . Sin embargo, la geometría y la arquitectura del mallado de ambos es muy distinta (Figura 1.1) lo que hace que la anchura w de las celdas que componen la sección sea distinta. De hecho, mientras que DELFT3D tiene una distribución muy regular de celdas a lo ancho del río y una anchura prácticamente constante, en SHYFEM el tamaño de los triángulos varía mucho y presentan anchuras muy variables. Como la escala espacial de variación de la corriente es sustancialmente menor en la dirección transversal que en la longitudinal, pequeñas diferencias espaciales en la ubicación del punto del mallado en uno y otro modelo conllevan variaciones en el tamaño de la velocidad de corriente, que pueden ser relevantes. Es una razón por la que pueden surgir discrepancias entre ambos modelos.

La Figura 1.6 muestra los resultados del análisis armónico de la componente longitudinal de la velocidad para las dos constituyentes más importantes de la marea semidiurna, M2 y S2. Los dos modelos producen el mismo patrón espacial (panel superior izquierdo, Figura 1.6), con un aumento de amplitud desde la desembocadura hasta alcanzar un primer máximo local a unos 10km aguas arriba de Bonanza para luego descender muy ligeramente antes de llegar a un segundo máximo local a unos 35km de Bonanza, en las cercanías de Señuela (ver Figura 0). A partir de ese punto, la amplitud decrece monótonamente, como es esperable ya que el prisma mareal disminuye a medida que se remonta el estuario. Las fases (panel superior derecho) muestran un muy buen acuerdo e ilustran inequívocamente el mismo patrón de onda progresiva que las fases de la oscilación de la superficie (Figuras 1.2 y 1.3).

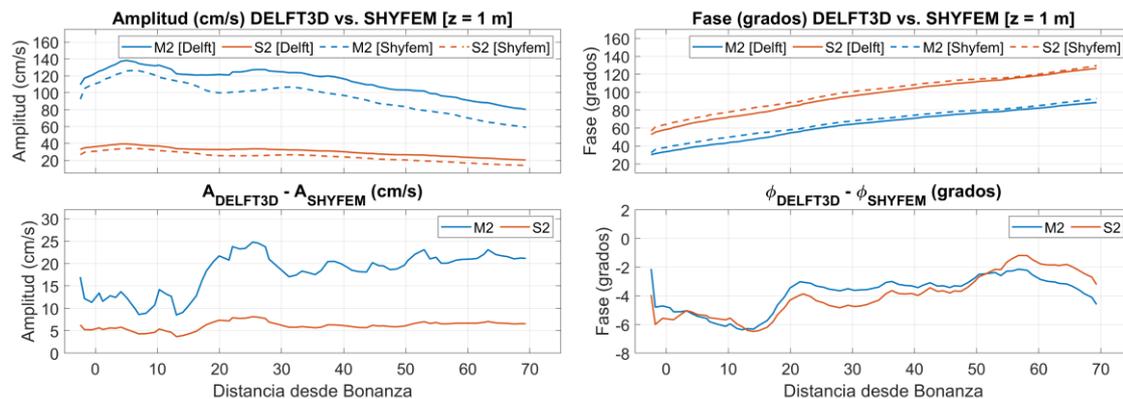


Figura 1.6 - Paneles superiores: Amplitud (izquierda) y fase (derecha) de M2 y S2 de la corriente longitudinal producidas por ambos modelos (ver leyenda). Paneles inferiores: diferencias de amplitud (izquierda) y fase (derecha) de los dos modelos para esas mismas constituyentes. Los valores de amplitud y fase se han calculado en una serie de puntos localizados en el canal de navegación a lo largo del estuario.

El modelo DELFT3D proporciona valores de amplitud de M2 sistemáticamente mayores que el SHYFEM, alrededor de 10cm/s los primeros 15 km para aumentar hasta alrededor de 20cm/s en el resto del estuario (panel inferior izquierdo, Figura 1.6). El mismo patrón puede aplicarse a S2 aunque la diferencia es menor (unos 5cm/s) y más pareja en todo el cauce. La fase, además de más similar en ambos, muestra una variación espacial mucho más suavizada. En este caso, DELFT3D siempre produce una fase ligeramente inferior de unos 4° (8min en tiempo, ver panel inferior derecho).

La comparación de corrientes entre los dos modelos no muestra el mismo grado de concordancia que la del nivel, aunque esta conclusión debe matizarse. En primer lugar, la falta de acuerdo se refiere sólo a las amplitudes, no a las fases. De hecho, éstas concuerdan mejor en el caso de las corrientes (panel inferior derecho, Figura 1.6) que en el de los niveles (paneles derechos, Figura 1.4). Puede sorprender este resultado a la vista del comportamiento más dispar de las amplitudes (paneles izquierdos, Figura 1.6), pero hay una explicación simple: en tanto que en una sección dada el tamaño de la velocidad puede variar bastante de un punto a otro situado a escasos metros en la dirección transversal, la fase no lo hace. Con independencia del tamaño de la velocidad, la inversión mareal de corriente ocurre simultáneamente en una sección dada, lo que produce el mismo valor de fase en todos los puntos de la sección. Aunque los puntos de malla usados para comparar no coincidan en la misma posición geográfica en uno y otro modelo, ello no repercutirá en la fase siempre y cuando estén en la misma sección. Pero esto no puede aplicarse a la velocidad, que puede diferir bastante si los puntos no son coincidentes, como se ha comentado anteriormente.

Una segunda razón por la que las amplitudes pueden diferir radica en la propia arquitectura del mallado. DELFT3D tiene una malla que está ajustada en todo lugar a la orientación local del estuario (ver Figura 1.1), por lo que la componente longitudinal de la velocidad surge de forma natural como una de las dos componentes del vector directamente calculado por el modelo. SHYFEM produce velocidades orientadas en las coordenadas geográficas “este” y “norte” debido al mallado no-estructurado triangular con que trabaja. Esas velocidades deben ser rotadas para obtener la componente longitudinal a comparar, y pequeñas imprecisiones en el ángulo de giro local puede originar diferencias. Este hecho, junto con la mayor homogeneidad de tamaño y orientación de celdas que tiene DELFT3D, dota a este último modelo de ventajas operativas frente a SHYFEM, que han sido tenidas en cuenta por GOFIMA a la hora de sustituir un modelo por el otro.

La pregunta obvia es, ¿cuál de los dos modelos produce mejores valores de velocidad? La respuesta no es fácil. La pequeña campaña realizada por GOFIMA en mayo de 2021 para validar datos de los modelos (ver Capítulo 2 del informe) indica un magnífico acuerdo de los datos observados con los modelados por DELFT3D (Figura 2.3), pero el acuerdo no es menos bueno con SHYFEM (datos no mostrados). Lo argumentado en el párrafo anterior inclina la balanza a favor de DELFT3D¹ aunque, de momento, la cautela aconseja prudencia y asumir como conclusión provisional que tanto uno como otro modelo producen resultados compatibles de velocidad en el canal de navegación y que la coherencia entre ambos es suficiente para que la elección de uno u otro no afecte a la planificación de la navegación en el estuario.

¹ La validación pendiente de hacer con nuevos datos recogidos por TECNOAMBIENTE en verano de 2021 (Anexo 1) arrojará luz sobre este punto y permitirá decidir cuál de los dos modelos proporciona mejores valores de velocidad.

2. Pre-validación del modelo baroclino en función de los datos disponibles.

La inter-comparación de las salidas DELFT3D y SHYFEM del Capítulo 1 justifica el uso de uno de los modelos exclusivamente. Por razones prácticas relacionadas con la implementación del sistema operacional contemplada en el presente contrato, el modelo más adecuado para seguir avanzando en los estudios del estuario es DELFT3D, que será el objeto de validación baroclina. La tarea requiere disponibilidad de series temporales de cierta longitud y buena calidad en el estuario, preferiblemente en el canal de navegación que es su núcleo, que no abundan. En particular en lo concerniente a velocidades y, en menor medida, a salinidad. La temperatura es otra fuente de información útil, pero a un nivel más bajo que las anteriores.

Recientemente, se han realizado campañas de medida para recoger información de calidad contrastada con el objetivo de calibrar/validar el modelo. La APS las ha diseñado en colaboración con TECNOAMBIENTE, que las llevó a cabo en los meses de julio a septiembre de 2021 desplegando instrumentación en tres puntos diferentes del estuario para medir el perfil vertical de velocidad horizontal con ADCPs (Acoustic Doppler Current Profiler) y la temperatura y salinidad de las aguas. Los datos los ha recibido GOFIMA recientemente y se encuentran en estado de depuración, control de calidad y procesamiento para emplearlos en la validación del modelo. La tarea se completará a lo largo de los próximos meses y se expondrá en el Informe nº 3 a entregar en junio de 2022. El ANEXO 1 es un informe preliminar de los datos recogidos en esta importante campaña. Previamente a ella, GOFIMA realizó otra intensiva de tres días en mayo de 2021 (Figura 2.1) cuyos principales resultados figuran en el ANEXO 2 de este informe. Con estos datos se ha llevado a cabo una validación preliminar del modelo en forma de comparación visual, ya que su brevedad no permite ir más allá de dicha comparación.



Figura 2.1 - Fragmento del estuario donde se llevó a cabo la campaña GOFIMA de mayo 2021 con indicaciones de los nombres de las tres secciones que se mencionan en el texto y la estrategia de estaciones de muestreo en cada una de ellas. (Figura importada del ANEXO 2).

2.1.- Validación de corrientes, campaña GOFIMA de mayo de 2021.

La Figura 2.2 muestra el diagrama de Howmøller de la corriente rotada a lo largo del eje longitudinal del río para los datos medidos en la posición donde se fondeó el ADCP en la campaña (Queipo, ver Figura 2.1) y simulados por el modelo DELFT3D en el punto de mallado más cercano al punto de fondeo. En el caso de los datos modelados, al estar orientado el mallado del modelo paralelamente al eje del río (ver Figura 1.1), no es necesaria rotación alguna, y la corriente considerada es directamente la componente longitudinal del mismo.

El modelo DELFT3D trabaja con coordenadas sigma en la vertical que reparten toda la columna de agua en capas de espesor relativo constante respecto al espesor total de la columna de agua. Al variar ésta con la marea, también lo hacen los espesores absolutos de las capas, y por lo tanto, la posición vertical a la cual se asigna la velocidad producida por el modelo (ver líneas negras en el panel inferior de la Figura 2.2). Las observaciones del perfilador de corriente, por el contrario, son siempre fijas relativas a la posición del instrumento, es decir, en cotas verticales relativas al fondo constantes. Para poder realizar una comparación directa entre ambas variables, los resultados producidos por el modelo deben ser interpolados.

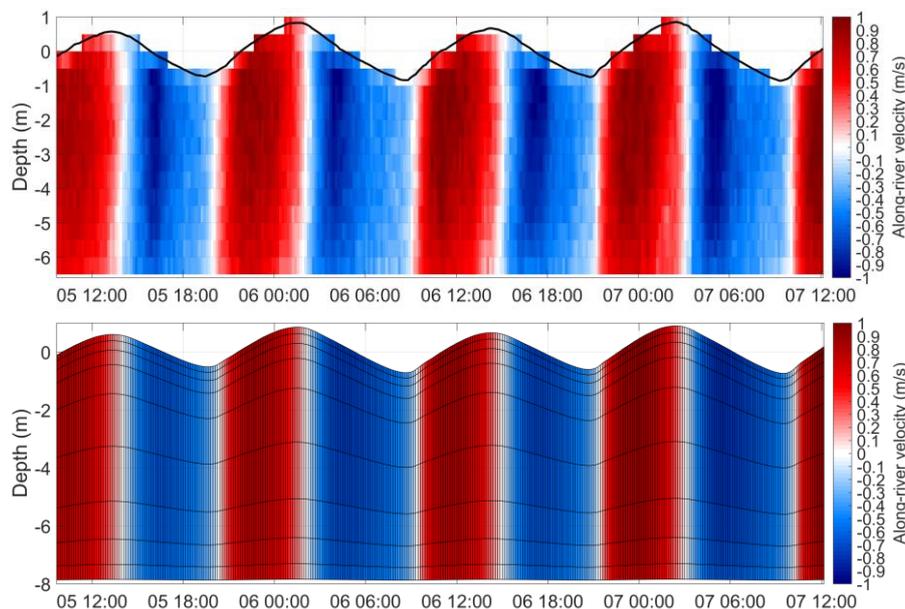


Figura 2.2 - Diagramas Howmøller de corrientes observada (panel superior) y modelada (panel inferior) a lo largo del estuario, referidas a la escala de la derecha. Tonos rojos indican corriente hacia la cabecera del estuario, azules, hacia la desembocadura. La superficie libre medida por el ADCP está dibujada con línea negra en el panel superior. Las líneas negras ondulantes del panel inferior representan los espesores fluctuantes de los niveles sigma del modelo (ver texto).

La comparación visual de los paneles de la Figura 2.2 es muy satisfactoria, con el modelo reproduciendo correctamente tanto los tamaños de las corrientes como la pauta de evolución temporal. La Figura 2.3 ilustra mejor lo anterior al comparar directamente en cinco niveles de profundidad la componente longitudinal de velocidades observada y modelada, ésta última interpolada en la vertical para corregir el efecto de las coordenadas sigma. Además de confirmar lo mostrado en la Figura 2.2, revela otro detalle de interés como es el que la pauta de la dinámica mareal es asimétrica, con la fase llenante (corriente positiva hacia la cabecera) más corta que la vaciante, típica de muchos estuarios.

Se observa algún pequeño desajuste en la capa de fondo que tendrá que ser mejor evaluado y tratado en su caso cuando se analicen las series temporales más largas de las campañas de TECNOAMBIENTE. La duración de la campaña de mayo de 2021, apenas 3 días, es

insuficiente para tomarla de referencia para ajustar el modelo. Esta misma razón desaconseja hacer comparaciones cuantitativas de corriente basadas en análisis armónico y no se presentan resultados de ella, posponiéndolas para próximos informes. Con independencia de ello, las comparaciones visuales que permiten las Figuras 2.2 y 2.3 sugieren un comportamiento excelente del modelo en lo referente a corrientes también.

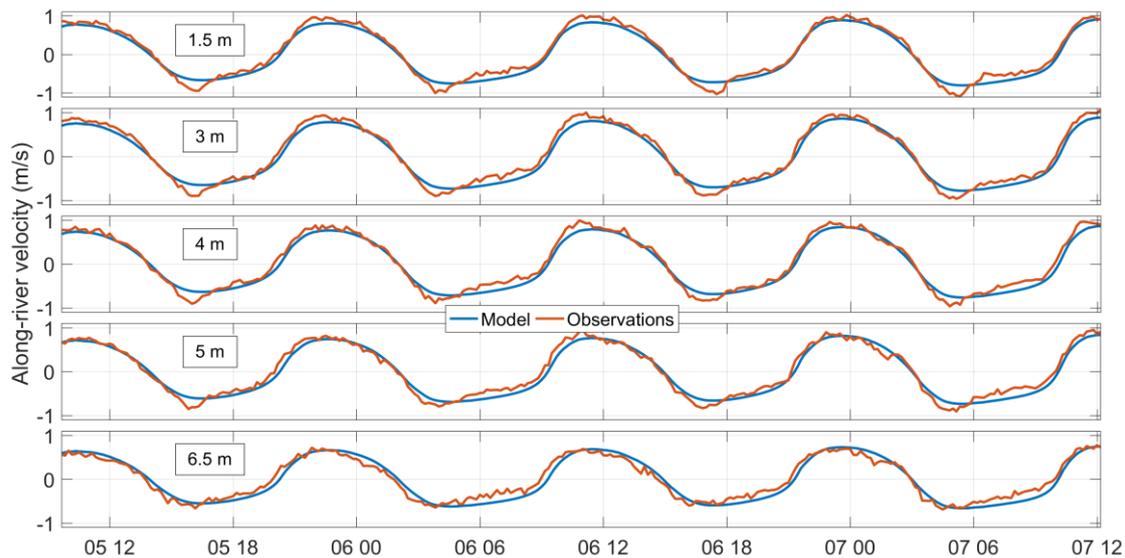


Figura 2.3 - Corrientes observadas y modeladas (DELFT3D) a lo largo del eje del estuario durante la campaña GOFIMA de mayo de 2021 en 5 niveles fijos. En el eje de abscisas se indica el día del mes de mayo y la hora de las observaciones.

2.2.- Validación de salinidad, campaña GOFIMA de mayo de 2021.

Solamente se presenta aquí la comparativa de las observaciones disponibles con las salidas del modelo DELFT3D. La serie de salinidad medida por el sensor colocado en la estructura del ADCP no es buena debido a una posible colmatación del sensor con sedimentos (ver ANEXO 2). La comparación no puede hacerse con el grado de detalle con que se ha hecho para la velocidad debido a la falta de una serie temporal similar, sino con las series de los sensores CT-HOBO desplegados durante periodos inferiores a medio día en las tres secciones investigadas que se indican en la Figura 2.1 (ver ANEXO 2 también).

La Figura 2.4 muestra los resultados de estas comparaciones. La sección de Queipo (panel superior) es la que presenta salinidades más bajas y menor rango de variabilidad por ser la más alejada del océano. Un rango así favorece discrepancias con los valores modelados. Además, también ocurre que el modelo no ha incluido en estas simulaciones de validación los posibles efectos y consecuencias de la política de captación de aguas de los arroceros. Aunque se intentó realizar la campaña oceanográfica antes de que comenzase la de los arroceros, finalmente no se logró que así fuera, y a fecha del comienzo de aquella, ya había campos de arroz inundados. El Capítulo 3 del informe retoma esta cuestión y hace una primera valoración de las consecuencias de esta circunstancia en las fluctuaciones de salinidad en la parte media del estuario.

Volviendo a la comparación que atañe, el modelo en Queipo subestima los valores observados en torno a 0.8 PSU. Si se añade esta cifra, la salinidad modelada reproduce bastante bien la evolución temporal de las observaciones (panel superior, Figura 2.4), aunque con un rango de oscilación algo menor. En la sección de Vetalapalma (panel central) el modelo presenta

un bias similar a la sección de Queipo: ha de sumarse 0.8 PSU a las salinidades modeladas para obtener una serie directamente comparable con las observaciones. El modelo da una pequeña diferencia entre las orillas en esta sección, pero de distinto signo a la que insinúan las observaciones. Es importante notar que en esta sección las series son las más cortas de las tres, apenas tres-cuatro horas, lo que reduce el rango de variabilidad temporal de las observaciones y reduce su aplicabilidad a efectos de validación. Finalmente, la sección de Torre tiene el mayor rango de variabilidad de las tres secciones analizadas por ser la más cercana a la desembocadura y la que presenta mejor coincidencia entre observaciones y datos modelados. Éstos no presentan los bias que se detectaron en las otras dos secciones y captan muy satisfactoriamente la variabilidad mareal de las series observadas.

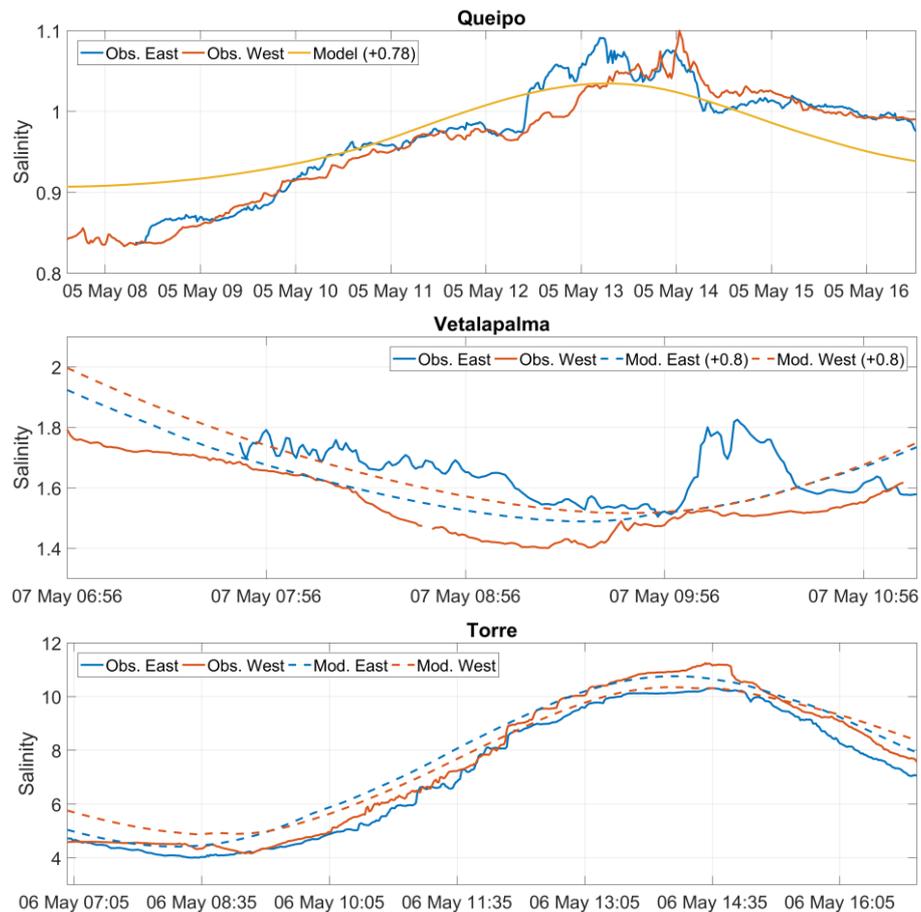


Figura 2.4 - Salinidad medida en las orillas de las tres secciones muestreadas (Queipo, arriba; Vetapalma, centro; Torre, debajo). Ver Figura 2.1 para ubicación y predicciones hechas por el modelo. En las dos primeras, la salinidad del modelo se ha incrementado en 0.78 PSU y 0.80 PSU para facilitar la comparación. En la sección de Queipo el modelo no da diferencias de salinidad entre las dos orillas y sólo se muestra en una de ellas.

Además de las observaciones recogidas por los sensores autónomos HOBO, se hicieron perfiles CTD (ver ANEXO 2) que permiten generar series temporales y analizar la estructura vertical de la salinidad. Para ello se ha escogido el punto más profundo de la sección, buscado el perfil vertical de CTD más cercano a éste en todos los transectos realizados en ella y anotado su instante de realización. Se genera así una serie temporal de perfiles CTD observados con intervalo de muestreo no constante. A la vez, se ha escogido el punto de malla más próximo a ese punto más profundo y extraído una serie temporal a intervalos regulares de 10min para generar otra serie similar de perfiles virtuales modelados. Ambas series se presentan como diagramas de color en la Figura 2.5. Sobre esos diagramas se ha representado el valor promedio vertical de la salinidad de ambas series.

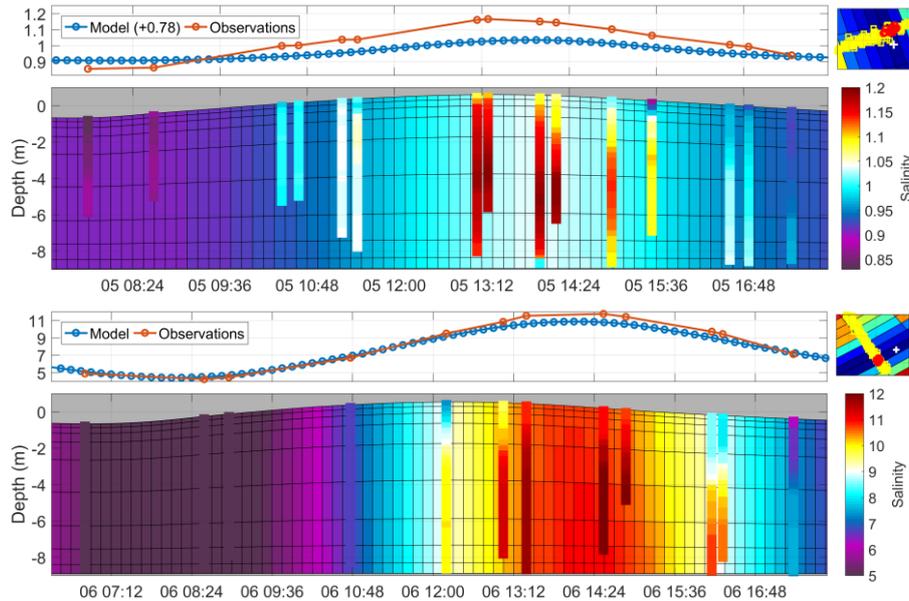


Figura 2.5 - Panel superior: Salinidad en función de la profundidad y del tiempo, $S(z,t)$, según la escala de color de la derecha, producida por el modelo en los instantes indicados en el eje de abscisas (tiempo en formato dd hh:mm del mes de mayo) a partir de datos modelados en el punto más profundo de la sección de Queipo (ver Figura 2.1). Se han superpuesto perfiles de CTD reales obtenidos en esos mismos momentos en ese punto. Sobre el dibujo de contornos se muestra la serie temporal de valores promediados verticalmente para el modelo a la que se le ha añadido un bias de +0.78 PSU (línea y símbolos azules), y observaciones (líneas y símbolos rojos). Panel inferior: misma información para la sección de Torre, donde no se ha sumado bias alguno en los promedios verticales.

El panel superior de la Figura 2.5 confirma lo dicho sobre la salinidad en Queipo que, además del bias de 0.78 PSU comentado, presenta una modulación mareal más baja que la proporcionada por las observaciones. El incremento paulatino de salinidad con la marea llanante en la serie de observaciones es sólo parcialmente reproducido por el modelo. En cambio, en Torre (panel inferior), donde el rango de variabilidad de la salinidad es más marcado, el modelo presenta mucha mejor concordancia. El ciclo de marea es reproducido muy satisfactoriamente y solo se aprecia cierta subestimación en los máximos correspondientes a la pleamar. La superposición de los perfiles reales de CTD en el dibujo de contornos de color de los perfiles virtuales en ambas secciones confirman los anteriores comentarios, pero también indican que el modelo no capta del todo el pequeño gradiente salino que recogen los perfiles CTD reales.

Aunque este ejercicio de validación es de alcance limitado por la brevedad de las series disponibles, los resultados preliminares permiten ser optimistas respecto a la buena *performance* del modelo. El motivo de mayor preocupación sería la pequeña deriva de salinidad (inferior a 1 PSU) que produce el modelo respecto a los valores observados en la parte central del estuario y que estaría relacionada con la política de uso de agua para regadío, que debe ser modelada e incorporada al modelo de alguna forma, y no del modelo en sí. El Capítulo 3 y los resultados que allí se presentan confirman esta hipótesis.

2.3.- Temperatura

La temperatura es una variable que tiene interés sólo marginal a la hora de emplearla en tareas de calibración de un modelo baroclino. No tiene la importancia que tiene la salinidad. La razón es que el océano es la única fuente de sal en el estuario, a dónde llega movida por la dinámica mareal. Su distribución espacial en él está por lo tanto claramente vinculada a la hidrodinámica, que es el aspecto fundamental del modelado numérico. De ahí su interés. La temperatura, cuya distribución espacial resulta de intercambios de calor con la atmósfera

principalmente, tiene sus principales variaciones en los ciclos de calentamiento solar (diurno y, especialmente, estacional) que en el modelo dinámico a través de condiciones de contorno en la superficie. Localmente, la fuente de calor (i.e., temperatura) puede ser tanto continental (en verano especialmente, donde las aguas en la parte alta del estuario son más cálidas que las oceánicas en las proximidades de la desembocadura) u oceánica (invierno, cuando el océano está más cálido). En el primer caso, los picos locales de temperatura se alcanzan al final de la marea vaciante, en el segundo, al final de la creciente. Puesto que la salinidad tiene siempre origen oceánico, la temperatura tiende a ir en fase con ella en invierno y en antifase en verano (García Lafuente *et al.*, 2012), proporcionando en uno y otro caso información redundante.

A efectos de validación dinámica, la salinidad y la temperatura funcionan como trazadores pasivos. Dada su redundancia como trazadores y que la salinidad resulta ser más conservativa, se ha optado por no hacer tareas de validación a escala mareal basadas en la temperatura. Se reserva para hacerlo en escalas temporales más largas, básicamente la estacional, tras incorporar totalmente al modelo los intercambios de energía (calor) con la atmósfera. Se abordará el tópico en posteriores informes.

3. Esquema conceptual y descriptivo del uso del agua en el estuario para labores agrícolas (arrozales)

3.1.- El problema de la salinidad en la zona media del estuario

Un hecho ya señalado por GOFIMA (GOFIMA, 2018) es la falta de acuerdo entre lo esperado del alcance de la cuña salina en respuesta a las descargas de la presa de Alcalá del Río y su posición real en el periodo estival (ver Figura 4.3.4 y comentarios en GOFIMA, 2018). La discrepancia tiene su origen en el uso del agua durante la campaña de cultivo del arroz entre mayo y septiembre aproximadamente. Durante este periodo las descargas de agua desde la presa se incrementan para el regadío de los campos de arroz. O, en el peor de los casos, no disminuyen (ver Figura 3.1 y explicaciones allí).

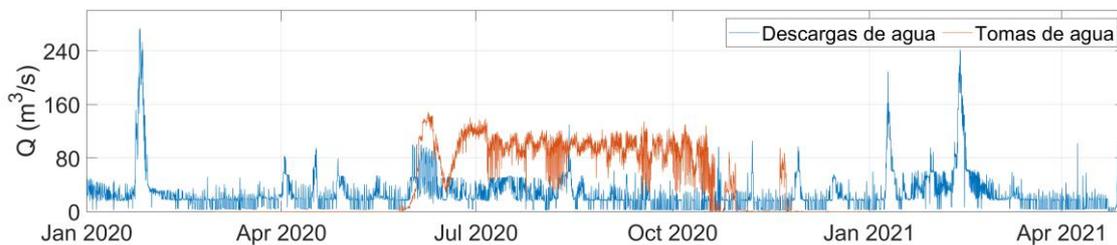


Figura 3.1 - Descargas en la presa de Alcalá del Río desde enero de 2020 a abril de 2021 (línea azul) y caudal extraído en las tomas de agua para regadío (línea roja), según datos de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Las descargas aumentan considerablemente en junio de 2020, al inicio de la campaña arrocera y, en promedio, se mantiene con valores por encima de la media durante buena parte del verano. Hacia el final de esta estación vuelve a tomar valores típicos del resto del año (excepto en los picos de descargas).

Si no se impone ninguna condición o uso de esta agua, el modelo simplemente entiende que los aportes de agua dulce son o bien mayores, en cuyo caso fuerzan la retirada de la cuña salina hacia la desembocadura (o, equivalentemente, la disminución de la salinidad media en puntos fijos del estuario), o se mantiene, en cuyo caso los valores de salinidad también lo harán. Sin embargo, la realidad es que la cuña salina en la parte media del estuario progresa aguas arriba y hace que la salinidad aumente allí.

La explicación a esta paradoja es sencilla. Grandes volúmenes de agua dulce (de baja salinidad, en realidad) son extraídos aguas arriba de la zona arrocera (Puebla del Río, Mármol, I. Mínima, etc., ver Figura 3.2) para regar los arrozales. La Figura 3.1 muestra que el caudal extraído supera incluso el liberado por la propia presa durante buena parte de la campaña². Una gran parte del caudal extraído es posteriormente devuelto al estuario aguas abajo de los arrozales³ con sus propiedades alteradas. Con referencia al modelo hidrodinámico, las dos alteraciones con influencia en las salidas son: (i) una reducción del volumen retornado frente al captado debido a la evaporación en las tablas y a la absorción para el crecimiento de las plantas, y (ii) la salinidad de las aguas retornadas aumenta debido a ambos fenómenos, a la evaporación

² La Figura 3.1 muestra la descarga de agua dulce de la presa de Alcalá del Río exclusivamente. Puede verse incrementada por la proveniente de otras presas reguladas, como la del Gergal. Los datos de extracciones han sido tomados tal cual son presentados por la CHG y puede que no sean precisos, con lo cual las diferencias sustanciales entre agua desembalsada y extraída que se ven en la figura pueden no ser muy fiables. Independientemente de ello, la posibilidad de que se extraiga más agua de la que se descarga es real.

³ El caudal retornado no está representado en la Figura 3.1. Por ello, lo representado en la figura no implica necesariamente inconsistencia en cuanto a conservación de volumen.

en particular. En tanto que no se parametrize de forma cuantitativa este proceso, el modelo no reproducirá el comportamiento de la cuña salina observado. La progresión de la marea o las corrientes asociadas no se ven particularmente afectadas, por lo que no hay motivo para discriminar la estación estival para estos fenómenos.



Figura 3.2 - Mapa de la parte media de la margen derecha del estuario (Fuente: Federación de Arroceros de Sevilla).

3.2.- Aproximación al problema.

El modelo conceptual más simple para abordar el problema es el esquematizado en la Figura 3.3. En un lugar aguas arriba de las tablas de arroz se extrae un flujo de agua Q . El caudal extraído excede la cantidad de agua dulce liberada por la presa de Alcalá del Río (cuyo valor aproximado rondaría los 40-50 m^3/s de acuerdo con los datos históricos existentes tanto en la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir como en la Federación de Arroceros), tal y como sugiere la Figura 3.1. La razón del aumento es que la salinidad del flujo extraído no es cero (agua dulce) pues el agua retirada ha sufrido mezcla con las aguas residentes en el estuario. Una fracción del caudal extraído es devuelto al estuario aguas abajo de la toma de extracción. Esa agua retornada tiene una salinidad algo mayor debido a la evaporación y absorción de agua dulce mientras ésta permanece en los arrozales.

Los arroceros, familiarizados con este proceso de riego, manejan cifras empíricas sobre las magnitudes de retorno de esas variables. Respecto al flujo, se estima que se devuelven al río 3 de cada 4 partes extraídas para riego. La estima es más difícil respecto a la salinidad, pues al incremento producido por la concentración de sal debida a la evaporación se añade la eventual aportación proveniente del lavado del terreno. Un aumento de salinidad en torno a $\Delta S=1-2$ PSU es una cifra razonable.

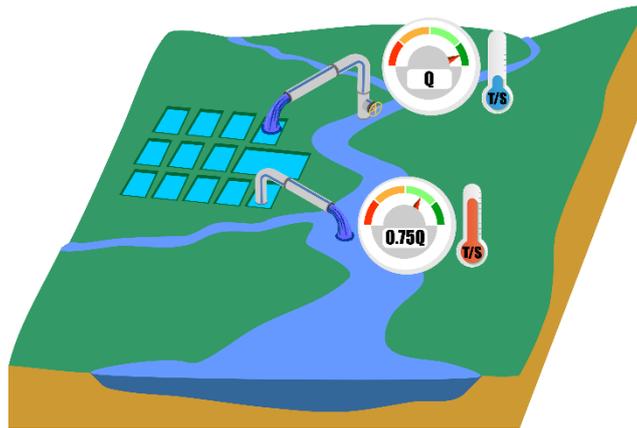


Figura 3.3 - Esquema conceptual del uso de agua para riego de las tablas de arroz. En un punto aguas arriba de la zona de arrozales se extrae un flujo Q , el 75% del cual se retorna aguas abajo con salinidad y temperatura ΔS y ΔT superiores a las del agua extraída, respectivamente.

3.3.- Algunos resultados preliminares.

La Figura 3.4 ilustra la forma en que se ha abordado el problema. En una primera simulación, el modelo sólo incluye las descargas en la presa de Alcalá del Río. La salinidad modelada es mucho más baja que la medida (paneles de la izquierda, Figura 3.4), consecuencia del ya mencionado arrastre de la cuña salina hacia la desembocadura producida por la descarga mantenida. En los paneles centrales se aprecia el exagerado aumento de la salinidad en los puntos considerados si al modelo se le añaden las extracciones reportadas (línea naranja, Figura 3.1). El claro exceso de agua extraída frente a aportada aguas arriba de esos puntos equivale a “descargas negativas”, o sea, retiradas considerables de agua dulce (cf., Figura 3.1) que obligan a las aguas oceánicas a progresar estuario arriba invadiéndolo con aguas salinas oceánicas. Los paneles derechos muestran, finalmente, los resultados cuando el modelo incorpora el esquema conceptual de retorno del 75% del caudal retirado en puntos de la malla situados aguas abajo del de extracción y se incrementa artificialmente su salinidad en $\Delta S=1.5$ PSU. El acuerdo obtenido en este caso es muy satisfactorio (ver también detalle en la Figura 3.5).

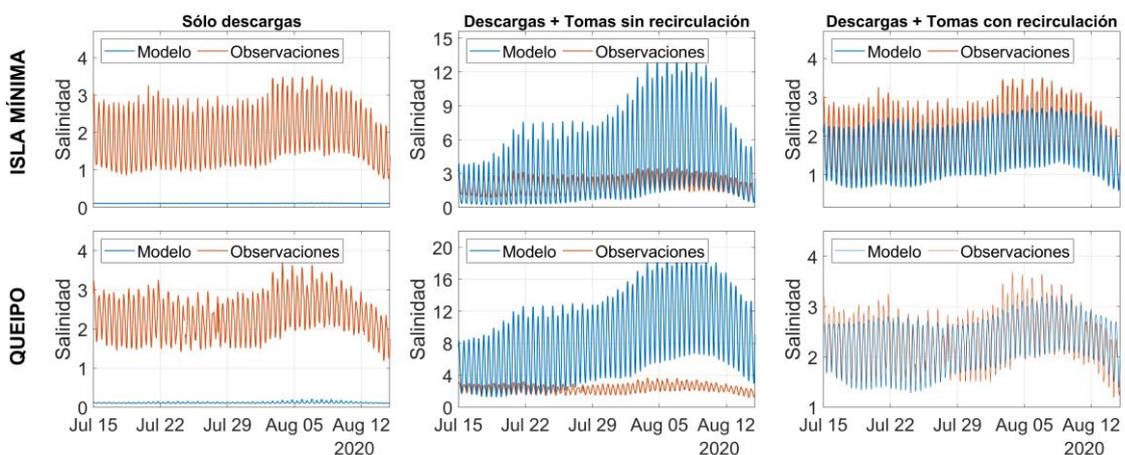


Figura 3.4 - Comparación entre observaciones (línea naranja, datos del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), perteneciente a la CHG) y datos producidos por el modelo (línea azul) en dos puntos de la parte media del estuario en tres situaciones de uso de agua. Izquierda: el modelo solamente incluye las descargas en la presa de Alcalá del Río (cf., línea azul de la Figura 3.1). Centro: el modelo incluye las descargas anteriores y las extracciones (cf., línea naranja en Figura 3.1). Derecha: además de los dos anteriores, el modelo incluye también el esquema conceptual de retorno explicado en la Sección 3.2.

Conviene hacer notar aquí que la falta de acuerdo entre valores de salinidad modelados y observados en las secciones de Queipo y Vetalapalma durante la campaña oceanográfica de mayo de 2021 (Sección 2.2, capítulo anterior) puede tener su origen en este uso de aguas para regadío. Se intentó realizar la campaña oceanográfica antes del inicio de la de regadío de los arrozales, pero no fue del todo posible. Aunque no en todo su apogeo, a fecha de inicio de la campaña había diversas tablas inundadas, lo que podría explicar al menos parcialmente el bias de 0.8 PSU reportado en ambos lugares (Figura 2.4).

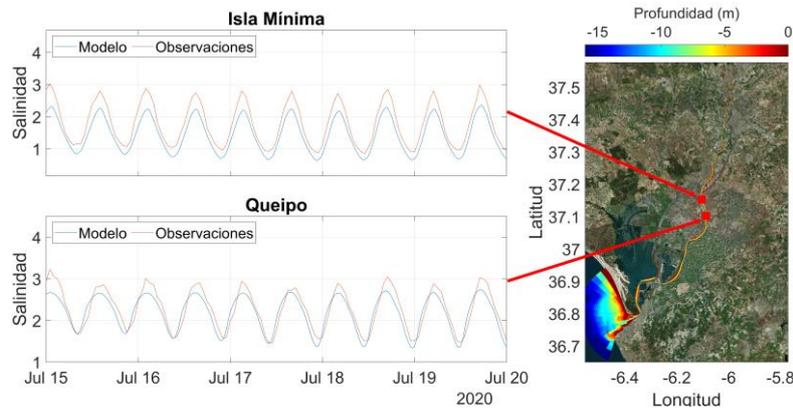


Figura 3.5 - Ampliación del periodo de los cinco días iniciales de la serie mostrada en los paneles derechos de la Figura 3.4. El mapa localiza los puntos del estuario seleccionados para realizar la comparación.

3.4.- Actuaciones futuras.

La Sección 3.3 muestra que el esquema conceptual de uso de agua para riego que se ha incorporado al modelo funciona satisfactoriamente y acerca los valores modelados y observados entre sí. La primera implementación del esquema hace uso de una única toma de extracción aguas arriba de los campos de arroz, cuando la realidad es que las tomas de agua están repartidas a lo largo del estuario (Figura 3.6; ver también Figura 3.2). Del mismo modo, sólo se ha contemplado un punto de retorno, lo cual tampoco se ciñe a la realidad.

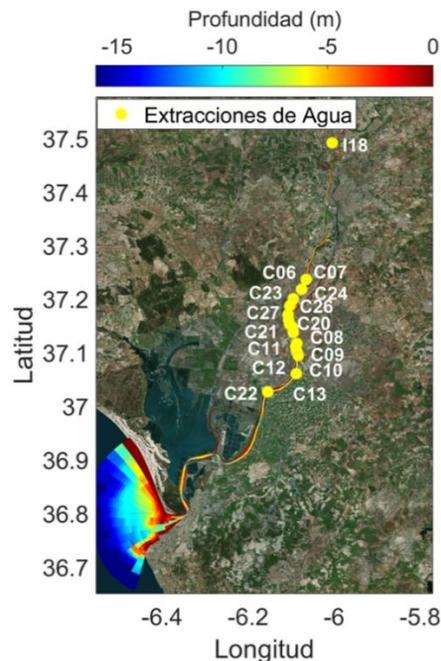


Figura 3.6 - Puntos de extracción de agua para diversos usos en el estuario recogidos en SAIH (CHG). Probablemente, el número real sea bastante mayor.

Las mejoras sucesivas que se contempla implementar en el modelo tienen doble naturaleza. Por un lado, y siguiendo este modelo conceptual, se daría un salto cuantitativo del esquema toma-retorno únicos a esquemas multi-tomas. La aproximación alternativa que se tiene previsto abordar es implementar un esquema de circulación continua de agua que entre por un(os) punto(s) y salga por otro(s), que evite la incorporación de parámetros empíricos y que sea la propia física (evaporación, absorción de agua por las plantas) la que determine la transformación de las aguas mientras residan en las tablas y, por tanto, el caudal y salinidad de salida. Este planteamiento físico no difiere demasiado del que se seguiría para modelar una llanura inundable, aunque las escalas temporales serían diferentes. Los sucesivos informes irán presentando las mejoras que se vayan consiguiendo.

4. Caso de aplicación 1. Comportamiento del tapón salino y del prisma mareal ante dragados de mantenimiento.

El estudio de este caso de aplicación está siendo llevado a cabo actualmente. Se ha elaborado la estrategia y generado los escenarios necesarios para abordar el problema y se han programado ejecuciones del modelo con las batimetrías consideradas, las cuales estarán finalizadas a lo largo del mes de enero de 2022. Por cuestiones de premura de tiempo causada por la demora en la firma del contrato, ha sido necesario postergar el análisis e interpretación de resultados hasta el próximo informe. En el presente se muestran los trabajos previos conducentes a la selección de las batimetrías a comparar consideradas y la estrategia de estudio que se seguirá para abordar el estudio.

4.1.- El problema de las batimetrías.

Analizar las modificaciones que producen los dragados de mantenimiento del canal de navegación en las propiedades y características de determinadas variables hidrodinámicas es una tarea delicada si, como es el caso, las variaciones de batimetría vinculadas al dragado son de naturaleza local y representan una pequeñísima fracción del volumen total del estuario. Se necesita disponer de batimetrías muy precisas pre y post dragado. Aunque lo anterior es una trivialidad en sentido científico, tiene aspectos prácticos que no lo son. El mayor problema surge del hecho de que sólo hasta muy recientemente (posiblemente hasta el año 2021), la zona del estuario de la que se hacía levantamiento batimétrico se reducía al canal de navegación por razones prácticas, técnicas y económicas. Sin embargo, el modelo numérico requiere la batimetría de todo el cauce, que incluye lógicamente la parte no cartografiada de la sección transversal entre el borde del talud del canal de navegación y la ribera.

Las batimetrías implementadas en el modelo han empleado datos proporcionados por la APS en diferentes campañas cartográficas que se centraban en el canal de navegación. GOFIMA ha recurrido a la interpolación lineal entre la profundidad del límite transversal del canal identificable en la nube de puntos facilitada por la APS y la ribera (cota 0), que era identificada mediante otras técnicas como la digitalización de ortofotos. Empleando diferentes conjuntos de datos de los años 2013 y 2016 y este criterio de interpolación, junto con alguna otra modificación más puntual, se ha elaborado la batimetría “base” con la cual se ha venido trabajando en los modelos. En el año 2021, tras los dragados de mantenimiento, la APS realizó una nueva batimetría que sí cartografiaba buena parte de la zona somera del estuario externa al canal de navegación. Esta batimetría sustituirá a la más artificial interpolada que venía siendo usada tradicionalmente y pasará a ser la batimetría base en los futuros estudios.

Ante la disponibilidad de estas dos batimetrías del estuario y con el fin de evaluar el efecto del dragado sobre la dinámica del estuario, se ha considerado la de 2013-16 como la batimetría anterior al dragado del 2021, y la segunda, posterior al mismo. A efectos del caso de aplicación que nos concierne, un problema que surge es que las batimetrías difieren no sólo por el efecto antrópico del dragado, que es lo que interesa analizar, sino también por la mayor precisión en la parte somera de la nueva batimetría. Por ello, las posibles modificaciones que se detecten tendrán cierta incertidumbre sobre su origen, incertidumbre que se reducirá en el futuro cuando se empleen batimetrías que sólo difieran en la parte intervenida en el dragado realizadas antes y después de la actuación (ni mucho antes ni mucho después, lógicamente).

4.2.- Planteamiento del estudio e identificación de algunas zonas de dragado

La Figura 4.1 muestra el mapa del estuario con la batimetría que tiene implementada el modelo actualmente. En él se han señalado tres zonas en las que tradicionalmente la APS realiza dragados de mantenimiento para su estudio.



Figura 4.1 - Mapa de la batimetría que tiene actualmente implementado el modelo hidrodinámico del estuario. Se indican tres zonas (rectángulos rojos) que por sus características se han seleccionado para llevar a cabo el estudio del efecto de los dragados de mantenimiento sobre el prisma mareal y el tapón salino.

En esas tres zonas se ha evaluado la cantidad de sedimento retirado en la campaña de dragado, se ha perfilado la nueva batimetría y comparado con la previa para proporcionar una información visual sobre el alcance de la actuación. Todo ello se muestra en los paneles de la Figura 4.2. Aunque el acumulado de sedimento retirado es una cantidad considerable, la deformación que produce la extracción es de unas decenas de centímetros, cantidad que resulta difícilmente distinguible en las escalas de color que afectan a las batimetrías pre y post dragado (paneles izquierdos y centrales, respectivamente). Por esa razón los paneles de la derecha muestran la diferencia entre ambas batimetrías expresada en términos de metros cúbicos de sedimento extraído por cada celda del modelo (cuya superficie ronda los 5000m^2) y el acumulado total en la región acotada por las líneas verdes y blancas, ver pie de figura).

El ensanchamiento del cauce en la zona de Salinas-Puntalete (paneles superiores, Figura 4.2) es donde tradicionalmente se acumula más sedimento y por tanto de donde más se extrae: del orden de un millón de metros cúbicos en la zona seleccionada (ver pie de figura) deducida

de comparar las batimetrías indicadas⁴. En la zona de la Corta de los Olivillos la cantidad es 10 veces menor aun cuando la longitud del tramo seleccionado es mayor que en Salinas. La razón es que el cauce relativamente angosto allí promueve altas velocidades que limitan la sedimentación. La tercera zona seleccionada, Yeso, se sitúa a mitad de camino de las otras dos.

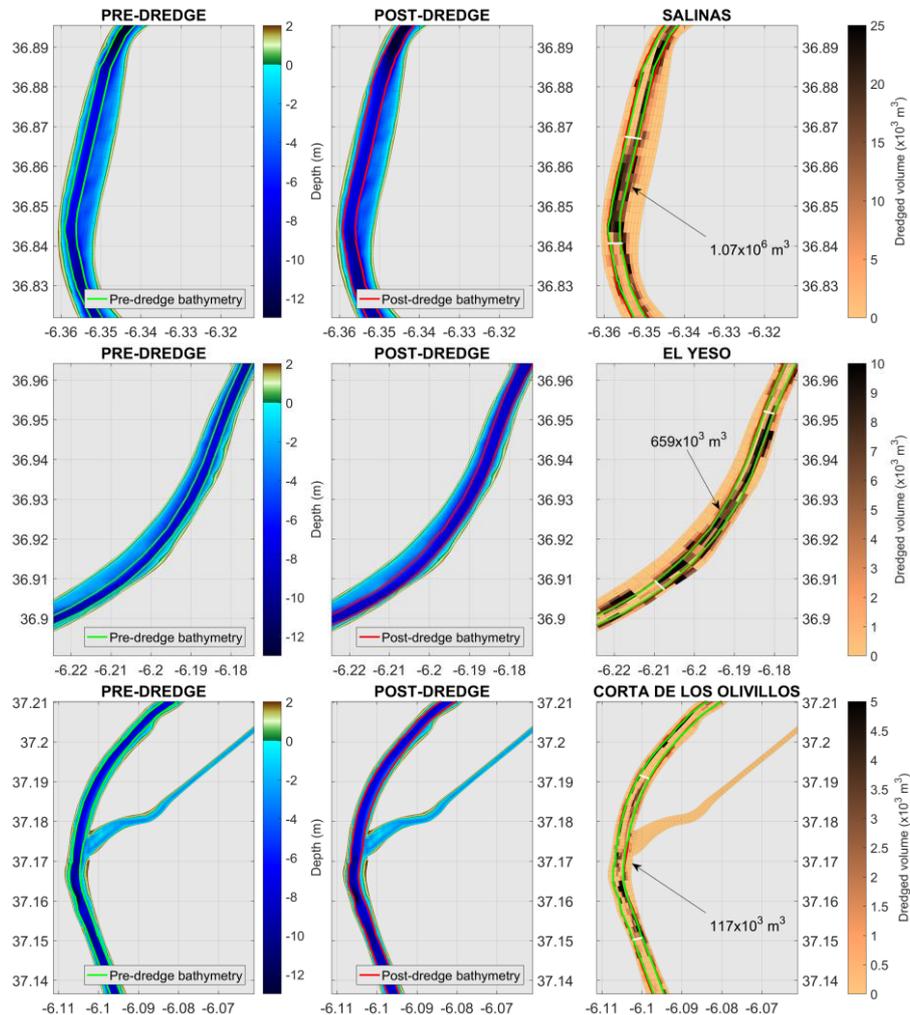


Figura 4.2 - Paneles izquierdos: batimetrías pre-dragado en Salinas-Puntalete (arriba), El Yeso (centro) y Corta de los Olivillos (debajo). Paneles centrales: *idem* para batimetrías post-dragado. Paneles derechos: volumen de sedimento dragado, calculado como diferencia entre los dos mallas (pre-post) multiplicada por la superficie de las celdas de la malla. Las líneas verdes y rojas delimitan el canal de navegación y las nubes de puntos utilizadas para interpolar las batimetrías del modelo. El volumen total de sedimento indicado en los paneles derechos se refiere a la zona del canal de navegación limitada por las dos líneas blancas.

Además de características sedimentarias diferentes, las tres zonas seleccionadas tienen propiedades específicas convenientes para llevar adelante el estudio del efecto de los dragados. La zona de Yeso muestra diferencias claras de batimetría no sólo en el canal de navegación sino también en la zona ribereña fuera del canal, probablemente causadas al aplicar la interpolación batimétrica mencionada, que no funcionaría bien en este caso. En la zona de la Corta de los Olivillos las diferencias se limitan al interior del canal y, por ello, se ciñe bien a la hipótesis de cambios exclusivamente ligados al dragado implícita en el caso de estudio. La zona de Salinas-Puntalete es la que ahora se encuentra en posición intermedia entre ellas.

⁴ Esta cifra puede no corresponderse con la realidad si la batimetría de pre-dragado empleada no es la que realmente existía en el momento de dragar.

5. Caso de aplicación 2. Comportamiento del tapón salino y del prisma mareal ante el establecimiento de llanuras mareales.

Se han llevado a cabo simulaciones para estudiar el comportamiento del prisma mareal y el tapón salino ante la eventual recuperación de llanuras mareales. Previamente al estudio de estos aspectos prácticos se ha dedicado un importante esfuerzo a otros técnicos relacionados con la forma de implementar estos nuevos elementos (llanuras mareales) en la malla actual del estuario sin que el modelo pierda eficiencia computacional. Ha sido una tarea exigente que, tras las diferentes pruebas realizadas, puede considerarse que se ha concluido con éxito.

Como llanura mareal se ha seleccionado una hipotética zona que funcionaría como tal y a la que se le ha asignado distintas configuraciones con objeto de evaluar su sensibilidad a posibles cambios de configuración. La información que produce el modelo se ha procesado para analizar las modificaciones que la implantación de la llanura causaría en el tapón salino y en el prisma mareal. Se ha abordado el estudio de este último en primer lugar y dejado el análisis detallado del tapón salino para futuros informes (de nuevo la premura de tiempo), por lo que solamente se muestran resultados muy preliminares sobre éste.

El análisis realizado da lugar a nuevas preguntas que deberán ser respondidas con nuevas simulaciones. Éstas contemplarán variaciones de la extensión, número, ubicación, profundidad, tamaño y forma de las conexiones de las llanuras con el estuario para ofrecer resultados consistentes y robustos sobre su efecto en la dinámica del estuario. Lo expuesto a continuación no cierra en absoluto el estudio de este caso de aplicación. Este es un estudio guía que debe completarse para ser abordado con mayor profundidad en futuros informes.

5.1.- Selección de la ubicación de la llanura

La zona escogida es la piscifactoría de Veta la Palma debido a que es un sistema presente en la dinámica del estuario con ciertas características de llanura mareal que le confieren las numerosas piscinas de la piscifactoría que allí existen. No hay otra razón. Evidentemente, no es una llanura mareal genuina ya que el intercambio de agua con el estuario está controlado por la actividad humana. El sistema se rige por un complejo entrelazado de canales: el canal principal, al sur de la piscifactoría, está conectado con el estuario a través de una compuerta cuyo funcionamiento desconocemos (Figura 5.1). Hay conexiones claramente visibles: dos con el Brazo de la Torre, y otras dos con el estuario al este de la piscifactoría. El canal principal se ramifica para alimentar a las 40-45 piscinas. El terreno abarca 10500Ha, de las cuales 3200Ha estarían inundadas permanentemente. Las balsas tienen superficies entre 2000-9000m² y profundidad aproximada de 0.5-1m, estimada de imágenes y vídeos donde se ven pescadores y flamencos.

En esta zona se ha ubicado la hipotética llanura inundable, cuya dimensión no ha de superar la de otros dominios para no ralentizar la paralelización. Se ha creado un dominio de 2700 Ha de las que 2050 Ha son superficie inundada, con un mallado de 46x45=2070 nodos de alta resolución que cumple esa condición y una única conexión con el estuario configurable (boca de la llanura, en lo sucesivo) ubicada en la actual conexión principal (Figuras 5.1 y 5.2). El sistema está abierto permanentemente a merced de la marea, permitiendo la libre circulación de agua. Aunque no abarca todas las balsas, el mallado resuelve bien la conexión con el estuario.



Figura 5.1 –Ortofotografía Guadalquivir_z16 mostrando la zona de la finca Veta la Palma y las conexiones con el estuario y con el Brazo de la Torre que pueden inferirse tanto de la imagen como de otras fuentes (Acuicultura sostenible en Veta La Palma, Doñana, <https://www.youtube.com/watch?v=2U40dA6qb-A>). Se han incluido los bordes de las balsas.



Figura 5.2 - Ubicación y mallado creado para la llanura mareal (naranja) en la piscifactoría de Veta La Palma. Las líneas rojas indican las secciones y estaciones de control empleadas en este estudio.

5.2.- Detalle de las simulaciones realizadas

Se han ejecutado distintas simulaciones con configuraciones diferentes de la batimetría de la llanura y morfología de la boca que la conecta con el estuario. Esta última abarca dos celdas del cauce principal, suficientes para recoger la conexión, y tiene una profundidad de 1m, salvo en algún caso especial. En cuanto a la batimetría, las zonas permanentemente secas tienen cota

+2 m respecto al cero de referencia salvo en las cercanías de la boca donde se rebaja a +1 m. La zona inundable tiene diferentes profundidades en los distintos experimentos. Las Figuras 5.3 y 5.4 muestran estos detalles y la Tabla 5.1 recoge las diferentes configuraciones seleccionadas y los códigos identificativos de ellas.

Tabla 5.1 - Configuración de los diferentes experimentos realizados. El caso 0, Referencia, no incluye llanura mareal y es la configuración con la que se confrontan el resto de casos. Los distintos tonos de sombreado se corresponden con distintas tandas de experimentos.

Experimento	Descripción
0	Referencia
1	Batimetría de la llanura constante de -1 m
2	Batimetría de la llanura constante de -0.5 m
3	Batimetría de la llanura constante de 0 m
4	Batimetría de la llanura constante de +0.5 m
5	Boca estrecha. Batimetría de la llanura -0.5 m
6	Boca ancha. Batimetría de la llanura -0.5 m
7	Boca con batimetría de +0.5 m. Batimetría de la llanura constante de -0.5 m
8	Boca estrecha y batimetría variable que simula la separación entre balsas*

* Configuración más próxima a la realidad actual

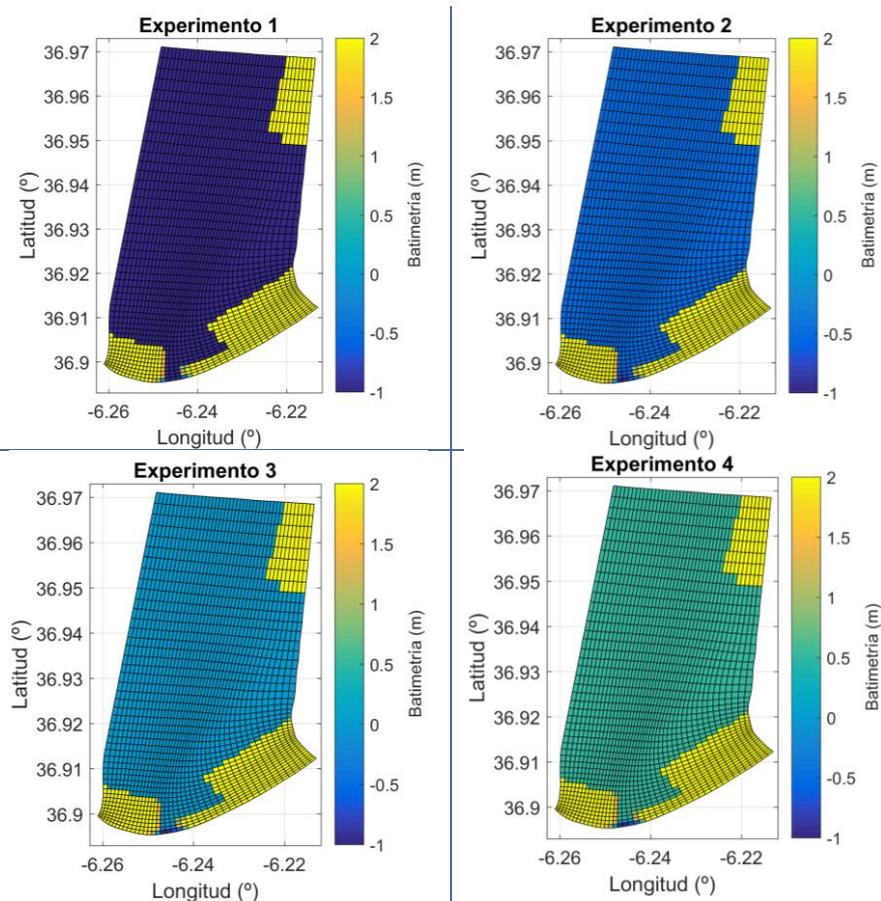


Figura 5.3 - Batimetría de la llanura inundable para los experimentos 1, 2, 3 y 4 (Tabla 5.1) en los que no se modifica la forma de la boca.

Se han organizado dos tandas de experimentos, una en la que se cambia la batimetría de la llanura mareal manteniendo la boca inalterada, y una segunda en la que cambia la forma de la boca (Tabla 5.1). Por último, se ha lanzado un experimento con una batimetría variable que simula la separación entre balsas (panel inferior derecho, Figura 5.4). En todos los casos, a la llanura mareal se le han asignado condiciones iniciales uniformes de nivel de agua (0 m), salinidad (4 PPT) y temperatura (20 °C), que son los valores medios en el estuario en las inmediaciones de la boca.

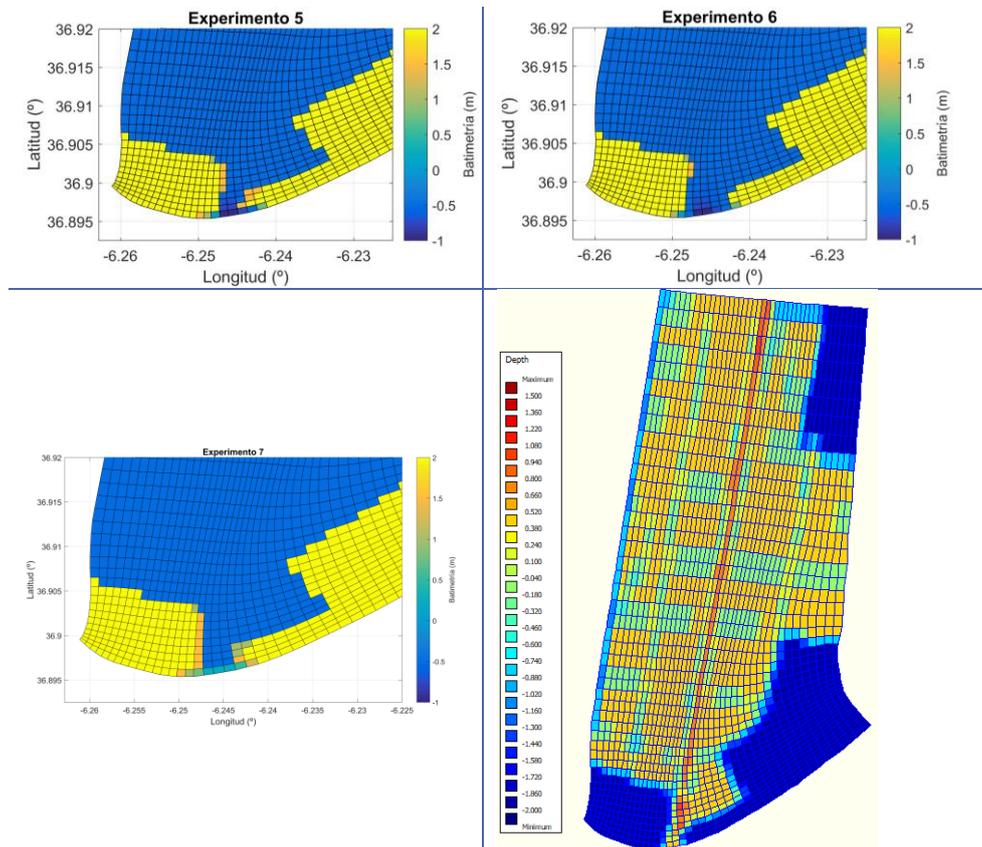


Figura 5.4 - Llanura inundable en los experimentos 5, 6 y 7 (paneles superiores y panel inferior izquierdo) en los que no se modifica la batimetría y sí la forma de la boca (ver Tabla 5.1) y en el 8, donde la batimetría de la llanura es variable (panel inferior derecho).

Todos los experimentos simulaban seis meses forzando el modelo con la marea astronómica en la desembocadura y una descarga constante de 30 m³/s en la presa de Alcalá del Río. No se ha considerado ni la marea meteorológica ni tomas de regadío por tratarse de un primer estudio cuyo objetivo fundamental es comprobar que el modelo funciona y produce resultados coherentes. Futuros estudios añadirán complejidad y ejecutarán nuevas simulaciones para configuraciones realistas de posibles llanuras a recuperar incluyendo descargas de agua reales, marea meteorológica, etc.

5.3.- Variaciones de la oscilación mareal

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran las variaciones que experimentan la amplitud y fase de las dos constituyentes semidiurnas más importantes, M2 y S2, para la primera tanda de experimentos (cambios en la batimetría de la llanura exclusivamente). El experimento 0, representado en rojo, proporciona los mismos valores de constantes armónicas que los mostrados en la Figura 1.2, ya que no existe llanura. En todos los experimentos, la amplitud de

ambas constituyentes disminuye en el estuario, aunque la reducción apenas se aprecie en el experimento número 4, cuya batimetría es +0.5m (es decir, sólo ingresa agua cuando el nivel en el estuario supera esa cota, por lo que permanece aislada gran parte del ciclo mareal). La presencia de una llanura mareal reduce pues la amplitud de la onda de marea que progresa en el estuario, tanto más cuanto más profunda sea. En contraposición, las fases apenas sufren modificación, lo que significa que el calendario de pleamares/bajamares apenas se vería afectado.

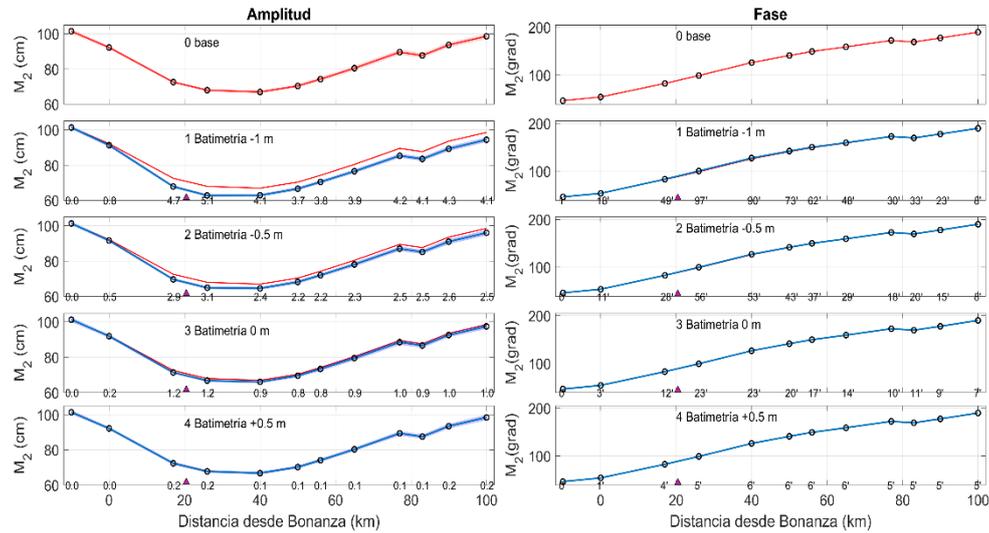


Figura 5.5 - Paneles izquierdos: amplitud de la constituyente M2 a lo largo del estuario en los experimentos en los que sólo se modifica la batimetría de la llanura, permaneciendo inalterada la forma de la boca. El primer panel es para la configuración de referencia y su curva se repite (en rojo) en los demás para facilitar la comparación con la nueva amplitud (en azul). Las cifras en el eje de abscisas dan la diferencia (cm) entre referencia y experimento en los mismos puntos empleados para la calibración del modelo (ver Figura 1.1). Paneles derechos: ídem para la fase de M2. Los números en el eje indican diferencia de fase en minutos de grado. La máxima diferencia ($90' = 1.5^\circ$) equivale a 3 minutos de tiempo aproximadamente. El triángulo magenta ubica la boca de la llanura mareal.

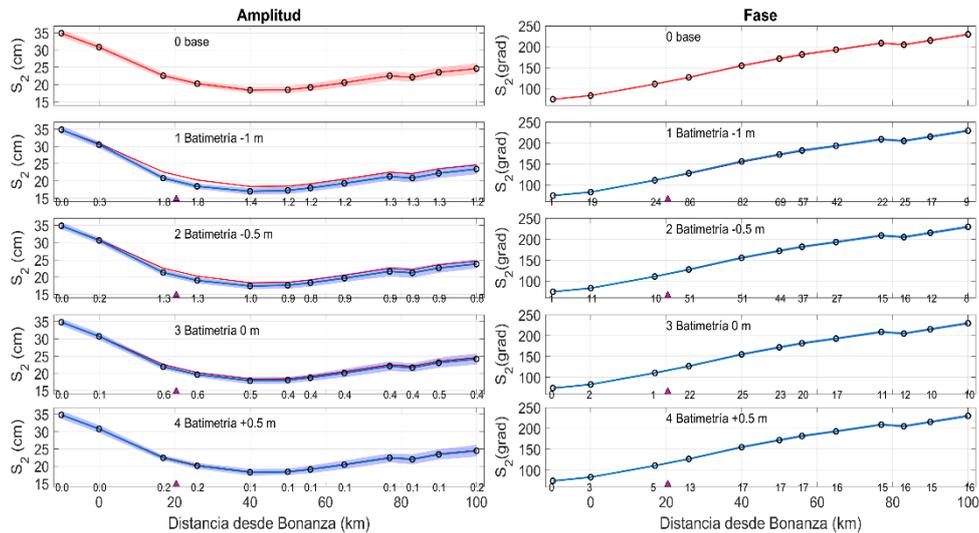


Figura 5.6 - Mismo que Figura 5.5 para la constituyente S2. La zona sombreada indica la incertidumbre en el cálculo de las constantes armónicas. Dicha zona es apenas observable en la Figura 5.3 de M2 debido a que la incertidumbre para ella es algo menor y la escala en el eje de ordenadas algo mayor.

Las Figuras 5.7 y 5.8 muestran los resultados para la segunda tanda de experimentos en los que, sin modificar la batimetría, se cambia la forma de la boca o se aplica una batimetría variable. En principio, cuando la llanura incorpora una boca estrecha apenas se produce

variación en las constantes armónicas (fila segunda en Figuras 5.7 y 5.8). Menos aún si la boca presenta una barrera de 0.5 m (experimento 7), confirmando lo visto en el experimento 4. Si, por el contrario, la boca es amplia, el efecto de la llanura en las constituyentes armónicas es apreciable (experimento 6, fila tercera Figuras 5.7 y 5.8). El experimento 8 es ilustrativo en el sentido de que hay cambios apreciables en la amplitud (filas inferiores, Figuras 5.7 y 5.8) a pesar de que la boca es estrecha. Ello indica que es la conjunción de batimetría y morfología de la boca la que determina los cambios. En este experimento se ha impuesto un canal más profundo en la parte media de la llanura que conecta directamente con la boca (panel inferior derecho, Figura 5.4) y que probablemente facilita el intercambio de agua. Al igual que ocurría con los experimentos 1 a 4, los cambios en la fase son irrelevantes.

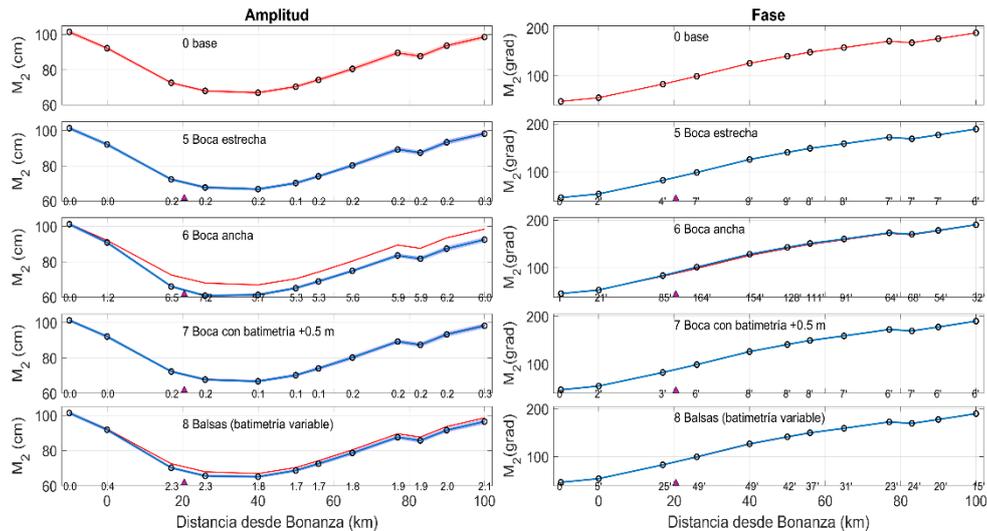


Figura 5.7 - Mismo que Figura 5.5 para los experimentos 5, 6 y 8. Constituyente M_2

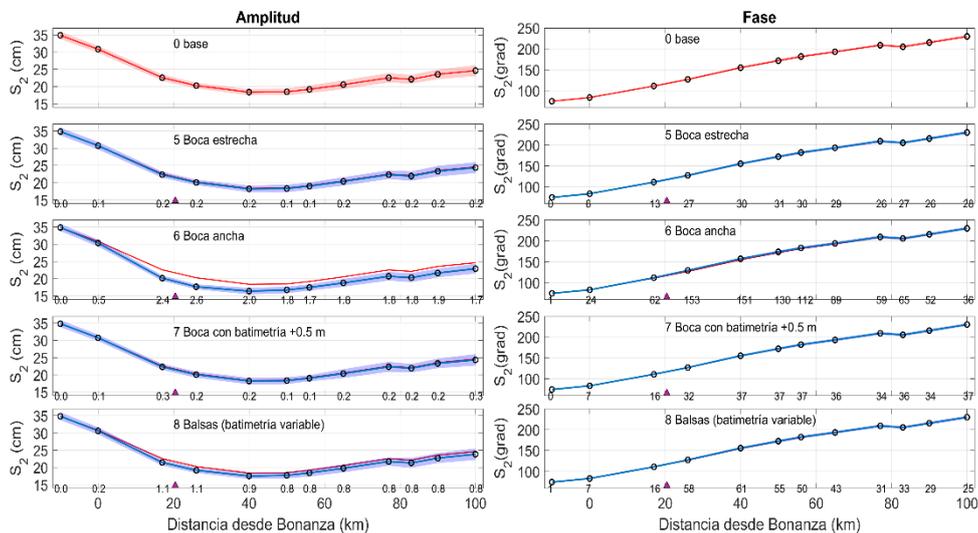


Figura 5.8 - Mismo que Figura 5.6 para los experimentos 5, 6 y 8. Constituyente S_2

El análisis previo permite concluir que la presencia de llanuras mareales tiende a reducir la amplitud de la onda de marea en el estuario. Las Figuras 5.5 a 5.8 indican que esa disminución no ocurre solamente aguas arriba de la ubicación de la llanura, como intuitivamente se podría pensar, sino que también lo hace aguas abajo. Solamente en las proximidades de la desembocadura la amplitud permanece inalterada, resultado lógico si se piensa que la marea es importada desde el océano y que la presencia de llanuras en el estuario resulta irrelevante allí.

Para evaluar la modificación total causada por la implantación de llanuras, el análisis realizado para M2 y S2 debería extenderse al resto de constituyentes. Una forma más visual de hacerlo o, al menos, de tener una referencia rápida de esas variaciones se muestra en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.9 para la estación de Lebrija, no lejos de la boca de la llanura mareal. En todos los casos, la altura alcanzada en la pleamar es inferior en presencia de llanuras mareales (valores positivos en Tabla 5.2, curva roja por debajo de curva azul en pleamares en el ejemplo de la Figura 5.9), correspondiendo las mayores diferencias a los experimentos 1 y 6, que tienen la llanura más profunda y la boca más ancha, respectivamente, de todos los casos considerados. Análogamente, las bajamares tienen más altura que la referencia en los experimentos considerados (valores negativos en Tabla 5.2, curva roja por encima de curva azul en bajamares en Figura 5.9) de modo que la bajamar es “menos baja” en presencia de llanura mareal.

Tabla 5.2 - Diferencia de nivel del mar (cm) causada por la implantación de las llanuras mareales, calculada como la diferencia referencia – experimento, en los instantes de pleamar y bajamar para diferentes situaciones de forzamiento mareal en la estación de Lebrija (ver Figura 5.2). Se han utilizado dos periodos de mareas vivas y dos de mareas muertas para hacer las estadísticas durante esas situaciones y la serie completa para el último bloque. Este último sería también representativo de una situación mareal media. El sombreado sigue el código de la Tabla 5.1. En negrita se han resaltado las situaciones más notables.

Experimento	Mareas vivas		Mareas muertas		Serie completa	
	Pleamar	Bajamar	Pleamar	Bajamar	Pleamar	Bajamar
1	8.09	-7.64	4.00	-3.51	5.98	-5.66
2	5.85	-4.93	2.43	-1.71	4.08	-3.28
3	3.14	-2.07	0.95	-0.54	2.00	-1.20
4	1.22	-0.34	-0.05	0.02	0.56	-0.15
5	1.84	-0.25	-0.11	0.03	0.89	-0.01
6	11.21	-10.66	5.42	-4.67	8.28	-7.76
7	2.22	-0.29	-0.09	0.05	1.00	-0.10
8	5.73	-3.97	2.45	-0.39	4.08	-2.00

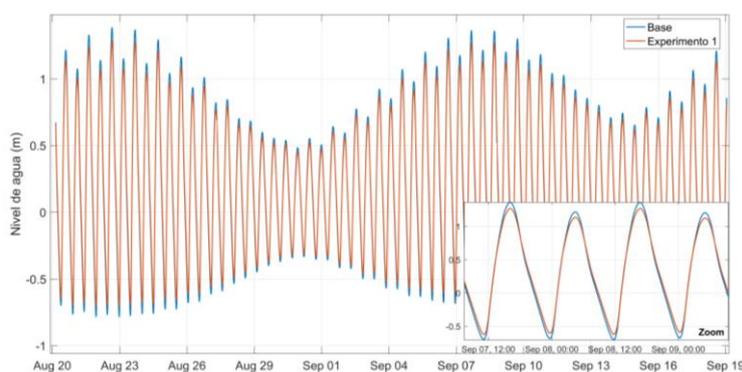


Figura 5.9 - Series temporales de oscilación del nivel del mar en Lebrija para los experimentos de referencia (línea azul) y 1 (línea naranja) ilustrando la reducción de la onda mareal al implantar la llanura mareal. La gráfica inferior derecha es una ampliación de cuatro ciclos de marea para observar mejor las diferencias.

Estos resultados son de interés para la navegación en el estuario. Por un lado, la lámina de agua reduciría su espesor en la cercanía de la pleamar al ser menores las pleamares en presencia de llanura. Esto es un inconveniente menor en la navegación dado que en las

pleamares la lámina de agua alcanza sus máximos espesores. Por el contrario, en las inmediaciones de la bajamar, el espesor de la lámina se vería incrementado al ser las bajamares menos bajas en presencia de la llanura. Puesto que el factor limitante para la navegación en muchas de las ocasiones es el mínimo espesor que se da en la bajamar, aumentarlo unos centímetros en esos momentos críticos es una indudable ventaja. En el caso estudiado, este espesor puede incrementarse más de 10 cm en el experimento 6 en mareas vivas, que son las más perjudiciales a la hora de causar espesores mínimos de la lámina de agua.

5.4.- Variaciones del prisma mareal (caudales)

A partir de las velocidades producidas por el modelo se han calculado flujos (caudales) en distintas secciones de interés del dominio, indicadas en línea gruesa roja en la Figura 5.2. El objetivo de estos cálculos es investigar cómo la presencia de la llanura afecta al caudal y, de ahí, al volumen neto de agua movido por la marea que atraviesa una determinada sección (prisma mareal). El método seguido ha sido generar series temporales de caudales y someter esas series a análisis armónico. Las Tablas 5.3 y 5.4 presentan los resultados para el caso de la constituyente principal M2.

Tabla 5.3 - Constantes armónicas para la constituyente M2 del caudal en diferentes secciones del estuario y de la boca (ver Figura 5.2 para detalles) para los experimentos 1 a 4 de la primera tanda (distinta batimetría de la llanura, Tabla 5.1). Los resultados se muestran en forma amplitud/fase, estando medida la amplitud en m^3s^{-1} y la fase en grados. El sentido del caudal es positivo hacia la cabecera en el estuario, en tanto que en la sección de la boca es entrando en la llanura. Se incluye el experimento de referencia (base), para el cual no existe "boca de llanura", a efectos de comparación.

Sección	EXPERIMENTO				
	Base	1	2	3	4
Desembocadura	4170/26.3	4170/30.3	4166/28.8	4168/27.3	4171/26.4
Aguas abajo	3319/49.3	3458/53.0	3404/51.7	3352/50.3	3324/49.4
Aguas arriba	3123/54.1	2965/55.5	3028/54.9	3087/54.5	3117/54.2
Boca llanura	-	336/72.2	207/77.8	81/79.8	10/84.6

Con referencia a la primera tanda de experimentos (Tabla 5.3), la presencia de la llanura apenas afecta al tamaño del caudal en la desembocadura ($<0.1\%$) ni a su fase ($<4^\circ$ o 6min), dando a entender que el prisma mareal está mucho más influenciado por las condiciones oceánicas, que no cambian, que por la modificación morfológica introducida en el estuario. Aguas abajo de la llanura, los caudales sí son diferentes a los del caso base: en todos los experimentos el caudal es mayor, alcanzando la mayor diferencia en el experimento 1 (unos $140 m^3s^{-1}$ más, o un 4.2% de incremento). La diferencia se reduce a medida que la llanura es más somera, de modo que en el experimento 4 apenas hay. Aguas arriba de la llanura, sin embargo, todos los caudales son menores en los experimentos que en la referencia, resultado intuitivo puesto que la llanura desvía una buena parte del caudal que sube por el estuario. De nuevo, cuanto mayor la profundidad, mayor la diferencia (unos $160 m^3s^{-1}$ o un 5% de reducción en el experimento 1, apenas $6 m^3s^{-1}$ en el 4).

Los flujos a través de la boca reproducen ese patrón, disminuyendo monótonamente desde el experimento 1 (llanura más profunda) al 4 (menos profunda). Las fases indican retrasos en el pico de caudal a través de ella respecto a las de sus inmediaciones en el estuario. El retardo

está asociado a la fricción en boca+llanura, que se incrementa desde el experimento 1 al 4 siguiendo el patrón de mayor a menor profundidad de la llanura: cuánto más profundidad, menos fricción.

Los resultados para los experimentos 5 a 8 (Tabla 5.4) comparten las características básicas comentadas para los otros experimentos. Cuando la boca es angosta (experimento 5) las variaciones de caudal respecto al caso de referencia son mínimas. Cuando es ancha (y además la batimetría es relativamente profunda (experimento 6) el caudal aumenta considerablemente (es el mayor de los 8 experimentos).

Tabla 5.4 - Mismo que Tabla 5.3 para los experimentos 5 a 8 de la segunda tanda (variación de la conexión llanura-estuario).

Sección	EXPERIMENTO				
	Base	5	6	7	8
Desembocadura	4170/26.3	4169/26.5	4191/31.7	4168/26.5	4167/28.3
Aguas abajo	3319/49.3	3324/49.5	3523/54.1	3323/49.5	3384/51.2
Aguas arriba	3123/54.1	3116/54.3	2900/54.4	3116/54.2	3050/54.9
Boca llanura	-	13/81.9	463/70.1	12/80.1	158/75.5

Este mismo análisis se ha llevado a cabo para la constituyente S2 la cual reproduce el comportamiento de M2, aunque escalado en tamaño como es lógico. Por esta razón no se muestran los resultados para esa constituyente.

Quedan por hacer más experimentos y de una forma sistemática. Por ejemplo, ubicando una misma llanura en distintas partes del estuario, o cambiando la extensión para una misma ubicación, agrandando el tamaño de la conexión llanura-estuario, etc. Es tarea pendiente de completar y que nutrirá futuros informes. Se quiere hacer notar, no obstante, que esta primera aproximación tenía el doble objetivo de verificar que la implementación de estos nuevos dominios no causaba problemas computacionales y, más interesante, que los resultados físicos que proporciona el modelo son consistentes con lo esperable. Ambos objetivos se han visto satisfechos. Queda pendiente el análisis del comportamiento del tapón salino.

5.4.- Algunos resultados preliminares sobre la salinidad.

Se muestran a continuación algunas pruebas realizadas con las salidas de salinidad proporcionadas por el modelo en los diferentes experimentos. No aborda el problema de las variaciones que la implantación de llanuras ocasiona en la ubicación del tapón salino que, como se ha comentado, queda pendiente para futuros informes, sino el análisis e interpretación de las salidas del modelo y comprobar si son consistentes y coherentes con lo esperable y así dar soporte científico a la modelación realizada.

Un problema anticipable con la salinidad en las inmediaciones de la llanura mareal es el transitorio que se debe superar: A la hora de ejecutar el modelo, la llanura se llena de agua homogénea de $S=4$ PSU porque este es el valor medio de la salinidad en el estuario en las inmediaciones de la boca. Cuando se inicializa el modelo y comienza la marea a actuar, el agua que entra en la llanura procede de aguas abajo de la boca en el estuario, puesto que la llanura se inunda cuando sube la marea la cual conlleva corrientes hacia la cabecera. Esa agua tiene

características más oceánicas, i.e. más salinidad, que la que fluye cuando baja la marea cuando se vacía la llanura. Los sucesivos ciclos mareales van a incrementar el valor asignado inicialmente ($S=4$ PSU) a la llanura hasta alcanzar un nuevo equilibrio y, para que ello ocurra, ha de transcurrir un tiempo relativamente largo de simulación.

En la Figura 5.10 puede apreciarse claramente ese transitorio que se extiende desde el inicio de la simulación hasta prácticamente el mes de junio. También ilustra el aumento de salinidad de las aguas en el interior de la llanura que incrementa el valor $S=4$ PSU inicialmente asignado hasta los 7-8 PSU, según el experimento en cuestión, tras finalizar el transitorio.

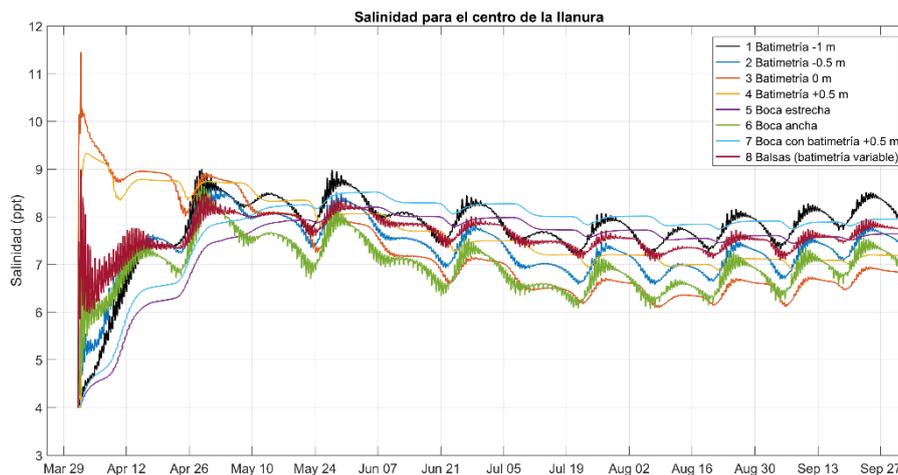


Figura 5.10 - Series temporales de salinidad modelada en el centro de la llanura en los distintos experimentos. Puede verse el incremento de salinidad desde los 4 PSU iniciales hasta los 7-8 PSU hacia el final de la serie modelada. El transitorio mencionado en el texto es visible al principio de la serie y se extiende hasta el mes de junio.

La Figura 5.11 muestra la salinidad en la estación de Lebrija para los últimos 3 meses de simulación tras finalizar el transitorio para el caso de referencia y el experimento 1. Puede observarse un incremento del orden de 1 PSU en este último caso que es consecuencia directa del aumento de la salinidad en la llanura, la cual funciona de alguna manera como un reservorio de sal tal y como se ha comentado anteriormente.

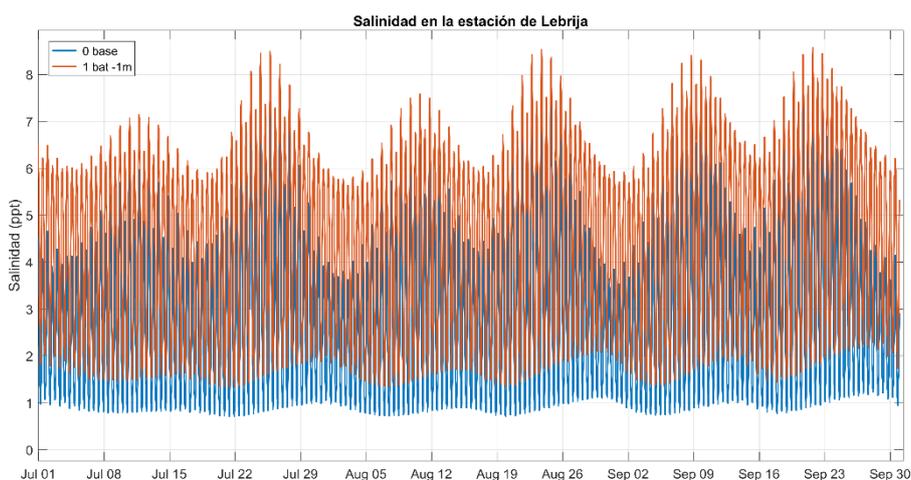


Figura 5.11 - Salinidad en la estación de Lebrija en los tres últimos meses de simulación para el experimento de referencia (línea azul) y experimento 1 con batimetría a $-1m$ (línea naranja). La salinidad en ambos casos fluctúa marealmente de la misma forma, pero el valor numérico es del orden de 1 PSU mayor en el caso del experimento 1.

Es importante notar, sin embargo, que este efecto de salinificación tiene cierto carácter local, que se manifiesta de forma clara en el punto de control de Lebrija debido a su proximidad

a la boca de la llanura. Queda por analizar en futuros informes el alcance espacial de esta modificación para evaluar lo que ocurre en puntos más alejados de la boca, aguas arriba del estuario.

Referencias

García-Lafuente, J., Delgado, J., Navarro, G., Calero, C., Díez-Minguito, M., Ruiz, J., Sánchez-Garrido, J.C. (2012) About the tidal oscillations of temperature in a tidally-driven estuary: The case of Guadalquivir estuary, southwest Spain, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 111, 60-66, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2012.06.007>.

GOFIMA (2018). Informe Final "*Modelo hidrodinámico numérico tridimensional del Estuario del Guadalquivir y zonas aledañas*". Autoridad Portuaria de Sevilla, abril 2018, 73 pp. 67.

ANEXO 1

Informe preliminar de la campaña de toma de datos realizada en verano de 2021 por TECNOAMBIENTE. Breve reseña de los datos recogidos

Se ha medido en 3 estaciones durante el periodo julio – septiembre 2021, en las que se han instalados equipos CTs y ADCPs. El mapa de debajo muestra la localización de las estaciones, identificadas como Queipo (estación 1), Lebrija (estación 2) y Salinas (estación 3).



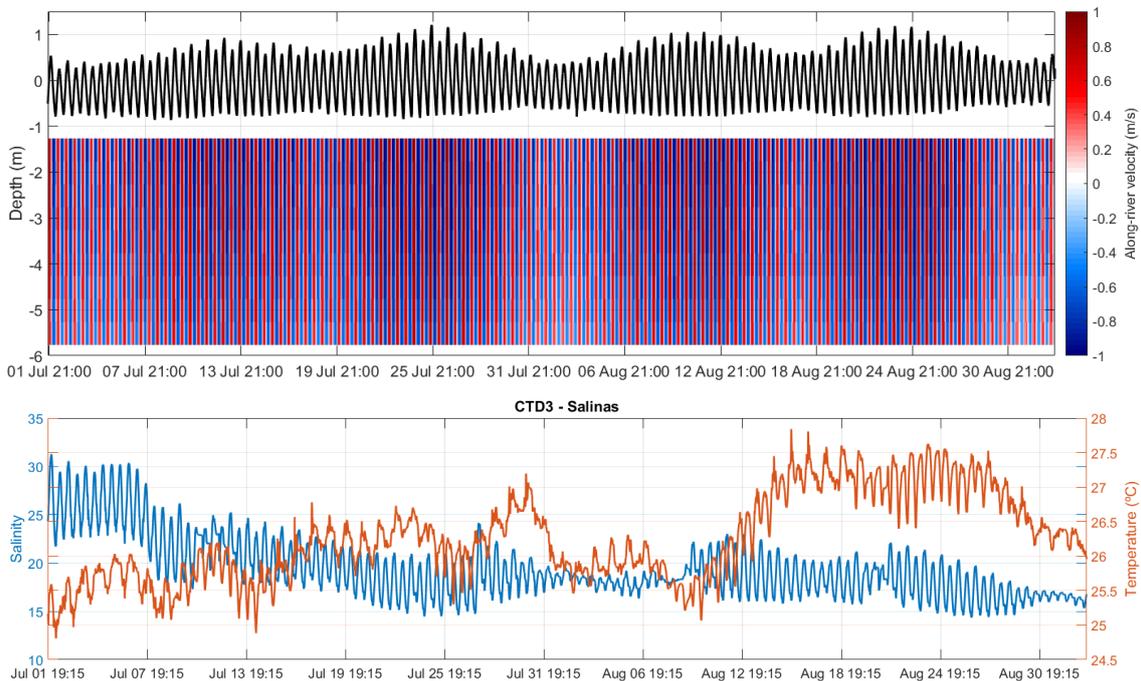
En tanto que en las estaciones de Lebrija y Salinas el ADCP y el CT se fondearon juntos, en Queipo los instrumentos están separados unos 13 km, quedando el CT en proximidad de Veta La Palma y el ADCP en Queipo. En la estación 2 el CT instalado es un Seabird SBE 19plus equipado con sensor de presión y bomba, mientras que los instalados en Queipo (más bien Veta La Palma) y Salinas son Seabird SBE 16plus que carecen de esos accesorios auxiliares.

ESTACIÓN 3 – SALINAS

La estación de Salinas, cerca de la desembocadura, muestra una variabilidad relacionada directamente con la dinámica oceánica. La salinidad varía entre 15 y 30 PSU aproximadamente, con una periodicidad mareal muy marcada y una modulación subinercial dependiente del ciclo marea viva – marea muerta, como puede apreciarse comparando los paneles superior e inferior de la figura que se muestra a continuación (ver registro de presión del ADCP, en línea negra). La temperatura muestra una periodicidad semidiurna, que en determinados periodos se enmascara por efecto del forzamiento diurno debido al ciclo solar. Los datos presentan una excelente regularidad y no se observan errores de medida de los sensores.

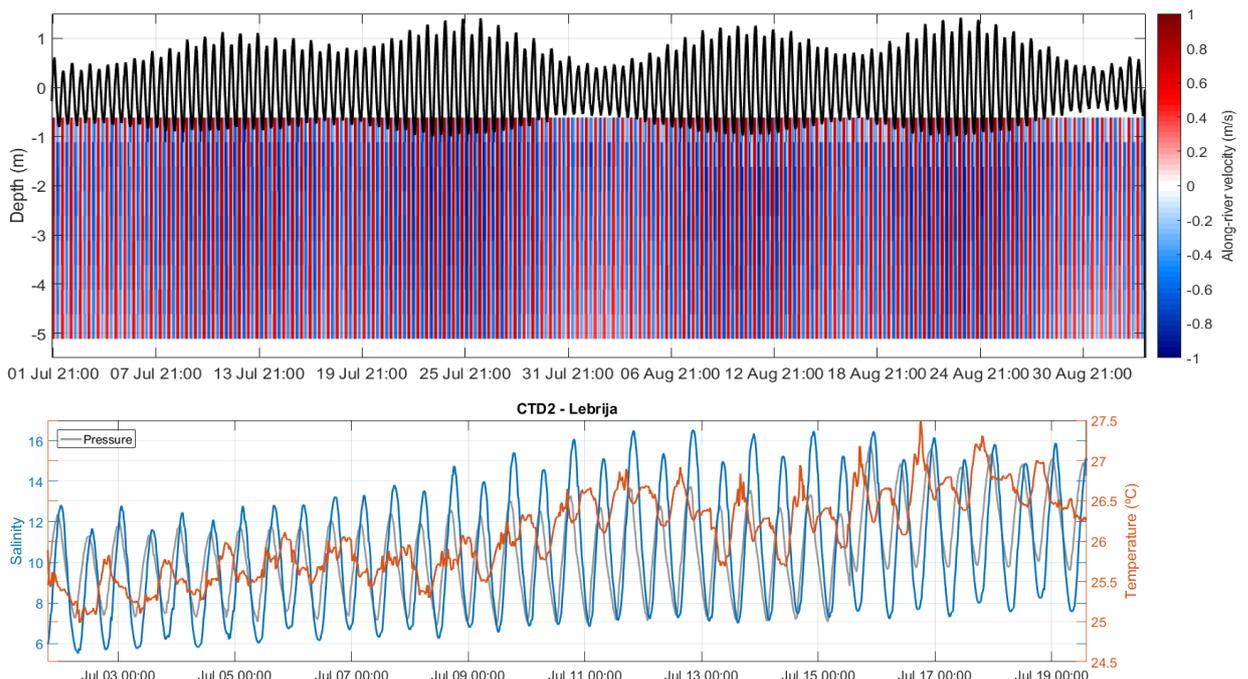
El registro de corriente presenta la misma periodicidad semidiurna y una muy clara modulación subinercial del ciclo quincenal (marea viva – muerta). El ADCP se ha configurado para un rango de 4.5 m, con celdas de 50 cm (10 celdas en total). La profundidad media del instrumento ha sido de 6.8 m y por tanto se ha perdido aproximadamente 1.5 m de rango (que

es incrementado alrededor de las pleamares) durante todo el registro. Más allá de este detalle, los datos no presentan errores.



ESTACIÓN 2 – LEBRIJA

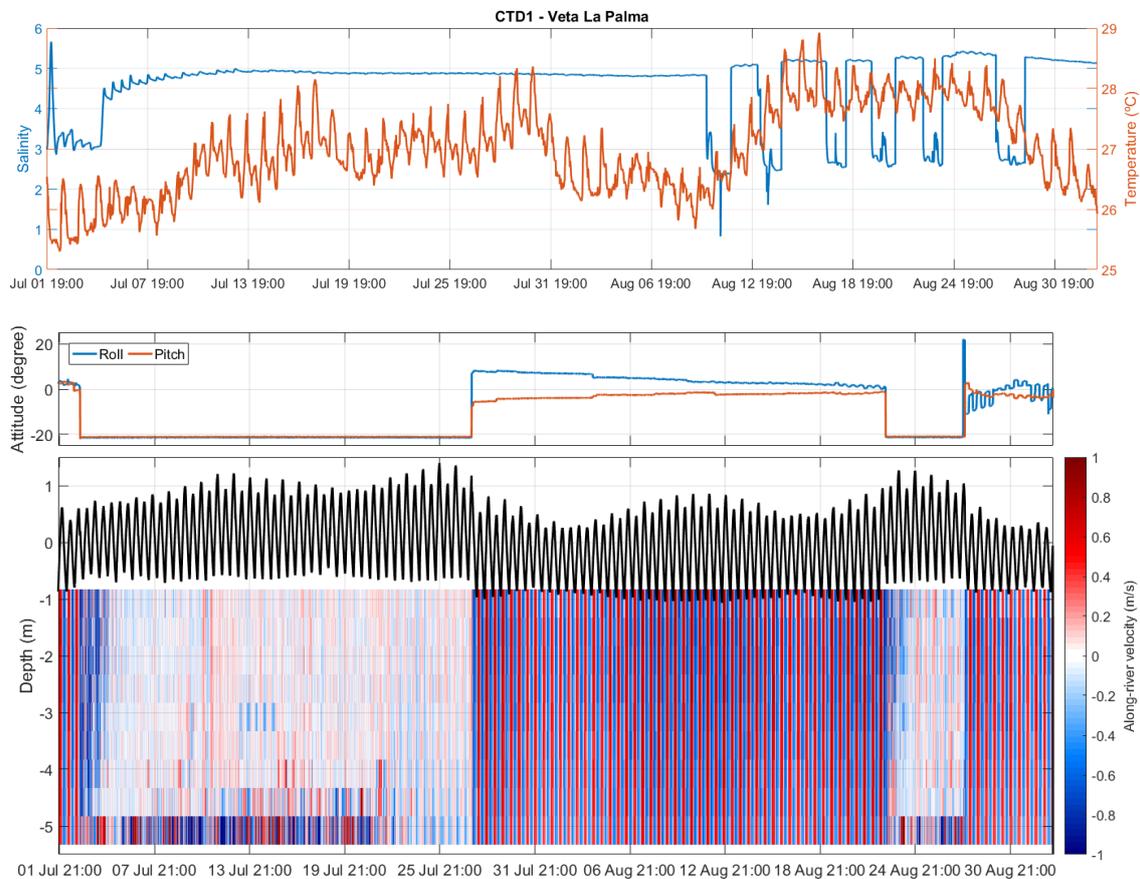
El CT2 de la estación de Lebrija finalizó las mediciones antes de tiempo, registrando un total de 20 días. Sin embargo, el registro es correcto y no se observan errores en los datos. En la gráfica se puede apreciar la notable periodicidad semidiurna de la serie de salinidad un rango de variabilidad entre 6 y 16, con una desigualdad diurna acentuada en el periodo de marea viva (ver registro de presión en negro). La temperatura está en oposición de fase con la salinidad consecuencia de la mayor temperatura del río respecto al océano durante el periodo estival.



El registro de corriente presenta una periodicidad semidiurna muy notable, con una clara modulación quincenal. La configuración del ADCP es la misma que la estación 3, y presenta una pérdida del rango de cobertura de la columna de agua similar al anterior, aunque algo menor: se ha perdido alrededor de 1 m de perfil.

ESTACIÓN 1 – QUEIPO-VETA LA PALMA

El registro de actitud (roll y pitch) del ADCP de esta estación muestra un cambio súbito de la inclinación del instrumento a los dos días del comienzo de la serie. En torno al 28 de julio parece retomar valores más coherentes (aunque, sospechosamente, sin periodicidad mareal), para volver a presentar un intervalo muy irregular de unos 4 días hacia el final de la serie. El registro de corriente sigue este patrón, mostrando valores no válidos en los mismos intervalos. La pérdida del rango por configuración del ADCP es similar a los casos anteriores.

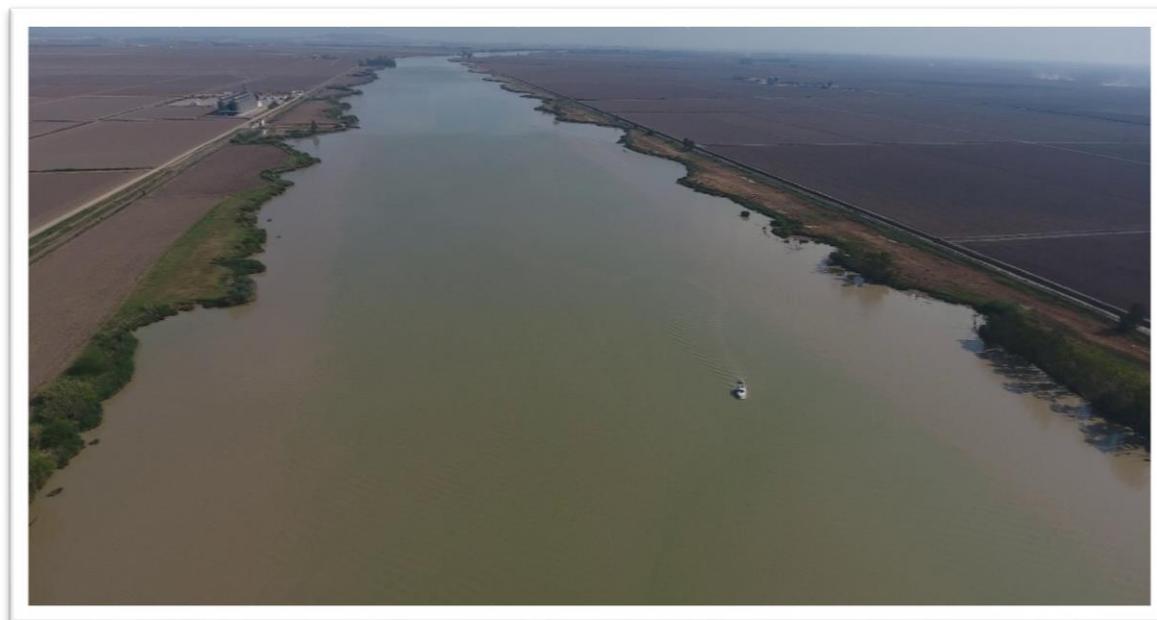


Considerando que el CT y el ADCP no se han fondeado juntos en esta estación, sorprende que el registro de salinidad refleje las incongruencias mostradas por el sensor de actitud del ADCP. Este registro presenta valores no válidos durante una gran parte de la serie, pero también se observan intervalos muy cortos, aunque irregulares, de valores aparentemente coherentes con lo esperable desde el 10 de agosto en adelante. Todo apunta a que el ADCP se haya tumbado a causa de un arrastre por el paso de un barco o cualquier otro tipo de intervención externa. Sin embargo, es difícil explicar el comportamiento del CT, especialmente porque la incidencia afecta solamente al sensor de conductividad y no al de temperatura que presenta un registro completo y sin incongruencias.

COMENTARIOS PRELIMINARES SOBRE LOS DATOS RECOGIDOS

En términos generales la calidad de los datos es elevada y, aparte de la incidencia de la estación 1 y de la interrupción de la serie del CT en la estación 2, estas series son de elevado valor científico y observacional en el estuario, entorno hostil para la recolección de este tipo de datos.

Para un análisis correcto de los datos con vistas a la validación del modelo numérico, es necesario conocer la configuración del reloj de los instrumentos fondeados, es decir, si es hora GMT o local. De tener la posibilidad de repetir el despliegue de estos fondeos, se sugiere que se haga en el periodo invernal, previo al comienzo de la temporada del arroz, para poder validar el modelo en condiciones de inactividad de las estaciones de bombeo y recirculación del agua de riego y también para recoger algún episodio de fuertes descargas, más usuales en esta estación. Se sugiere incrementar en al menos 2 m (4 celdas de 50 cm) el rango de funcionamiento de los ADCPs.

ANEXO 2***Informe técnico de la campaña Guadalquivir Mayo-21 realizada por GOFIMA (Campaña GUADALQUIVIR-0521)*****Tabla de contenido**

1. Introducción	40
2. Plan de campaña	41
3. Desarrollo de la campaña.....	42
4. Resultados	42
4.1. Corriente y nivel del mar	42
4.2. Temperatura y salinidad.....	44
4.3. Secciones de perfiles de temperatura y salinidad	46
4.3.1. Queipo.....	46
4.3.1. Torre.....	48
4.3.1. Vetalapalma	51
5. Conclusiones.....	52

1. Introducción

Los desarrollos más recientes del modelo numérico, en su modalidad baroclina, necesitan un nuevo proceso de validación que abarque otras variables más allá del nivel del mar. La modelación baroclina de la columna de agua permite simular la estructura vertical de las

propiedades termohalinas (temperatura y salinidad) y la corriente, y, para validar esas simulaciones, se necesitan observaciones de estas variables *in situ*. La campaña Guadalquivir 0521, realizada entre el 5 y el 7 de mayo de 2021, se ha llevado a cabo con el objetivo de medir estas variables en tres secciones distintas a lo largo del estuario.

2. Plan de campaña

La campaña consiste en la cobertura de tres secciones transversales, distribuidas en la zona de variación mareal de la salinidad, en una franja de 30 a 60 km aproximadamente de distancia de la desembocadura. La denominación de las secciones y sus características principales se resumen en la Tabla A2-1.

Tabla A2-1 – Resumen de las secciones transversales muestreadas.

Nombre	Distancia de la desembocadura (km)	Coordenadas centrales	Anchura (m)	Número de estaciones
Torre	30	36.8977 °N 06.2312 °W	640	23
Vetalpalma	46	37.0261 °N 06.1512 °W	450	16
Queipo	60	37.1465 °N 06.0996 °W	300	11



Figura A2-1 – Plan de campaña, con la ubicación de las secciones y distribución de las estaciones previstas. Las etiquetas indican un código identificativo de la sección y el ordinal de las estaciones CTD, numeradas de este a oeste. Los fondeos de las orillas se identifican con el número 0 y una letra indicativa de la orilla este (E) ó oeste (W). El fondeo de Queipo es representado con un triángulo rojo.

A lo largo de cada sección se han definido una serie de estaciones separadas por una distancia nominal media de unos 25 m, en las cuales se han llevado a cabo perfiles de temperatura y conductividad (CTD). En las dos orillas de cada sección, a una profundidad mínima nominal de unos 2 m, se han ubicado dos estaciones adicionales en las cuales se han fondeado sendos sensores de temperatura y conductividad (CT). A unos 130 m de distancia aguas abajo de la sección de Queipo, en el centro del canal de navegación, a una profundidad nominal de unos 8 m, se ha instalado un fondeo equipado con un perfilador de corriente y oleaje (ADCP), y otro sensor de temperatura y conductividad (Figura).

3. Desarrollo de la campaña

Durante la campaña se han podido cumplir los objetivos previstos, muestreando las secciones de Queipo, Torre y Vetlapalma durante los días 5, 6 y 7 de mayo. En tanto que en las primeras dos secciones se ha podido cubrir un periodo de muestreo de 10-11 horas seguidas, correspondiente a un ciclo de marea casi completo, en Vetlapalma, por razones logísticas, sólo se ha podido trabajar un intervalo de 3 horas por la mañana del último día de campaña. El fondeo en Queipo ha sido desplegado a las 9:40 del 5 de mayo, y recuperado a las 12:10 del 7 de mayo.

La campaña se ha desarrollado a bordo del barco “Doñana”, con una eslora de 8.25 m, una manga de 3 m y un calado de 75 cm, de la consultora ambiental Tecnoambiente, que ha trabajado ininterrumpidamente del alba al ocaso. El personal embarcado estaba compuesto por 3 científicos del Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga y 2 técnicos de la empresa que ejercían de patrón y ayudante.

4. Resultados

4.1. Corriente y nivel del mar

El perfilador instalado en la proximidad de la sección de Queipo es un Nortek AWAC de 600 kHz, configurado para que mida las tres componentes de la corriente (campo horizontal y vertical) a lo largo de una columna de agua de 8 m con una resolución vertical de 50 cm, con intervalo de 10 minutos. Cada perfil es el resultado de promediar 540 s de muestreo a 2 Hz, correspondiente a 1080 pulsos. El instrumento está equipado con un sensor de presión y temperatura. La Figura A2-2 muestra un diagrama de Hovmöller (tiempo – profundidad, con la corriente representada en escala de color) de la corriente rotada a lo largo del eje principal del río. La línea negra muestra el nivel de agua reconstruido a partir del registro de presión del perfilador.

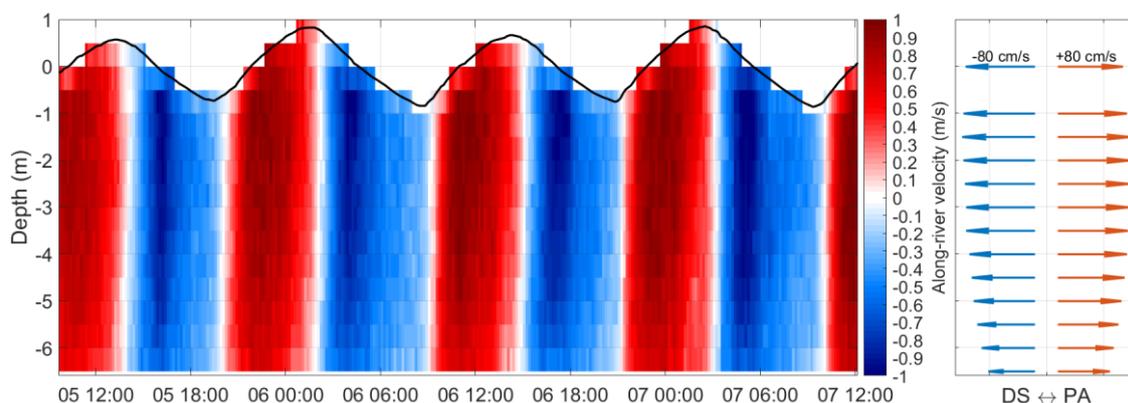


Figura A2-2 – Panel izquierda: diagrama de Hovmöller de la corriente rotada a lo largo del eje principal del río, medida por el ADCP fondeado en Queipo. La escala de colores indica en tonos de rojo (azul) una corriente positiva (negativa) dirigida hacia la presa de Alcalá del Río (desembocadura). La línea negra muestra el nivel de agua reconstruido a partir del registro de presión del ADCP. Panel derecho: vectores de corriente rotada a lo largo del eje principal del río, promediada en los periodos de máxima pendiente del nivel del mar. Las corrientes son positivas (hacia la presa de

Alcalá del Río – PA) durante las mareas llenantes (pendientes positivas – en rojo) y negativas (hacia la desembocadura – DS) durante las mareas vaciantes (pendientes negativas – en azul).

Los perfiles de corriente muestran una clara periodicidad mareal (semidiurna) que genera corrientes positivas (en rojo), dirigidas hacia la cabecera del estuario (presa de Alcalá del Río) durante la fase llenante de la marea, y negativas (en azul), dirigidas hacia la desembocadura durante la fase vaciante. Los datos muestran valores fiables de la corriente hasta aproximadamente 50 cm (una celda) por debajo del nivel de agua, debido a la interferencia de la propia superficie que degrada localmente la señal.

En el panel de la derecha se muestran dos perfiles típicos de corriente obtenidos promediando todas las fases de marea llenante y vaciante, considerandos los máximos positivos y negativos de la pendiente del nivel de agua, respectivamente. Ambos perfiles muestran una simetría muy acentuada y el típico gradiente vertical negativo (cizalla de velocidad) con la profundidad, indicio del efecto disipativo de la fricción con el fondo.

Para investigar en detalle la contribución de la dinámica mareal en la estructura vertical de corriente, se ha realizado un análisis armónico¹ de la principal constituyente semidiurna lunar M_2 , la principal diurna lunar K_1 y algunas otras constituyentes de alta frecuencia (conocidas como constituyentes no-lineales) como la tercediurna M_3 , cuartidiurna M_4 y sextidiurna M_6 , que responden a la interacción de la corriente con la topografía del fondo. Como era de esperar, la constituyente más importante en términos de contribución a la corriente total es la semidiurna M_2 , que presenta una relación señal/ruido dos órdenes de magnitud mayor que todas las demás, y una ratio promedio de amplitud del semieje mayor a semieje menor de 8:1. Las siguientes constituyentes en orden de importancia son M_6 y M_4 . Por estas razones, nos centramos exclusivamente en el análisis de la constituyente M_2 .

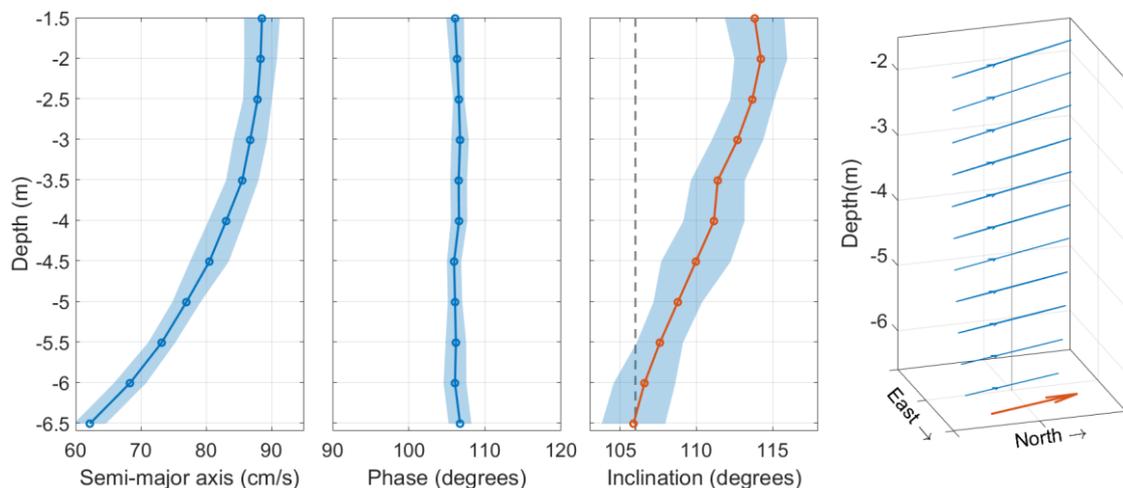


Figura A2-4.1 – Perfiles de constantes armónicas calculadas para la constituyente M_2 de la corriente medida en Queipo. Desde izquierda a derecha, amplitud del semieje mayor (cm/s), fase en grados referidos a Greenwich e inclinación en grados contados en sentido anti horario desde el este. La línea discontinua en el tercer panel indica la orientación del río en esa zona. El cuarto panel representa las elipses de marea en perspectiva. La flecha naranja representa la orientación del eje principal del río.

La Figura A2-4.1 muestra los perfiles de amplitud del semieje mayor, la fase referida a Greenwich y la inclinación referida al este geográfico. La amplitud del semieje menor, que no se muestra en figura, es de aproximadamente 1 mm/s para toda la columna de agua, reflejando una elevada

¹ La longitud de la serie temporal sólo permite extraer las constituyentes citadas en el texto.

excentricidad de las elipses (~ 1), y una clara polaridad de la corriente. La magnitud de la corriente semidiurna se caracteriza, por tanto, exclusivamente por la amplitud del semieje mayor, que de hecho corresponde al perfil promedio representado en la Figura A2-2. La velocidad de la corriente disminuye progresivamente con la profundidad, por efecto de la fricción con el fondo, ubicado aproximadamente 1.5 m más abajo. La fase constante ($\sim 106^\circ$) refleja una homogeneidad total en la velocidad de propagación de la corriente, mientras que la inclinación muestra una ligera rotación anti horaria (de aproximadamente 10°) de la corriente desde el fondo hasta la superficie. La corriente está perfectamente encauzada en el canal de navegación cerca del fondo, y gira ligeramente a noroeste a medida que se acerca a la superficie.

El mismo análisis armónico realizado para la corriente, se ha aplicado al nivel de agua reconstruido a partir del registro de presión del ADCP (ver Figura A2-2). La Tabla A2-1 muestra las constantes armónicas obtenidas.

Tabla A2-1 – Constantes armónicas de las constituyentes extraídas del análisis armónico del nivel de agua reconstruido a partir del registro de presión del ADCP

Constituyente	Amplitud (cm)	Fase (grados)
M ₂	69.5 ± 1.1	184 ± 1
K ₁	12.2 ± 0.9	134 ± 5
M ₃	2.7 ± 1.2	332 ± 23
M ₄	3.8 ± 1.0	259 ± 18
M ₆	5.5 ± 1.1	246 ± 12

De nuevo la constituyente semidiurna lunar M₂ presenta una notable predominancia sobre las demás, aunque las ratios de amplitud son algo menores respecto al caso de la corriente. La corta longitud de la serie temporal analizada no permite diferenciar otras constituyentes semidiurnas y diurnas más allá de la M₂ y K₁, que, por tanto, se consideran representantes únicas de las bandas de frecuencia correspondientes. La K₁ incrementa su importancia relativa a la M₂, respecto al caso de la corriente, y aquí presenta una ratio en amplitud de 5:1. El nivel de agua, por consecuencia, presenta cierta desigualdad diurna (ver línea negra en la Figura A2-2). Siguen, en orden de magnitud, la M₆, la M₄ y la M₃ con ratios notablemente más bajos.

La fase de la M₂ presenta un valor de 184° , que corresponde a un retraso respecto a la fase de la corriente ($\sim 106^\circ$) de 78° , un valor cercano a una cuadratura entre corriente y nivel de agua (90°). Si bien respaldado por incertidumbre pequeñas, este resultado sorprende por acercarse a los valores típicos de una onda estacionaria, que no debe ser el caso del estuario del Guadalquivir. Es posible que el análisis armónico realizado con tan poca longitud de la serie, esté afectado por la asimetría de la señal de corriente semidiurna y no esté representando correctamente la fase. A confirmación de esto, la onda de marea del nivel de agua es deformada por las constituyentes de alta frecuencia (especialmente la M₄), y presenta una fase de llenante más corta (~ 5 horas y 50 minutos), que la de vaciante (~ 6 horas y 50 minutos).

4.2. Temperatura y salinidad

Junto con el ADCP ubicado en las proximidades de la sección de Queipo, también se ha fondeado un sensor de conductividad y temperatura (CT) Hobo Onset U24-002-C, que se ha configurado para medir con un intervalo temporal de 1 minuto. La Figura A2-4.2 muestra estos datos, juntos con los de corriente descritos anteriormente.

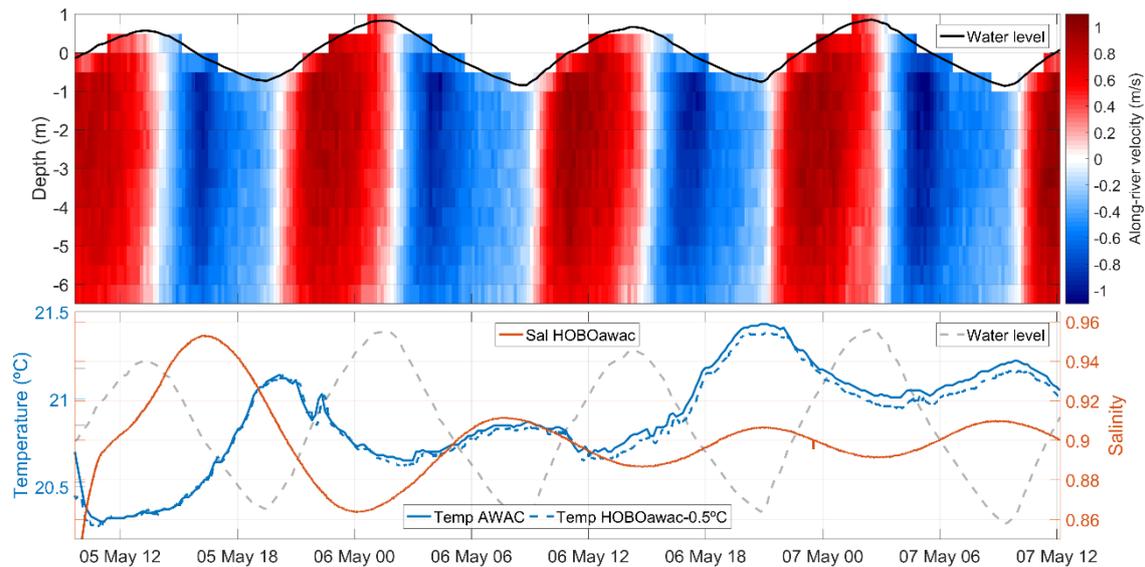


Figura A2-4.2 – Panel superior: velocidad longitudinal (ver Figura A2-2). Panel inferior: series temporales de temperatura y salinidad medidas por el CT fondeado junto con el ADCP. También se representan la temperatura medida por el termistor integrado en el ADCP y el nivel del río (ver panel superior).

El sensor integrado en el ADCP y el sensor HOBOWac devuelven una temperatura muy similar, pero con un bias de medio grado. En base a test realizados anteriormente en laboratorio, donde se pudo comprobar que los sensores HOBOWac suelen tener cierto bias respecto a otros instrumentos de mayor precisión, en este caso se ha optado por corregir manualmente este último y considerar el sensor de temperatura del ADCP como la referencia. La serie de temperatura muestra una coincidencia muy clara entre los máximos y el cruce con cero de la corriente al final del semiciclo de marea vaciante. Éste, a su vez, corresponde con las bajamares. Por el mismo razonamiento presentado anteriormente, la marea vaciante, que trae agua desde la cabecera del estuario, es la que impulsa el aumento de temperatura, que encuentra su máximo al final de este proceso, en bajamar. Cuando la marea invierte, y empieza a entrar agua del océano más fría, la señal de temperatura refleja esta disminución, con mínimos que coinciden aproximadamente con las pleamares. El análisis armónico para la temperatura devuelve una amplitud de 0.23 ± 0.01 °C y una fase de $\sim 15 \pm 2^\circ$ para la M_2 , que corresponde a un desfase de aproximadamente 170° respecto al nivel del río ($\sim 184^\circ$), confirmando el comportamiento descrito.

Superpuesta a esta variabilidad semidiurna de origen mareal se observa una desigualdad diurna debida al ciclo de calentamiento superficial, por radiación directa del sol. Los picos máximos de las bajamares que coinciden con las horas de luz son los que presentan los valores más altos. También se observa cierta tendencia positiva a lo largo de los tres días medidos, que coincide con un aumento paulatino de la temperatura del aire (no mostrada), registrado en ese mismo periodo por los sensores de la red de estaciones agroclimáticas de la Junta de Andalucía.

La serie de salinidad presenta un comportamiento muy anómalo. Se observa cierta señal semidiurna, enmascarada por una progresiva disminución de la amplitud. Los máximos parecen coincidir con las bajamares, al final del semiciclo de marea vaciante, un resultado que no cuadra con la fuente de sal que es el océano. Se debería observar más bien lo contrario. Una posible explicación podría ser un mal funcionamiento del sensor debido posiblemente a una colmatación del mismo por los sedimentos disueltos en el agua.

A poca distancia del fondeo, durante el primer día de campaña, se han fondeado otros dos CT HOBO en los extremos de la sección de Queipo (ver Figura). La Figura A2-4.3 muestra las series registradas por ellos, juntos con los demás datos ilustrados en las anteriores.

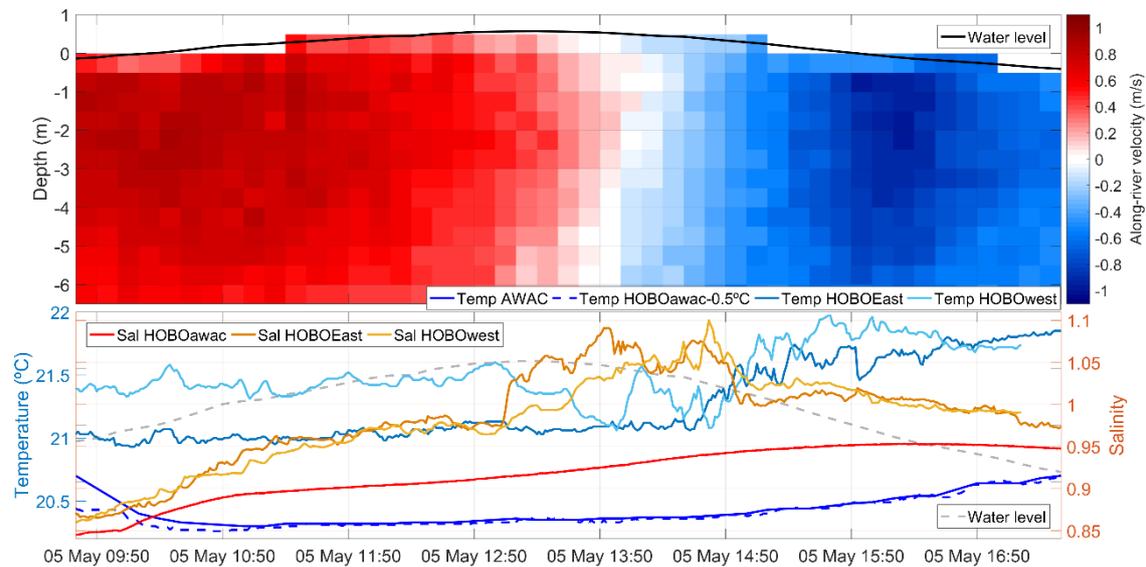


Figura A2-4.3 – Similar a la Figura A2-4.2 con el añadido de las series de temperatura y salinidad registradas por los dos HOBO fondeados en los extremos de la sección de Queipo. Ver leyenda para el código de colores.

Las dos series de temperatura (en azul claro y oscuro para el HOBO del margen oeste y este, respectivamente) presentan una elevada similitud, y cierta coherencia con los valores observados por el termistor del ADCP y el HOBO montado en él. Sin embargo, los primeros presentan un bias positivo de un grado centígrado aproximadamente, respecto a los segundos. La serie del sensor montado en la orilla oeste presenta una temperatura inicial unas cuatro décimas de grado por encima del sensor ubicado en la orilla este, posiblemente debido a la diferente insolación (que empieza antes en la orilla oeste) o a cierta estructura transversal del flujo. De hecho, esta diferencia se reduce cuando empieza a notarse el aumento de temperatura procedente de la cabecera, en sincronía con el cambio a marea vaciante (ver nivel del mar en línea gris discontinua). La salinidad presenta un máximo en la pleamar al final del semiciclo de marea llenante, que trae agua más salina del océano. No se observan diferencias sustanciales entre las dos series de salinidad, excepto el incremento más repentino de la serie registrada en la orilla este (naranja oscuro), cuyo valor máximo es alcanzado una hora más tarde en la orilla opuesta (naranja claro).

4.3. Secciones de perfiles de temperatura y salinidad

En esta sección se describe la variabilidad semidiurna observada en los perfiles recursivos realizados en las tres secciones analizadas en la campaña. Solo se discuten algunas secciones seleccionadas.

4.3.1. Queipo

La sección de Queipo cubre casi un ciclo entero de marea, desde la primera bajamar del día 5 de mayo hasta pocas horas antes de la bajamar siguiente. Se han realizado 156 perfiles CTD, por un total de 15 secciones, con un tiempo promedio de 30 minutos aproximadamente para completar cada sección. Durante toda la jornada de trabajo, han permanecido instalados dos CT HOBO en los márgenes laterales de la sección.

La salinidad abarca un rango de 0.8 a 1.2 PSU, con valores muy bajos esperables para una sección ubicada a aproximadamente 60 km aguas arriba de la desembocadura. El primer perfil de esta sección muestra valores mínimos de salinidad, especialmente en superficie (Figura A2-4.4).

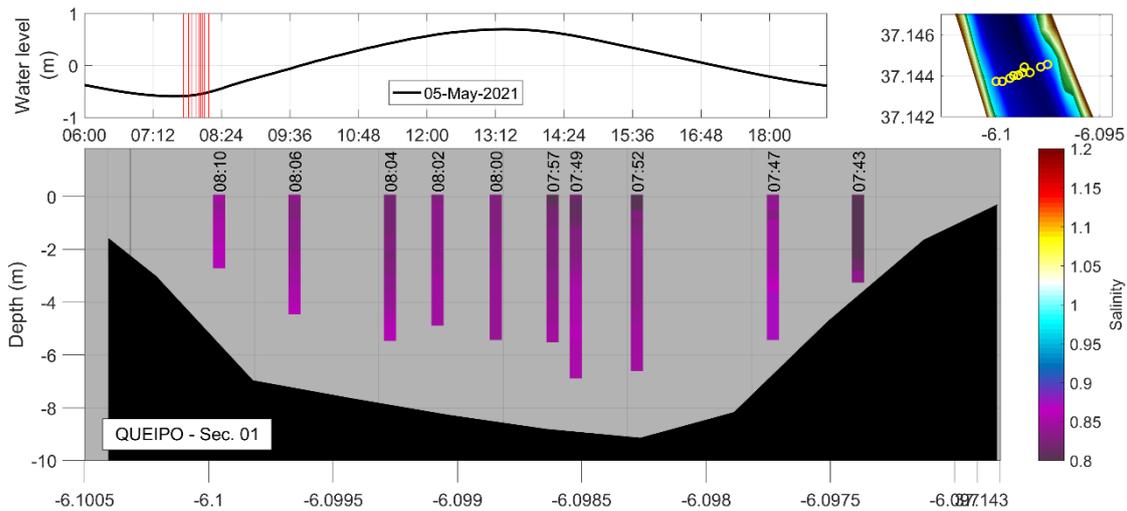


Figura A2-4.4 – Panel de abajo: perfiles de salinidad de la primera sección realizada en la zona de Queipo. Cada perfil está etiquetado con la hora de comienzo del mismo. Panel de arriba a la izquierda: nivel del río modelado en el centro del canal (línea negra) y marcas temporales de todos los perfiles realizados en esa sección (barras verticales rojas). Panel de arriba a la derecha: mapa de ubicación de los perfiles y batimetría del río en el mallado del modelo. Para conocer la orientación de la sección, hay que referirse al tiempo etiquetado en cada perfil. En este caso, por ejemplo, la sección se ha realizado de este a oeste.

Se trata del final del semiciclo de marea vaciante, durante la cual la corriente máxima saliente (hacia la desembocadura) arrastra el agua más dulce procedente de la cabecera. El gradiente vertical positivo (la salinidad aumenta ligeramente con la profundidad) es coherente con la estructura débilmente baroclina de la columna de agua. La Figura A2-4.5 muestra el caso opuesto, referido a la pleamar.

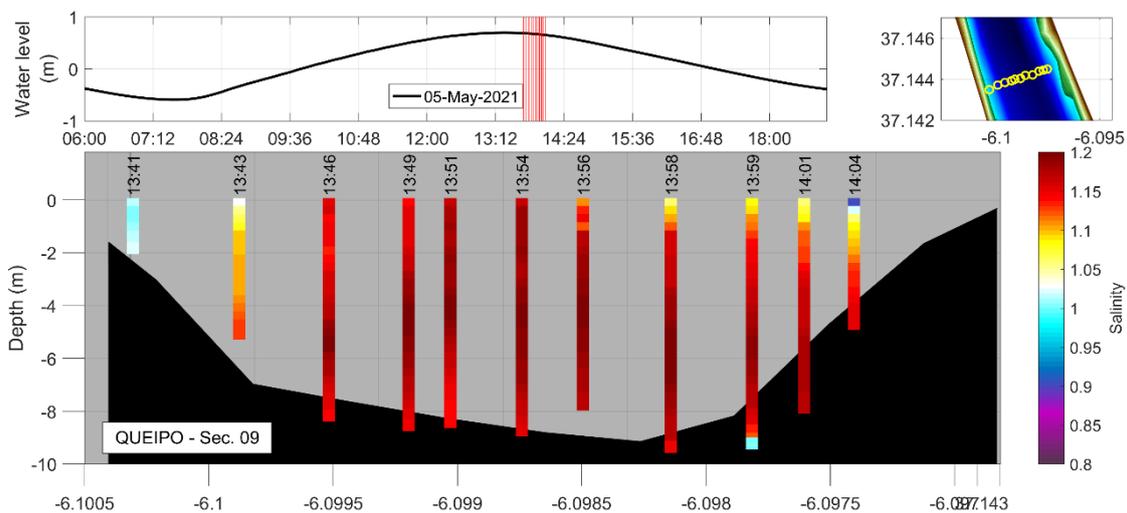


Figura A2-4.5 – Como en Figura A2-4.4 para la sección muestreada en pleamar.

Durante la marea llenante, el río se llena de agua procedente de la desembocadura, y esto se refleja en la estructura observada al final de la pleamar: los valores de salinidad son máximos, especialmente en la parte central del río y en las capas más profundas. La superficie y los

márgenes presentan los valores más bajos. Notar los valores más bajos de salinidad del margen oeste respecto al este, coherentes con las series de HOBO mostradas en la Figura A2-4.3.

Para ilustrar la estructura y variabilidad de la temperatura se presentan las figuras A2-8 y A2-9, correspondientes al principio y casi al final de la marea vaciante. El elevado gradiente vertical se debe a la fuerte insolación solar recibida a lo largo de la mañana, notable en los días de campaña.

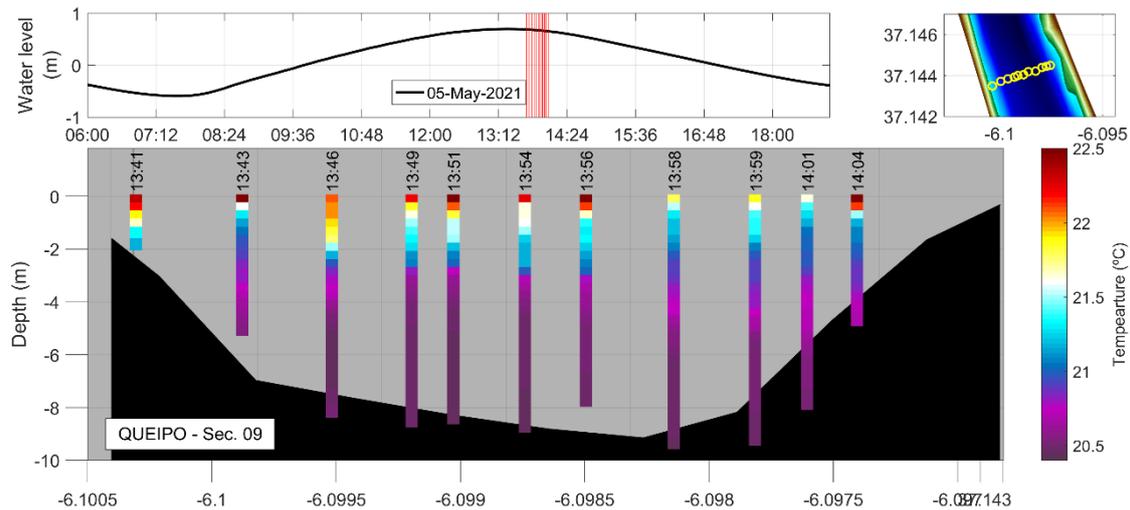


Figura A2-4.6 – Como en Figura A2-4.4 para la temperatura en pleamar.

El agua más fría procedente del océano ha llenado casi completamente el río, después del semiciclo de marea llenante (contrastar con la salinidad de la Figura A2-4.5), y es prevalentemente el calentamiento superficial quien instaura una clara termoclina en torno a los 3-4 metros de profundidad.

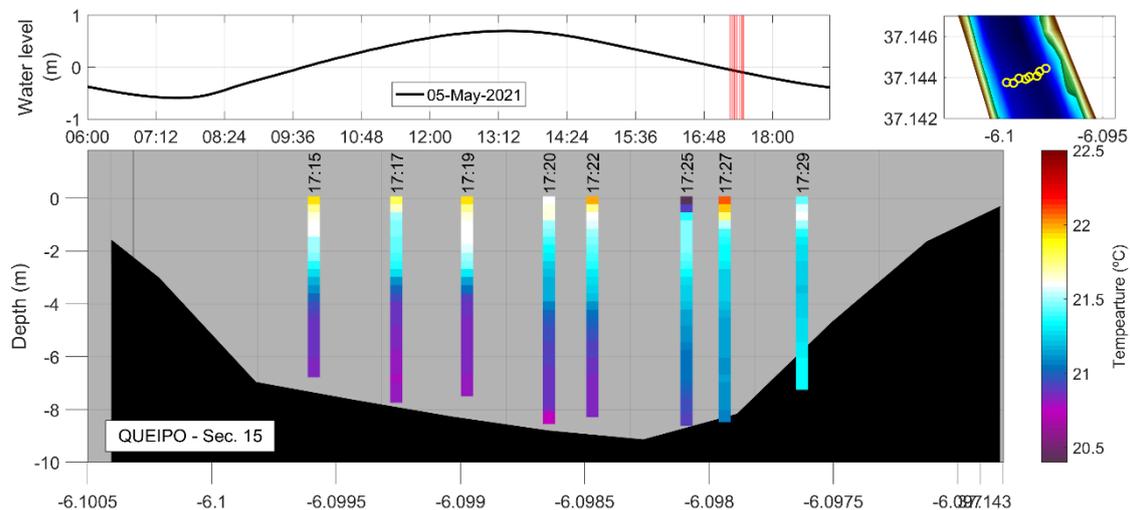


Figura A2-4.7 – Como en Figura A2-4.6 para la última fracción del semiciclo de marea vaciante.

Durante el resto del día, y debido al efecto conjunto de insolación y corriente saliente en la marea vaciante, que trae agua cálida de aguas arriba del río, la columna de agua se va calentando progresivamente hacia abajo, y va reduciéndose el gradiente térmico (Figura A2-4.7).

4.3.1. Torre

En la sección de Torre se han realizado 198 perfiles CTD con un total de 12 secciones. Cada sección está formada por cerca de 20 perfiles, que se han llevado a cabo en algo menos de una

hora en promedio. Al igual que en Queipo, los perfiles cubren un ciclo de marea casi entero, desde la primera bajamar del 6 de mayo hasta casi la segunda en la tarde del mismo día. En Torre también se han fondeado dos CTs HOBO en las orillas de la sección.

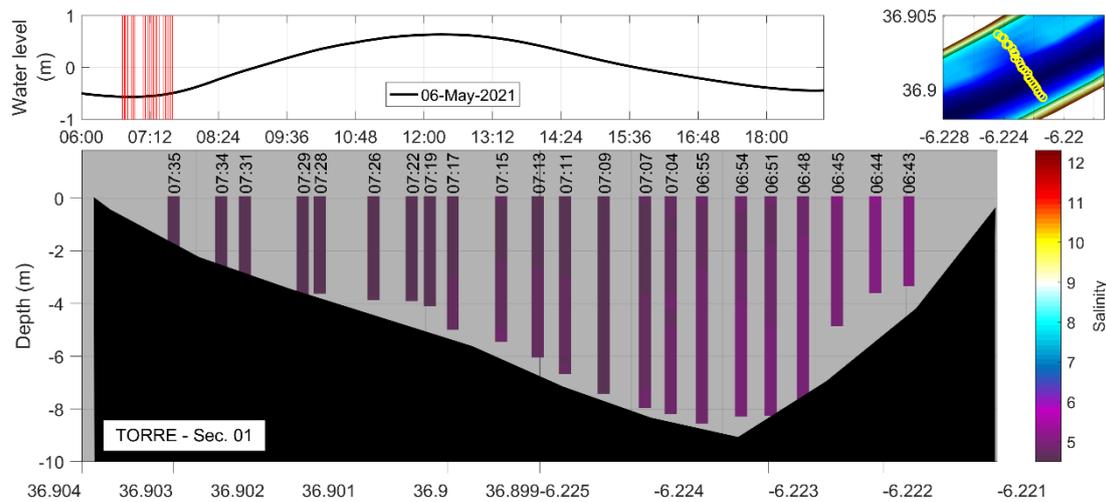


Figura A2-4.8 – Como en Figura A2-4.4 para la sección de Torre.

Al ser la sección más ancha, la de Torre es la de menor sinopticidad. El tiempo necesario para completarla hace que los primeros y últimos perfiles no sean representativos del mismo instante de tiempo. Ello se observa en la primera sección de la mañana realizada alrededor de la bajamar (Figura A2-4.8): la homogeneidad de la columna de agua, si bien elevada, no es completa. Las salinidades son, en general, muy bajas, pero las más bajas se observan en el margen oeste donde se han realizado los perfiles más tardíos y que por ello están más cercanos al mínimo absoluto de salinidad que se da poco después de la bajamar. La siguiente sección (gráfica no mostrada) muestra total homogeneidad, con mínima salinidad en la columna de agua en todos los perfiles.

El máximo de salinidad se observa algo después de la pleamar (Figura A2-4.9), con los valores mayores en la capa profunda del centro del canal. Los dos perfiles del margen este presentan salinidades algo menores, coherentes con lo observado en los CTs fondeados en las orillas del río (ver Figura A2-4.11).

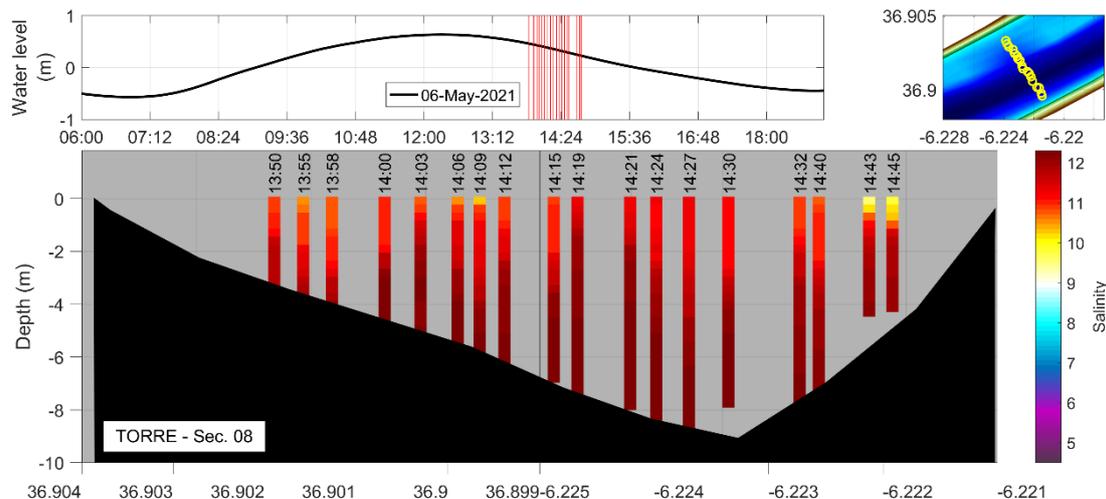


Figura A2-4.9 – Como en Figura A2-4.8 para la pleamar.

La temperatura refleja la misma dependencia de dinámica mareal que la salinidad. La sección muestreada en la mitad de la marea vaciante (Figura A2-4.10) muestra una temperatura mayor que la oceánica consecuencia de la llegada de agua más dulce y cálida proveniente de río-arriba. Nótese el máximo de temperatura en la orilla este de la sección, donde la corriente de vaciante parece tener preferencia por fluir. El resultado es coherente con las series temporales observadas en los dos CTs de las orillas (Figura A2-4.11), y es robusto dada la progresión temporal de la sección. Ésta, en efecto, se desarrolla de este a oeste y, si la señal de calentamiento superficial fuera el mero reflejo de la insolación, debería tener una tendencia espacial contraria pues los perfiles más tardíos deberían ser más cálidos. Sin embargo, sucede lo contrario, indicio del origen dinámico (mareal) de esa anomalía.

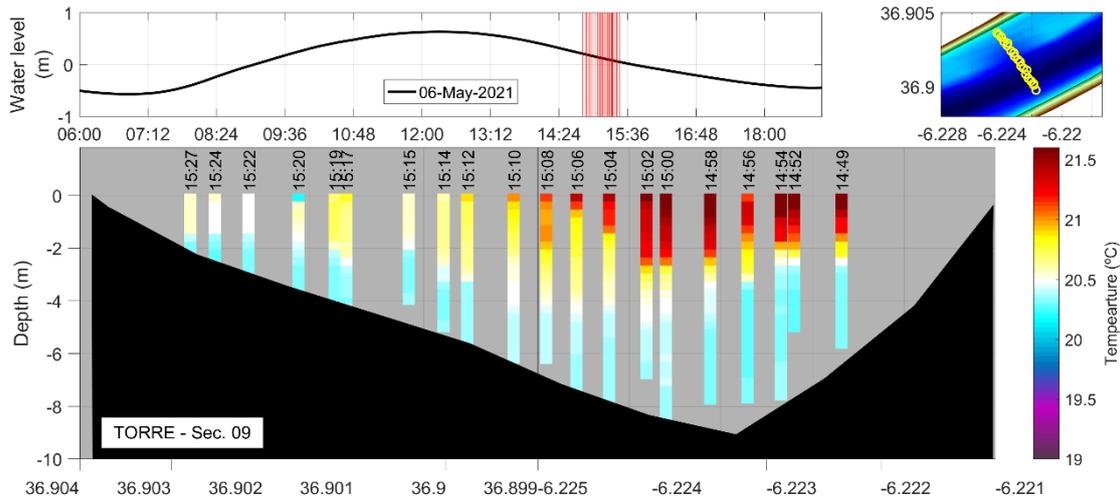


Figura A2-4.10 – Como en Figura A2-4.6 para la mitad de la marea vaciante en la sección de Torre.

La Figura A2-4.11 muestra las series temporales de temperatura y salinidad registradas por los dos CTs fondeados en las orillas de la sección de Torre. Ambas series de salinidad están en fase con el nivel, reflejando cierta naturaleza progresiva en la onda de marea. El rango de variabilidad de la salinidad es notable, abarcando una diferencia de hasta 8 PSU, esperable por la cercanía de esta sección al océano. Los valores más altos se observan en la orilla oeste, donde posiblemente se concentre la corriente procedente del océano, un hecho confirmado por el aumento menos marcado de la temperatura durante el semiciclo de marea vaciante, cuando el agua fluye río abajo (ver también la Figura A2-4.10).

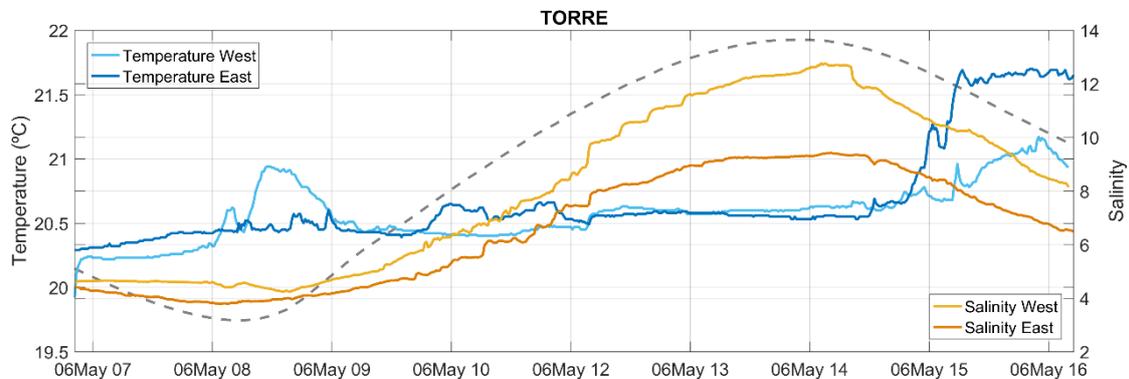


Figura A2-4.11 – Series de temperatura (tonos azules) y salinidad (tonos naranja) medidas en los márgenes de la sección de Torre. La línea gris es el nivel simulado por el modelo en un punto central de la sección.

4.3.1. Vetalpalma

La sección de Vetalpalma es la que tiene menos observaciones pues sólo se muestreó la última mañana de la campaña. Se han realizado 77 perfiles CTD en 5 repeticiones con un promedio de 15 perfiles cada una y una duración algo inferior a media hora por sección. La fase marelal en que se realizó va desde poco antes de la primera bajamar del día 7 de mayo hasta pocas horas después de ella. Al igual que en las otras dos secciones, se instalaron dos CTs en las orillas durante la realización de los perfiles CTD.

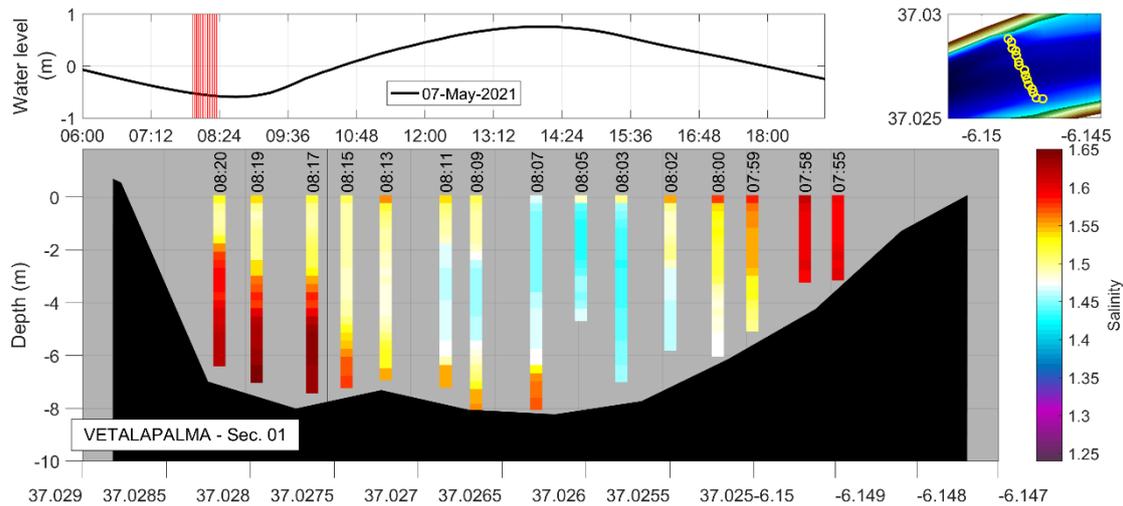


Figura A2-4.12 – Como en Figura A2-4.4 para la sección de Vetalpalma.

La Figura A2-4.12 muestra la primera sección de la mañana realizada una hora aproximadamente antes de la bajamar. La corriente procedente de río arriba ha estado ventilando esta zona con agua dulce durante todo el semiciclo previo de marea vaciante. Sin embargo, aún no se ha alcanzado el mínimo de salinidad generalizado en toda la sección. De hecho, quedan valores relativamente elevados de salinidad (~ 1.6 PSU) en la capa profunda del margen oeste y en la zona somera de la orilla este. Esta estructura se mantiene al menos hasta la mitad de la marea llenante (Figura A2-4.13), sugiriendo preferencia del agua oceánica (dulce) a fluir por el margen oeste (este) durante la creciente (vaciante).

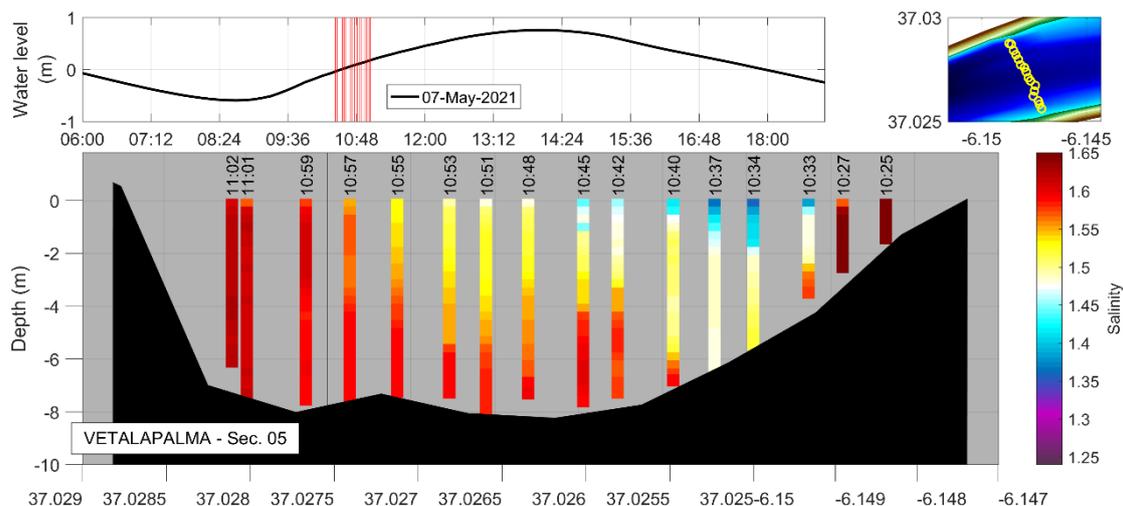


Figura A2-4.13 – Como en Figura A2-4.12 para la primera parte de la marea llenante.

El contraste entre las dos orillas lo confirma las series temporales medidas por los dos CTs fondeados en los márgenes (Figura A2-4.14): la salinidad, si bien en ambas orillas refleja el efecto de la onda de marea progresiva (en fase con el nivel del río), es sistemáticamente más alta en la orilla este (ver también las Figuras A2-14 y A2-15), con pico entre las 10 y 10:30, que también se puede observar en la Figura A2-4.13.

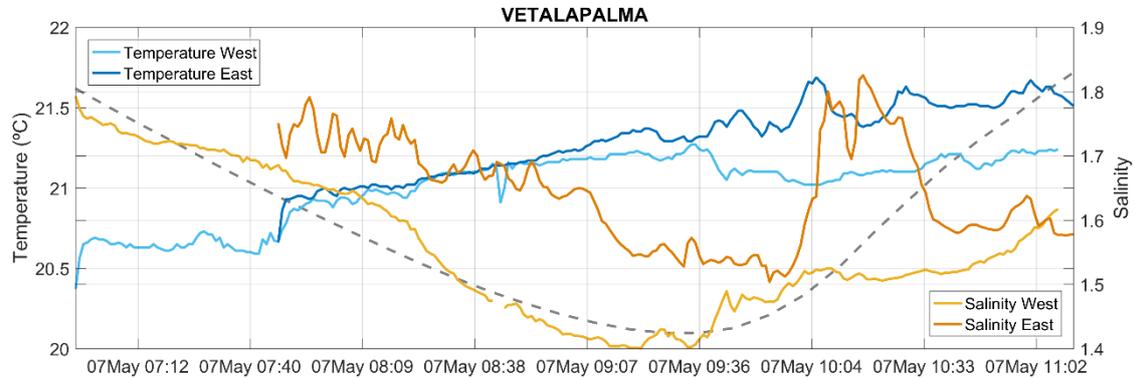


Figura A2-4.14 – Como en Figura A2-4.11 para la sección de Vetlapalma.

5. Conclusiones

Las numerosas observaciones recogidas entre los días 5 y 7 de mayo permiten una descripción detallada de la dinámica mareal en las tres secciones analizadas. Éstas están distribuidas a lo largo del río en tres zonas con alcances muy distintos de la dinámica oceánica. La sección de Torre, ubicada próxima a la desembocadura, presenta las salinidades más elevadas (más de 12 PSU), y el mayor rango de variabilidad (~ 8 PSU). En Queipo, en cambio, a unos 60 km de la desembocadura, la influencia del océano está mucho más atenuada y los valores de salinidad son mucho más bajos (no superan 1.2 PSU) y menos variables (el rango es de apenas 0.4 PSU). La sección de Vetlapalma, analizada con menos detalle por ser más corta en el tiempo, presenta valores de salinidad intermedios y rangos de variabilidad más reducidos, aunque esto último seguramente se deba a la porción incompleta del ciclo de marea observado (Figura A2-5.1, panel izquierdo).

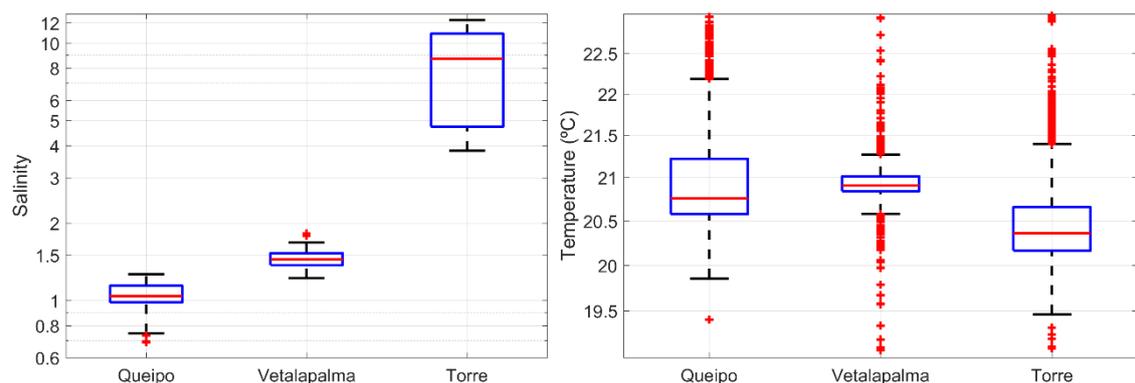


Figura A2-5.1 – Box-whiskers plot de la salinidad (izquierda) y temperatura (derecha). Las barras horizontales rojas indican la mediana, las cajas el rango intercuartil (entre el primero y el tercer cuartil). Las barras negras los límites de mediana ± 1.5 veces el rango intercuartil, y las cruces rojas los valores que exceden estos límites (outliers).

La temperatura (Figura A2-5.1, panel derecho) también muestra un gradiente coherente entre la desembocadura (Torre), que por estar más cerca del océano presenta los valores más bajos, y Queipo, más cerca de la cabecera, con temperaturas más altas. La sección de Vetlapalma

presenta un rango de variabilidad excesivamente reducido, seguramente debido al corto tiempo de muestreo empleado.

Especialmente sugerente en las secciones de Torre y Vetalpalma es la estructura transversal del flujo marea que parece desprenderse de las distribuciones espaciales de temperatura y salinidad, con el flujo entrante (saliente) de agua más salina (dulce) fluyendo lo largo de la orilla oeste (este). Evidentemente se trata de inferencias basadas en proxies que deberán ser confirmado con observaciones simultáneas de corriente en ambas orillas.

Si atendemos a la relación entre salinidad y nivel, representadas con líneas naranja y gris iscontinua, respectivamente, en las Figuras A2-5, A2-13 y A2-16, se observa un progresivo aumento del desfase entre las dos señales desde la desembocadura hacia la cabecera. La onda progresiva que remonta el estuario desde el océano abierto, y que transporta sal, deja una señal cada vez más erosionada, y más retrasada respecto a la del propio nivel.

Más detalles sobre la evolución de la cuña salina a lo largo del estuario son difíciles de inferir a partir de las observaciones disponibles, que, si bien muy detalladas en términos de resolución temporal, presentan información limitada sobre la estructura espacial longitudinal del río. Para comprender como ésta va evolucionando con la dinámica marea, es fundamental disponer de más puntos de observaciones que registren tanto las propiedades termohalinas de la columna de agua como la propia corriente.



PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN DE LA NAVEGACIÓN EN LA EUROVÍA E.60.02 GUADALQUIVIR
WORKING WITH NATURE

***“Realización de estudios hidrodinámicos y ambientales
en el marco del proyecto de Optimización de la
Navegación en la Eurovía E.60.02 GUADALQUIVIR.
Periodo 2021-2023”***

*Contrato firmado entre la Autoridad Portuaria de Sevilla y el
Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga,
noviembre 2021*

INFORME Nº 3, JULIO 2022

Grupo Oceanografía Física, Universidad de Málaga (GOFIMA)



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



**Funded by
the European Union**

DISCLAIMER: The contents of this publication are the sole responsibility of GOFIMA and do not necessarily reflect the opinion of the European Union.

ÍNDICE

1. Implementación del esquema conceptual de uso de agua de riego	4
2. Comportamiento del tapón salino y el prisma mareal tras realizar dragados de mantenimiento.....	6
2.1.- Actualización de la batimetría del modelo: octubre 2021.....	6
2.2.- Recalibración del modelo.....	7
2.3.- Comparación de las batimetrías pre- y post-dragado	10
2.4.- Resultados de las simulaciones numéricas	12
2.4.1.- Nivel	13
2.4.2.- Salinidad.....	15
2.4.3.- Corriente longitudinal	16
2.4.4.- Prisma mareal	18
2.5.- Conclusiones	20
3. Validación del modelo hidrodinámico con los datos recogidos en verano del 2021 por TECNOAMBIENTE	21
3.1.- Estación de Salinas	22
3.2.- Estación de Lebrija	25
3.3.- Estación de Queipo	27
3.4.- Conclusiones	29
4. Implantación de llanuras mareales en el estuario.	30
4.1.- Presentación de los escenarios estudiados.	30
4.2.- Influencia de la ubicación de la llanura para una configuración dada de la misma.	32
4.2.1.- Nivel	32
4.2.2.- Salinidad.....	34
4.2.3.- Corriente longitudinal	35
4.2.4.- Prisma mareal	37
4.3.- Influencia de la configuración de la llanura para una ubicación dada de la misma	39
4.3.1.- Nivel	39
4.3.2.- Salinidad.....	40
4.3.3.- Corriente longitudinal	41
4.3.4.- Prisma mareal	42
4.4.- Conclusiones	44
5. Primeros casos de estudio de dispersión de contaminantes en el estuario	46
5.1.- Identificación de las principales fuentes de contaminación en el estuario	46
5.2.- Modelo de dispersión de contaminantes	47
5.3.- Vertido de trazadores en la Antesclosa del Puerto de Sevilla	48

5.4.- Vertido de trazadores en la EDAR de Sanlúcar de Barrameda	51
5.5.- Conclusiones y planteamiento de futuros estudios.....	53
6. Forzamientos necesarios para el modelo operacional. Estudios preliminares.....	54
6.1.- Consideraciones previas	54
6.2.- El esquema operacional a implementar	54
6.2.1.- Forzamiento astronómico.....	55
6.2.2.- Marea meteorológica.....	55
6.2.3.- Forzamiento atmosférico en superficie	56
6.2.4.- Prescripción propiedades hidrológicas	56
6.2.5.- Descargas de agua dulce	57
6.3.- Efecto de la cizalla del viento en el estuario. Casos de estudio	58
6.3.1.- Respuesta del nivel en puntos seleccionados del estuario a vientos cambiantes en dirección e intensidad. Pruebas preliminares.....	58
6.3.2.- Influencia del viento sobre la dinámica del estuario	61
6.4.- Conclusiones sobre el efecto del viento y su importancia en el modelo operacional....	65
Referencias.....	67
Anexo 1. Llanuras mareales, posibles ubicaciones	69

1. Implementación del esquema conceptual de uso de agua de riego

Tanto desde un punto de vista hidrodinámico como socioeconómico, uno de los aspectos más críticos en la investigación de la dinámica estuarina del Guadalquivir es el estudio de la cuña o tapón salino, entendido como el lugar donde la salinidad decrece rápidamente como resultado de la transición entre el agua oceánica y fluvial. Como se introdujo en el capítulo 3 del Informe anterior, la posición y magnitud del tapón salino en el estuario está influenciado por el volumen de agua descargado desde la presa. Específicamente en este estuario, por el extensivo uso agrícola que se hace del agua dulce, estos aportes ocurren principalmente en verano, coincidiendo con la campaña del cultivo del arroz que tiene lugar entre mayo y octubre (ver Figura 3.1 del Informe 2). Durante este periodo, las descargas de agua dulce provenientes fundamentalmente de la presa de Alcalá del Río se incrementan a demanda de los arroceros, lo que en principio debería conllevar un descenso de la cuña salina hacia la desembocadura. En la práctica esto no siempre ocurre, dado que esta agua dulce es extraída por el sector agrícola y posteriormente revertida en parte al río. Esta captación de agua provoca una disminución del caudal aguas abajo de la zona arrocera, incrementando la salinidad en el tramo medio del estuario.

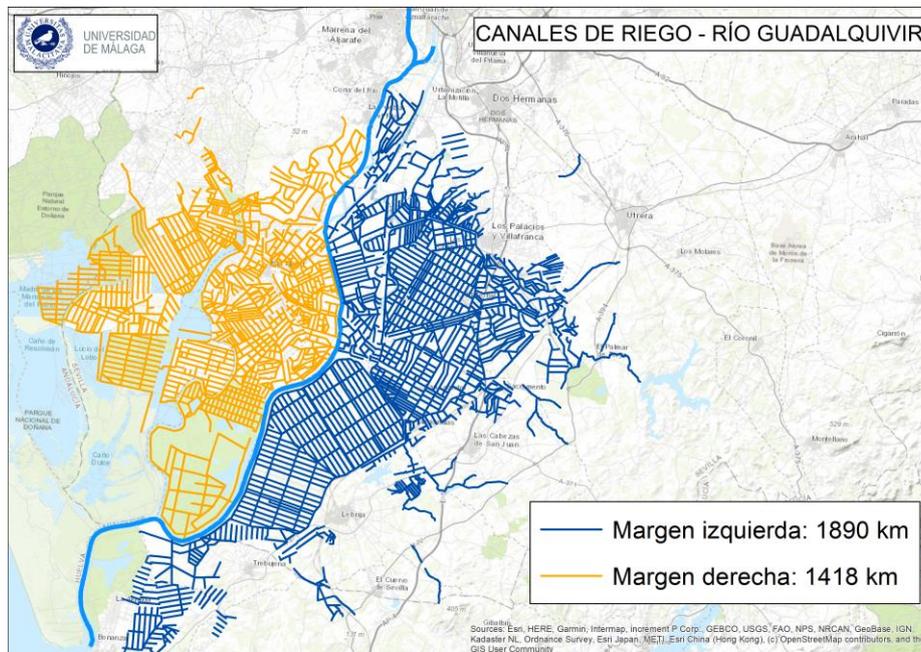


Figura 1.1 – Localización y extensión de los canales de riego de la margen derecha (amarillo) e izquierda (azul) del Estuario del Guadalquivir.

La Figura 1.1 muestra la extensión de los canales de riego de dichas áreas agrícolas, discriminados por colores según su posición en la margen del estuario. Esta ingente extensión de canales corresponde a sendos campos de arroz, que son regados mediante un complejo mecanismo de inundaciones progresivas de las llanuras cultivadas y una recirculación del agua dulce desde las tomas de captación hasta los canales de desagüe al estuario. El Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), mantiene un registro cuantitativo de captación de agua en 23 localizaciones a lo largo del tramo medio del estuario (ver Figura 3.6 del Informe 2). En tanto que los caudales extraídos del estuario son medidos con precisión, la recirculación al río del agua empleada para el riego solo está estimada cualitativamente. Toda esta manipulación artificial del caudal del estuario debe ser necesariamente integrada en el esquema de forzamiento del modelo numérico, para que la

salinidad pueda ser estimada con la misma precisión con la que se reproduce el resto de variables físicas.

Por un lado, es necesario verificar que la cifra de puntos de captación de agua, así como el volumen extraído por cada estación, no estén subestimados con respecto al volumen de extracciones reales, ya que conllevaría sobrestimaciones del caudal efectivo y subestimaciones de la salinidad. Por otro lado, es fundamental determinar qué fracción de caudal extraído por las captaciones es devuelto al estuario tras las labores de riego, y en qué localizaciones ocurre ese retorno de agua. Éste es el aspecto tal vez más difícil de cuantificar, vista la complejidad del sistema de redistribución interna de agua de riego entre las llanuras cultivadas. Además, como es natural en la época del cultivo, el agua extraída del estuario está sometida a insolación intensa y a evaporación que aumentan su salinidad cuando es retornada al río.

En el esquema de uso de agua de riego actualmente empleado en el modelo, se estima una reintroducción de un 75% del volumen de agua extraída originalmente al que se aplica una corrección de salinidad de +1.5 PSU (Figura 3.3 del Informe 2). En el citado Informe, se declaró la intención de tener un encuentro con la Federación de Arroceros de Sevilla y la CHG con el objetivo de mejorar el modelo conceptual de uso de agua y, así, proporcionar una actualización de la validación de salinidad. En dicha reunión, llevada a cabo a finales del pasado mes de junio de 2022, se han abordado aspectos importantes de los protocolos de riego. La Federación ha facilitado un detallado mapa con los principales puntos de toma de agua para regadío y los puntos de vertido de la misma tras su ciclo en los arrozales. También ha informado sobre nuevas actuaciones en curso o a emprender en el futuro inmediato para racionalizar el retorno de agua al estuario a través de un mínimo número de canales de alto caudal, en vez de hacerlo a través de la red actual de numerosos canales dispersos, muchos de ellos con escaso caudal. Toda esta información ha llegado cuando el presente documento se encontraba redactado y en fase de revisión para su edición definitiva. Por esta razón, se ha estimado conveniente que el reajuste del esquema conceptual de uso de agua y la consecuente actualización del modelo se aplacen hasta el próximo Informe.

2. Comportamiento del tapón salino y el prisma mareal tras realizar dragados de mantenimiento.

Este capítulo se dedica a estudiar el efecto de la modificación de la batimetría del canal de navegación debida al dragado de mantenimiento sobre la distribución y variabilidad espacio-temporal de la salinidad a lo largo del estuario. Por la estrecha correlación de la salinidad con la dinámica del estuario, también analiza la influencia de estas modificaciones morfológicas del lecho fluvial sobre el nivel del río, la velocidad longitudinal y el prisma mareal.

El dragado que se estudia se realizó entre los meses de diciembre 2021 y enero 2022. Previamente a estas intervenciones, en octubre 2021, se llevó a cabo un levantamiento batimétrico de toda la vía navegable desde la desembocadura hasta la esclusa. El levantamiento anterior a éste se remonta al 2013, y es con esta información con la que se interpoló la batimetría del modelo en la versión que se ha ido empleando en los estudios realizados hasta la fecha.

Dada la notable separación temporal entre los dos levantamientos, se hace patente la necesidad de actualizar la batimetría del modelo antes de seguir con el resto del estudio.

2.1.- Actualización de la batimetría del modelo: octubre 2021

Antes de interpolar la nueva batimetría del modelo, actualizada a la fecha del levantamiento más reciente (octubre 2021), se ha llevado a cabo una comparación de los dos conjuntos de datos proporcionados por la APS, concretamente el del 2013 y el del 2021. Ambos están referidos al mismo cero de referencia del nivel medio del mar en Alicante y por tanto pueden compararse directamente. La Figura 2.1 muestra un fragmento de las regiones interesadas por los dos levantamientos batimétricos, en la zona de Puntalete, indicadas en cian y amarillo, respectivamente para el año 2013 y 2021.

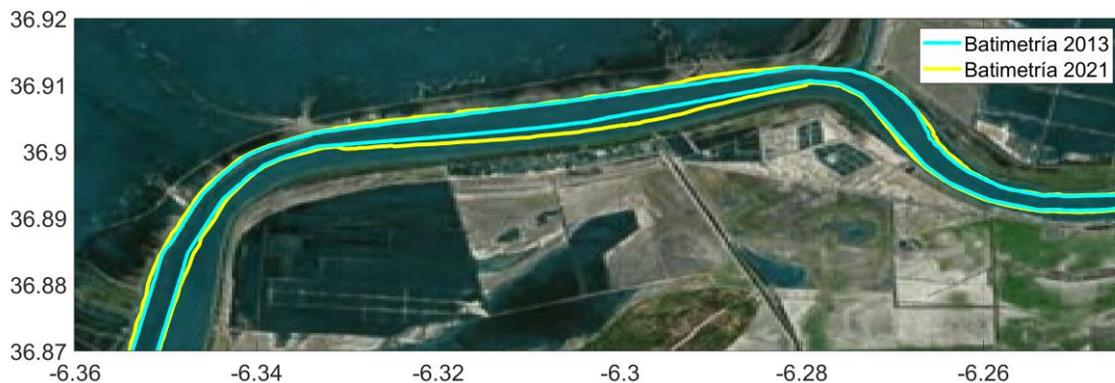


Figura 2.1 – Fragmento de las áreas correspondientes a los levantamientos batimétricos de los años 2013 y 2021, respectivamente en cian y amarillo, en la zona de Puntalete.

En 2013, la zona tenía una superficie de 1990 ha y en 2021, 2380 ha, dando una diferencia de casi 400 ha. Esta notable discrepancia implica que la batimetría más reciente debe proporcionar gran cantidad de información nueva, especialmente en los márgenes del canal de navegación y en las orillas del río (Figura 2.1), donde la batimetría del modelo actual solo está interpolada linealmente hasta las márgenes emergidas. Es esperable, por tanto, que esta nueva información se traduzca en una notable diferencia en la profundidad de las zonas abarcadas por la nueva batimetría. La Figura 2.2 ilustra lo anterior, mostrando la diferencia entre la batimetría interpolada del año 2021 y la del año 2013, ampliada en la zona de Puntalete.

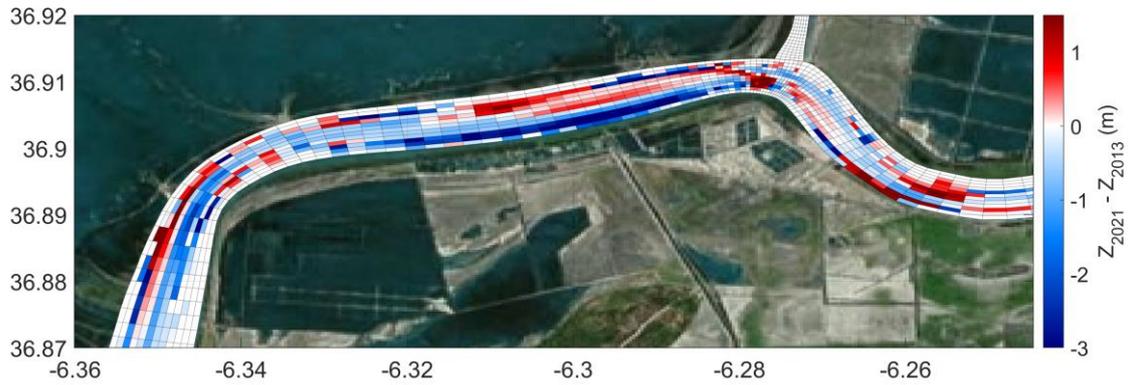


Figura 2.2 – Diferencia entre la batimetría interpolada del 2021 y 2013. Ampliación en la zona de Puntalete. Al considerarse la batimetría del río como valores negativos de Z , las diferencias negativas (positivas) indican una mayor (menor) profundidad del levantamiento del 2021 respecto al del 2013.

En los lugares de la Figura 2.1 donde se observa el mayor ensanchamiento de la zona barrida en el levantamiento del 2021 (en particular hacia la orilla izquierda), la Figura 2.2 presenta una diferencia que puede sobrepasar los -3 m, siendo la batimetría del 2021 más profunda que la del 2013.

Esta tendencia se mantiene a lo largo del eje longitudinal del río. La Figura 2.3 muestra la diferencia media entre la batimetría interpolada del 2021 y la del 2013, calculada en todas las secciones transversales del mallado del modelo a lo largo del canal de navegación.

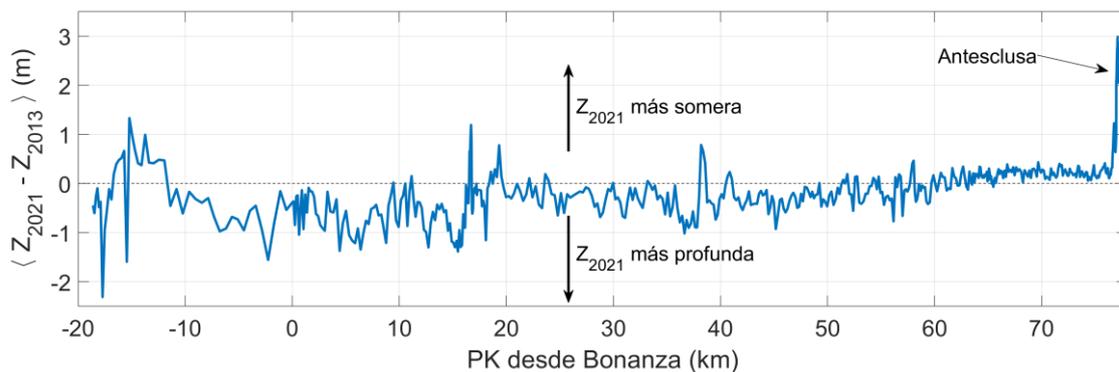


Figura 2.3 – Diferencia media entre la batimetría interpolada del 2021 y del 2013, calculada a lo largo del canal de navegación. Ver nota sobre la convención de signo en la Figura 2.2.

Hasta el PK60 desde Bonanza (aproximadamente el 75 % de la longitud total de la vía navegable), la nueva batimetría es más profunda que la facilitada en 2013. De ahí hasta la esclusa la diferencia positiva es mínima. En cambio, en la esclusa la batimetría del 2021 resulta marcadamente más somera, con diferencias medias de hasta 3 m y picos que alcanzan los 5 m.

2.2.- Recalibración del modelo

Los resultados presentados en la sección anterior indican que el modelo numérico del estuario necesita ser recalibrado para reflejar las modificaciones de la dinámica mareal originadas por cambios en la batimetría.

Tal y como se ha venido haciendo en las tareas de calibración de proyectos anteriores con la APS (AIRIS II-Synchro, GOFIMA, 2020b), la capacidad del modelo numérico de reproducir la dinámica mareal se sigue evaluando mediante técnicas de análisis armónico aplicadas a las series de nivel del río, comparando los registros observados con los valores simulados. En todos

los casos anteriores, el modelo actual, con la batimetría del 2013, ha sido calibrado comparándolo con las series observadas de las campañas realizadas por el IHM en el periodo mayo 2016 – octubre 2017. Vistos los cambios notables en la batimetría, es esperable que las constantes armónicas de las observaciones también hayan cambiado. El conjunto de series de datos de las campañas del IHM, por tanto, no son las mejores para usar en esta nueva calibración, y se han buscado los registros de mareógrafos con observaciones posteriores al mes de octubre de 2021.

Éstos incluyen los dos mareógrafos que Puertos del Estado lleva manteniendo desde 2010-2011, en el muelle de Bonanza y en la esclusa en Sevilla, y los dos recién incluidos de Puntal y Caseta, ubicados en las inmediaciones de la conexión con el Brazo de la Torre y unos km agua abajo del comienzo de la Corta de los Jerónimos (Figura 2.4). Estos últimos se instalaron a finales de abril de 2021 y funcionaron de forma discontinua hasta estabilizarse en la primera mitad de noviembre del mismo año.

A éstos se han añadido otros cuatro mareógrafos gestionados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, ubicados respectivamente en las estaciones de bombeo de Vetalapalma e Isla Mínima, el puente de Isla Cartuja en Sevilla y la presa de Alcalá del Río (Figura 2.4). Un quinto, ubicado en la estación de bombeo de Poblado, finalmente se ha descartado por la baja calidad de los datos registrados. Las series recogidas abarcan un periodo total de 168 días, desde el 12 de noviembre de 2021 al 29 de abril de 2022. Es un periodo algo más corto de los 180 días empleados en las calibraciones realizadas anteriormente, pero igualmente significativo a la hora de calcular el análisis armónico de las series de nivel.

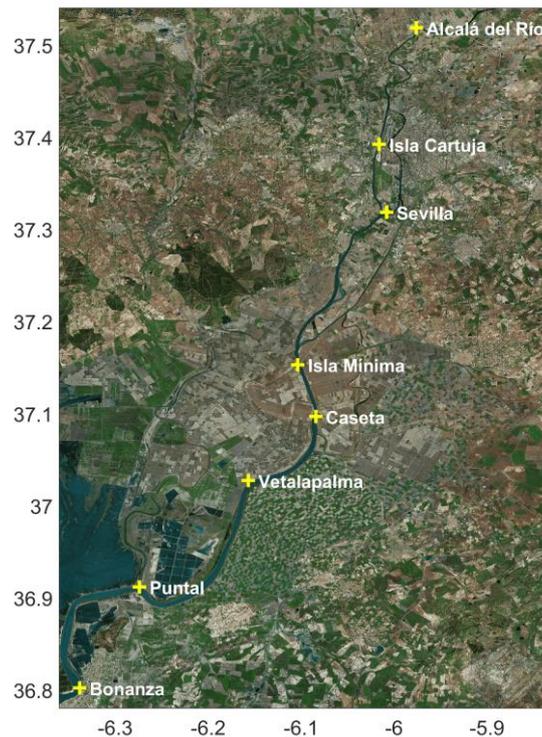


Figura 2.4 – Mapa de ubicación de los mareógrafos empleados en la validación del modelo en su configuración del 2021.

La validación del modelo con la configuración empleada hasta la fecha y la batimetría actualizada al 2021 no proporciona el mismo nivel de exactitud obtenido en los informes anteriores (Figura 2.5). Los datos simulados sobrestiman sistemáticamente las observaciones de

ambos conjuntos de datos en amplitud y las subestiman en fase. Esto ocurre especialmente para la constituyente de marea M2, que predomina sobre las demás, reflejando cierto decremento en la *performance* del modelo.

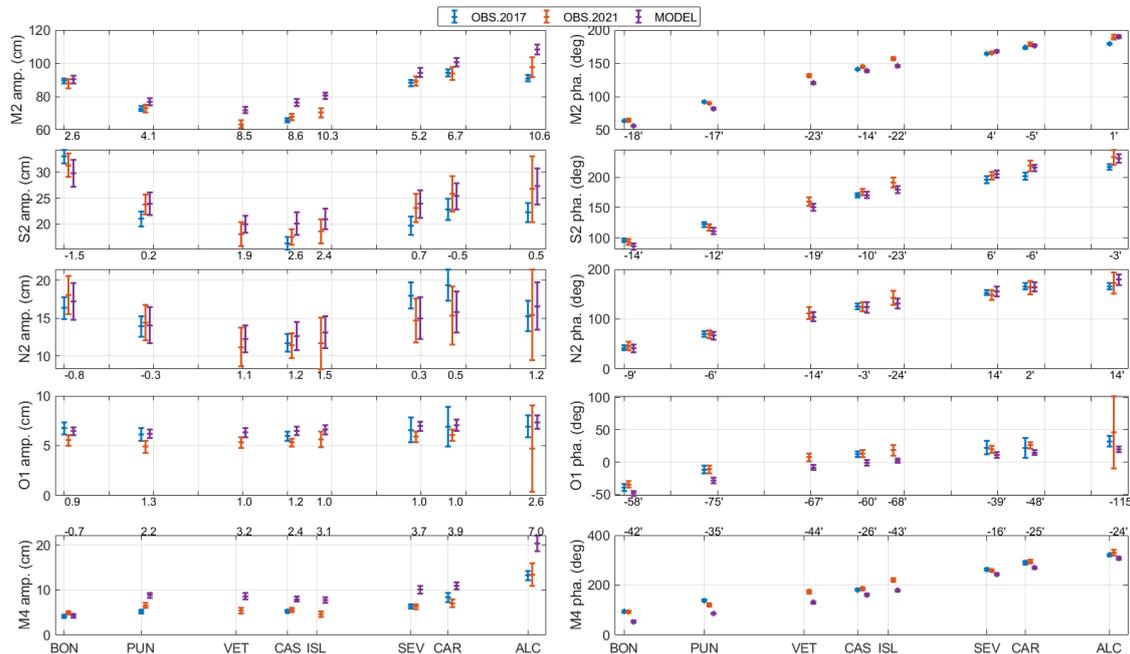


Figura 2.5 – Validación del modelo con la batimetría del 2021 y la configuración utilizada hasta la fecha. Los puntos azules representan las constantes armónicas del nivel del mar observado en las series del 2017, y los puntos naranja y morado las correspondientes a los valores observados y simulados en el periodo noviembre 2021 – abril 2022. Los números en los bordes horizontales de los paneles de la izquierda (amplitud) indican las diferencias en cm, mientras que las de los paneles de la derecha (fase), los retrasos/adelanto en minutos de hora. Las diferencias están calculadas como la resta entre los datos simulados y los observados del 2021, de tal manera que valores positivos (negativos) en la amplitud indican una sobrestimación (subestimación) del modelo, y diferencias positivas (negativas) en la fase un retraso (adelanto) del modelo. Los acrónimos en el panel de abajo indican respectivamente la posición de los mareógrafos de Bonanza (BON), Puntal (PUN), Vetalapalma (VET), Caseta (CAS), Isla Mínima (ISL), Sevilla esclusa (SEV), Isla Cartuja (CAR) y Alcalá del Río (ALC).

Los resultados confirman lo supuesto anteriormente. No solamente los datos simulados no cuadran satisfactoriamente con las observaciones, sino que las propias observaciones realizadas en periodos distantes en el tiempo presentan cierta discrepancia entre ellas. En otras palabras, es necesario recalibrar el modelo con la nueva batimetría y validarlo con observaciones más recientes, conformes con la fecha de actualización de la batimetría.

La recalibración del modelo ha consistido en realizar un elevado número de simulaciones con diferentes configuraciones de la parametrización de la fricción con el fondo y del forzamiento mareal en el contorno abierto. Ha sido un trabajo que no estaba previsto a la hora de planificar las tareas para este informe, y que ha supuesto un esfuerzo adicional en la realización del presente estudio. No obstante, es evidente que la obtención de un modelo calibrado y optimizado en base a los datos más recientes es el pilar fundamental para el resto de las tareas previstas en el proyecto, y especialmente para la implementación del módulo operacional.

El análisis exhaustivo de la batería de experimentos realizados ha llevado a obtener una calibración/validación muy satisfactoria del modelo, que se ilustra en la Figura 2.6.

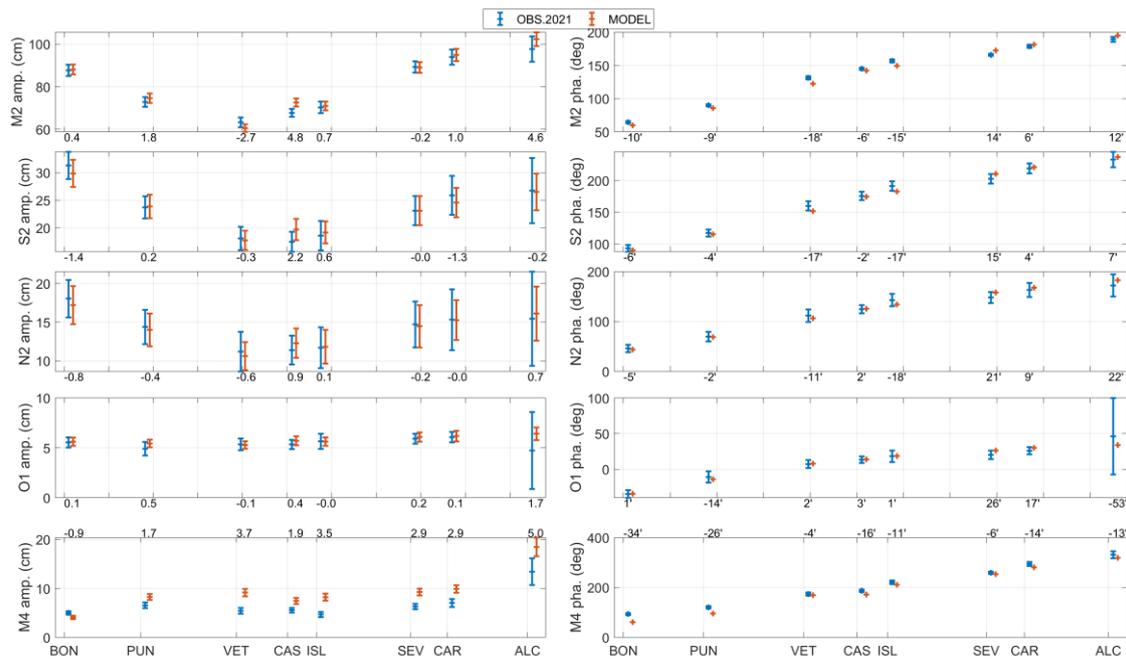


Figura 2.6 – Mismo que la Figura 2.5 para el modelo con la batimetría del 2021 y la nueva configuración recalibrada en base a las nuevas observaciones mareográficas del 2021.

El modelo reproduce correctamente la curva de la amplitud y la tendencia de la fase de todas las constituyentes, con errores promedios inferiores al cm en la amplitud y a los 15 minutos de hora en la fase. Los puntos donde el acuerdo es algo menor son Vetalapalma, cuyo mareógrafo está posicionado fuera del cauce del río y del dominio simulado por el modelo, Caseta, ubicado aguas arriba de una de las zonas de mayor irregularidad en la orientación del canal de navegación, y que presenta cierto aplanamiento de las bajamares, posiblemente debido a un fondo insuficiente para la estación, y Alcalá del Río, donde la información sobre la profundidad local es escasa y por tanto la batimetría del modelo se ha interpolado de forma poco precisa (ver Figura 2.4).

Los retrasos/adelantos en fase deben de ser interpretados en un contexto amplio junto con los datos de amplitud. **Un adelanto o un retraso de 10 o 15 minutos, como los obtenidos en Bonanza y Sevilla, dos puntos estratégicos para la Autoridad Portuaria de Sevilla por su importancia en la planificación de la navegación, corresponden a una diferencia media en el nivel de las bajamares de apenas 1.4 y 2.2 cm (2.3 y 3 cm en las pleamares), valores que se encuentran dentro del rango de incertidumbre del propio análisis armónico.** Errores de ese tamaño en la fase, no constituyen un desvío apreciable en el nivel predicho.

En resumen, el modelo recalibrado con observaciones recientes para tener en cuenta los cambios batimétricos que se han detectado en la nueva batimetría (respecto a la más antigua que venía usándose) produce resultados que se valoran como muy satisfactorios, los cuales proporcionan una elevada confianza estadística en vista al resto de tareas previstas en el proyecto.

2.3.- Comparación de las batimetrías pre- y post-dragado

Entre la primera semana de diciembre de 2021 y finales de enero de 2022 se llevaron a cabo 12 operaciones de dragado en sendas áreas del canal de navegación, para el mantenimiento del calado máximo permitido. Inmediatamente después de cada operación, se

realizaron los correspondientes levantamientos batimétricos de las zonas intervenidas. Como todas las batimetrías están referidas al mismo cero de referencia (el nivel medio del mar en Alicante - NMMA), son directamente comparables.

Contrariamente a lo esperado, no en toda la extensión de las áreas intervenidas se obtiene una profundización efectiva de la batimetría del canal. Si la batimetría en un punto es mayor (más profunda) que el calado máximo permitido, ese fondo no se interviene. Esta situación está ilustrada en los paneles superiores de la Figura 2.7. Los puntos rojos dentro de los polígonos amarillos, que delimitan el área intervenida, indican una batimetría posterior al dragado más profunda que la anterior, es decir, una profundización efectiva del canal de navegación. Los mapas muestran que esto no ocurre en toda la extensión de la zona intervenida, como, por ejemplo, en las áreas de Salinas y Olivillos (primer y segundo panel de la fila superior). Cuanto más cerca de la esclusa, más efectivos han sido los dragados y más puntos rojos visibles: por ejemplo, las zonas de Coria y Antesclusa (tercer y cuarto panel de la fila superior).

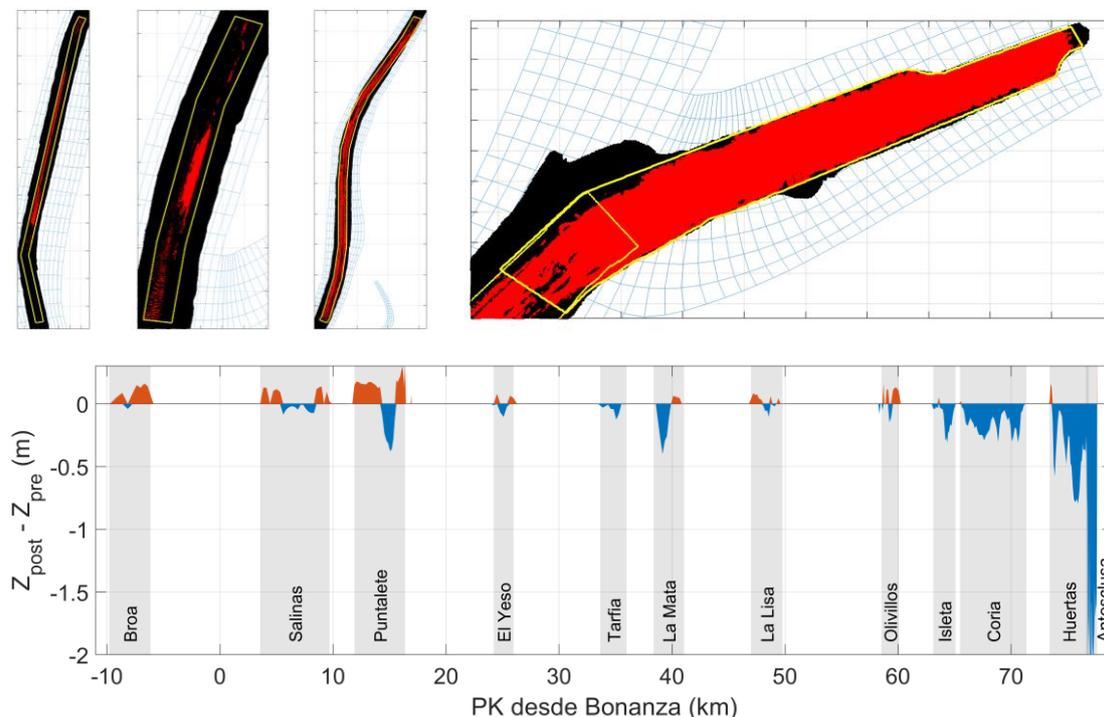


Figura 2.7 – Paneles superiores: en negro los puntos del levantamiento batimétrico del 2021 realizado en todo el canal de navegación, y en rojo los puntos correspondientes a los levantamientos realizados después del dragado de mantenimiento en las zonas afectadas por él, delimitadas por polígonos amarillos en los mapas. Los puntos rojos visibles dentro de los polígonos amarillos indican que la batimetría posterior al dragado es más profunda que la anterior al mismo. De izquierda a derecha se muestran las zonas intervenidas de Salinas, Olivillos, Coria y Antesclusa. Panel inferior: mínimos negativos y máximos positivos de las diferencias entre la batimetría interpolada post-dragado y pre-dragado, calculadas a lo largo del canal de navegación. Las diferencias negativas (en azul) indican una profundización del canal, mientras que las positivas (en naranja) indican una batimetría post-dragado más somera (ver texto para más detalles sobre la interpretación de esta magnitud).

Si, desde que se realizó el levantamiento batimétrico previo al dragado (octubre 2021) hasta la finalización del dragado (enero 2022), ha habido una acumulación de sedimentos inferior al calado máximo permitido (que, por tanto, no implica una intervención), cuando se calcula la diferencia entre la batimetría post y pre-dragado, se obtienen valores positivos (calculados sobre una batimetría con valores negativos). Es el caso de la curva del panel inferior de la Figura 2.7, que representa el perfil longitudinal de los máximos de las diferencias entre las dos batimetrías del modelo interpoladas, después y antes de los dragados. Cuando esta

diferencia es negativa, en toda la sección transversal del mallado correspondiente a ese PK hay, al menos, una celda en la cual la profundidad posterior al dragado es mayor que la anterior (es decir ha habido una efectiva profundización del canal), y la diferencia máxima (negativa) entre las dos es la indicada en el perfil. Cuando, en cambio, esta diferencia es positiva, en todas las celdas de la sección transversal la batimetría posterior al dragado es más somera que la anterior, y la diferencia máxima (positiva) entre las dos, es la indicada en el perfil. El perfil por tanto indica para cada PK la máxima profundización obtenida con el dragado, en el caso de diferencias negativas, y la máxima acumulación de sedimento, en el caso de diferencias positivas.

Sea o no necesaria una efectiva profundización del canal de navegación, las diferencias entre las dos batimetrías interpoladas no superan los 50 cm, en valor absoluto, excepto en la zona de Antesclusa, donde el dragado ha removido sedimento por espesores máximos de hasta 2 m y un volumen total estimado poco inferior a los 100.000 m³ ⁽¹⁾.

2.4.- Resultados de las simulaciones numéricas

Con el objetivo de evaluar los efectos de los dragados de mantenimiento sobre la dinámica fluvial, se han ejecutado dos simulaciones numéricas con las batimetrías analizadas en la sección anterior. El periodo simulado corresponde al intervalo empleado para el ejercicio de calibración/validación del modelo presentado anteriormente (noviembre 2021 – abril 2022), con un periodo previo de 1 mes para el alcance de la estabilidad numérica del modelo (spin-up). Además de con las constantes armónicas para definir el forzamiento astronómico usual en el contorno abierto de la desembocadura, el modelo se ha alimentado con el residuo meteorológico en el mismo contorno, y los caudales en Alcalá del Río y otras estaciones de descarga a lo largo del estuario (ver informes GOFIMA 2020a, 2020b, 2020c y 2020d en Referencias). Para el análisis de los datos simulados, se ha definido un total de 600 puntos de control distribuidos a lo largo del canal de navegación y 40 secciones transversales desde la desembocadura hasta la esclusa (Figura 2.8), en los cuales se ha extraído información sobre el nivel, la corriente longitudinal al canal, la salinidad y los flujos de volumen y sal.

¹ Este valor se calcula como el producto entre la superficie de las celdas del mallado del modelo y la diferencia entre las profundidades interpoladas en cada una de ellas. La profundidad en cada celda corresponde al promedio de los puntos del levantamiento batimétrico que caen en ella, y por tanto este cálculo de los volúmenes removidos puede ser ligeramente subestimado o sobrestimado según la simetría de la distribución estadística de los puntos usados para calcular dicho promedio.

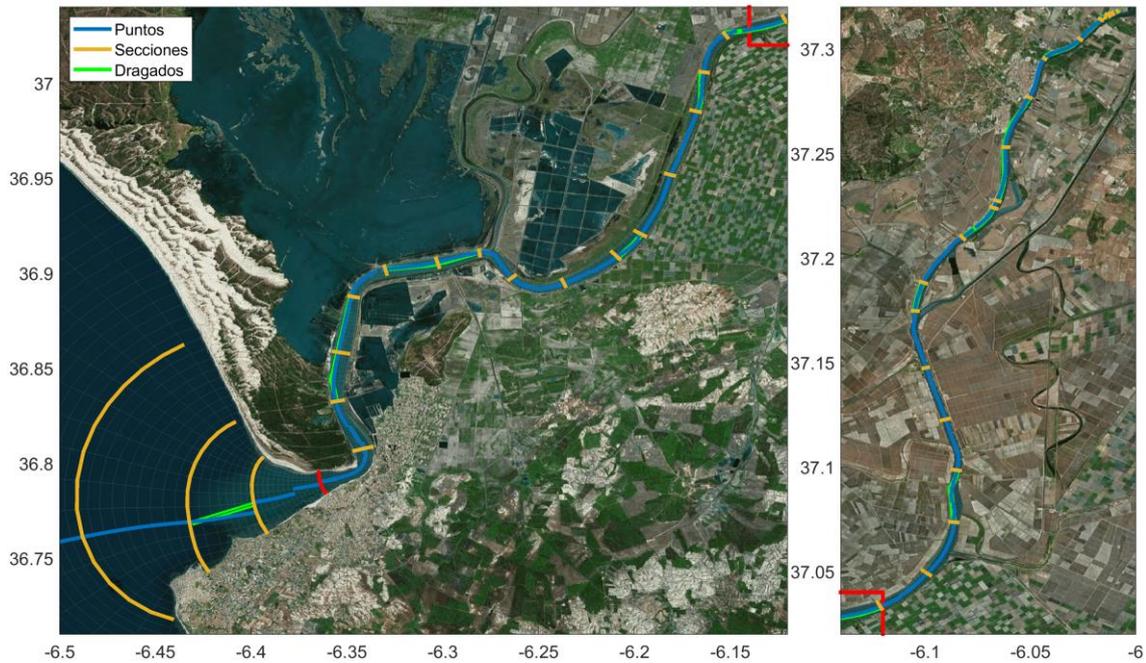


Figura 2.8 – Mapa de ubicación de los puntos y secciones de control para la comparación de las simulaciones pre- y post-dragado. Para claridad de la imagen, el estuario se ha dividido en dos porciones y la superposición de cada una de ellas se indica en la otra con una línea gruesa roja. La cuarta sección transversal desde la desembocadura (marcada en rojo en el mapa izquierdo) es la empleada para el cálculo del prisma mareal (ver sección 2.4.4.- Prisma mareal).

Para cada una de estas variables se han calculado perfiles longitudinales de valores promedios y constantes armónicas de la constituyente M2 por ser la predominante en el estuario. Con ellos se han computado las diferencias entre la simulación post- y pre-dragado. A continuación, se detallan los resultados para cada variable analizada.

2.4.1.- Nivel

El perfil promedio de la altura de la superficie libre reproduce correctamente el desnivel esperado de un estado estacionario del estuario (panel superior en la Figura 2.9). Los ~25 cm de desnivel entre Bonanza (PK0) y Sevilla (PK78) cuadran satisfactoriamente con los ~30 cm obtenidos en las observaciones de los dos mareógrafos correspondientes. Se debe tener en cuenta que el periodo simulado en este caso es inferior al analizado en las observaciones (ver informes anteriores).

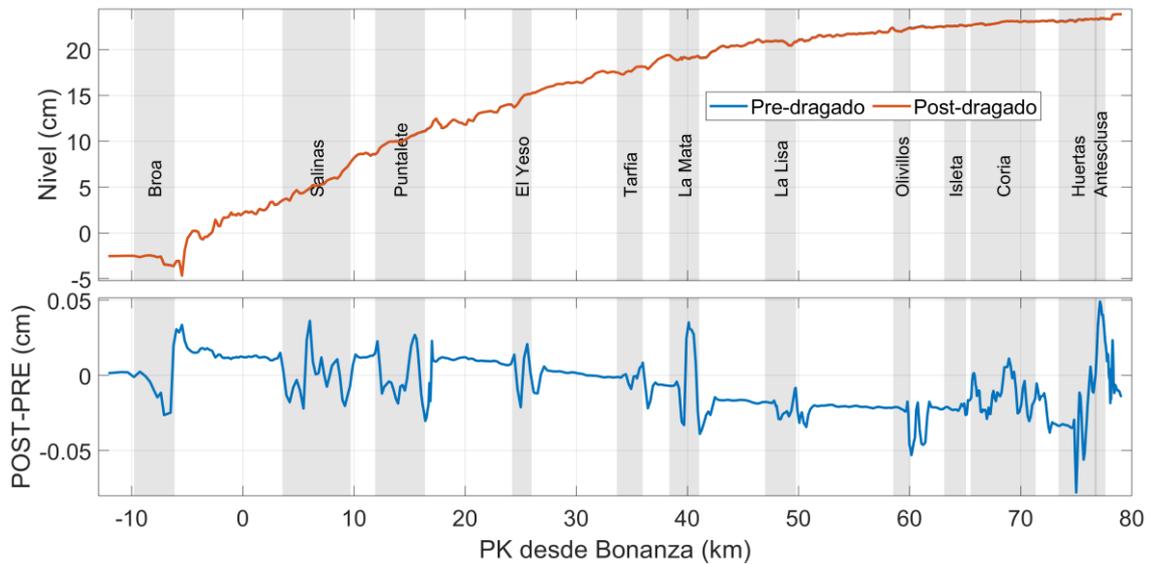


Figura 2.9 – Panel superior: perfiles longitudinales del valor promedio de nivel (cm) obtenidos en las dos simulaciones pre- y post- dragado. El buen acuerdo entre ambos hace que la línea roja (post-dragado) oculte a la azul (pre-dragado). Por ello, en el panel inferior se muestra la diferencia entre ambas (post-dragado menos pre-dragado). En ambos paneles las barras grises indican la posición y extensión longitudinal de los dragados.

Los dos perfiles de nivel son indistinguibles, hecho corroborado por el perfil de diferencias (panel inferior) cuyo rango no supera el medio milímetro. **Aunque carezca de sentido cualquier tipo de análisis de estas diferencias, sí es interesante comprobar que éstas tienen una tendencia decreciente (nivel medio algo menor en el post-dragado, en buen acuerdo intuitivo con el hecho de un estuario algo más profundo) y que presente fluctuaciones (picos) coincidiendo con la ubicación de los dragados (rectángulos grises), confirmando una correcta respuesta del modelo numérico a los cambios, si bien imperceptibles, derivados de estas intervenciones en el lecho fluvial.**

La Figura 2.10 presenta las comparaciones de las constantes armónicas de M2 para el nivel. Los dos pares de perfiles de amplitud y fase de nuevo son indistinguibles y ambos presentan el comportamiento típico de la dinámica semidiurna del estuario. La ratio entre las amplitudes (POST/PRE) no llega a superar el 2 ‰ (aproximadamente 1.4 mm) de subestimación de la simulación post-dragado respecto a la pre-dragado, con una curva similar a la de la amplitud y una máxima discrepancia (negativa) en correspondencia al mínimo de amplitud. La fase presenta diferencias inferiores a la décima de grado, con un comportamiento algo similar al del propio perfil (excepto por los últimos 20 km). En ambos casos las diferencias están muy por debajo de la incertidumbre del análisis armónico. Independientemente de esto, sigue siendo interesante comprobar cómo estas diferencias fluctúan en las zonas donde se han realizado los dragados y presentan oscilaciones conformes con las cantidades de sedimento removidas (comparar con la Figura 2.7).

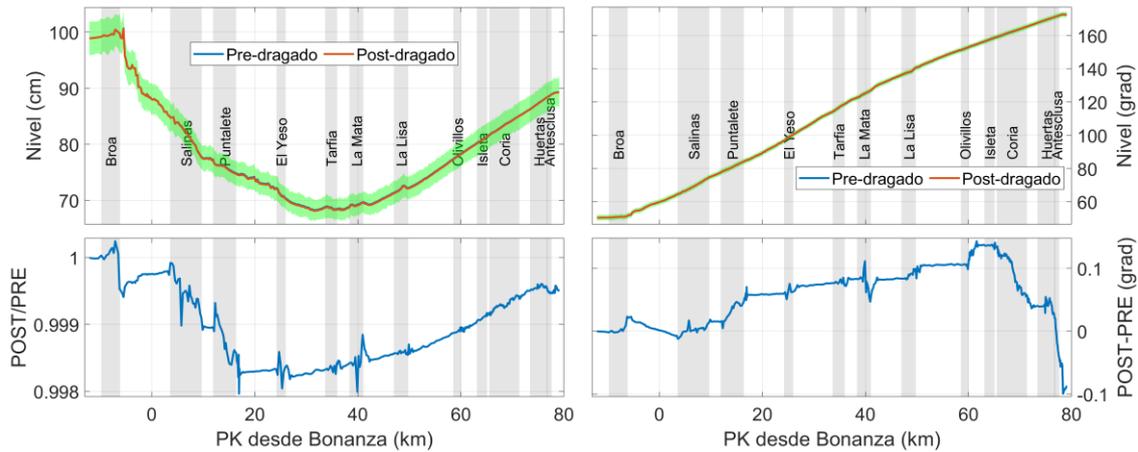


Figura 2.10 – Fila superior: perfiles de la constante armónica M2 del nivel: amplitud en el panel de la izquierda y fase en el de la derecha. Las franjas verdes indican las incertidumbres correspondientes del análisis armónico. Fila inferior: ratio de amplitudes (izquierda) y diferencia de fases (derecha).

2.4.2.- Salinidad

El perfil promedio de salinidad (Figura 2.11) refleja una disminución paulatina desde la desembocadura hasta la esclusa, con un punto de inflexión ubicado entre Salinas y Puntalete (PK10, aproximadamente). La diferencia muestra un máximo sostenido de aproximadamente 2 centésimas de g/kg entre el PK15 y el PK50 (cambios porcentuales entre 0.1 y 0.4 %), y una disminución progresiva aguas arriba hasta valores por debajo de 1 centésima de g/kg (cambio porcentual de ~2 %) en los últimos 10 PK. Este último porcentaje tiene ese valor relativamente alto porque la salinidad media que figura en el denominador al calcular el porcentaje es de 0.5 g/kg o menos en esa región, lo que hace que el cociente suba. Sin embargo, el incremento de salinidad (0.01 g/kg) que indica la Figura 2.11 en esa zona, es irrelevante y su importancia para la comunidad de regantes es ampliamente descartable.

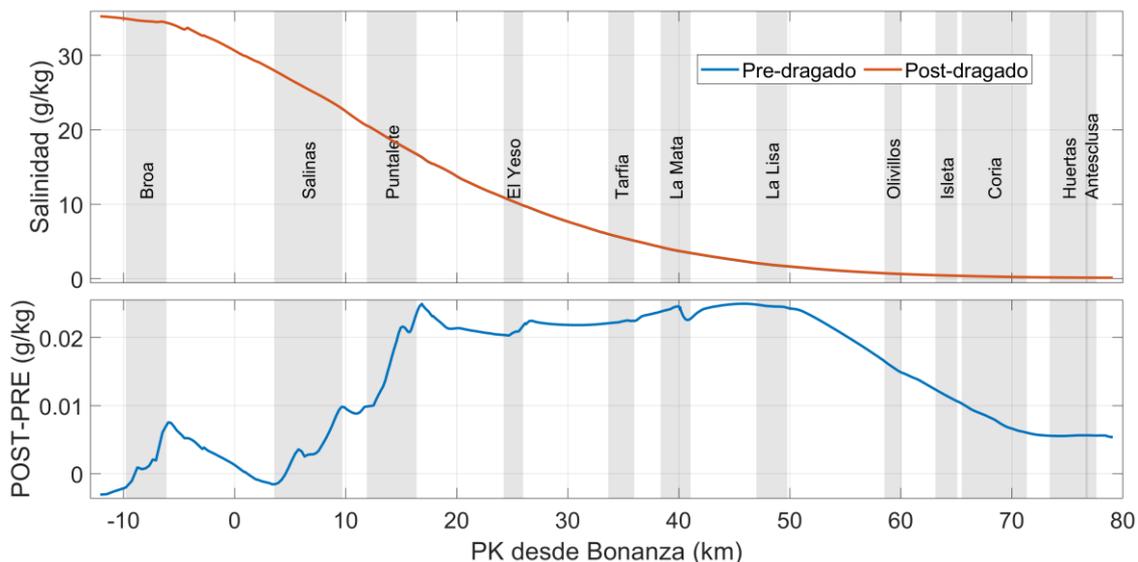


Figura 2.11 – Como en la Figura 2.9 para la salinidad superficial.

La curva de amplitud de M2 para la salinidad (Figura 2.12) revela un máximo en torno a la zona de inflexión mencionada antes (zona de máximo gradiente horizontal salino), y una disminución paulatina de ahí en adelante hasta la esclusa. **Es interesante comprobar cómo la**

incertidumbre del análisis armónico es máxima en correspondencia del pico de amplitud, identificando claramente una amplia franja donde las oscilaciones de salinidad son máximas y este máximo es relativamente poco estable, moviéndose aguas arriba y abajo, sujeto a la variabilidad de los forzamientos submareales. La fase presenta un perfil monótono creciente excepto en la plataforma y en la esclusa, la primera por una dinámica completamente ajena a la del río, y la segunda por cambiar de orientación respecto al eje longitudinal del estuario. Notar que, en ambas zonas, la amplitud de las oscilaciones semidiurnas es prácticamente nula. De hecho, la incertidumbre de la fase en los últimos PK es relativamente alta, reflejando unas oscilaciones de muy baja intensidad y poco “armónicas”.

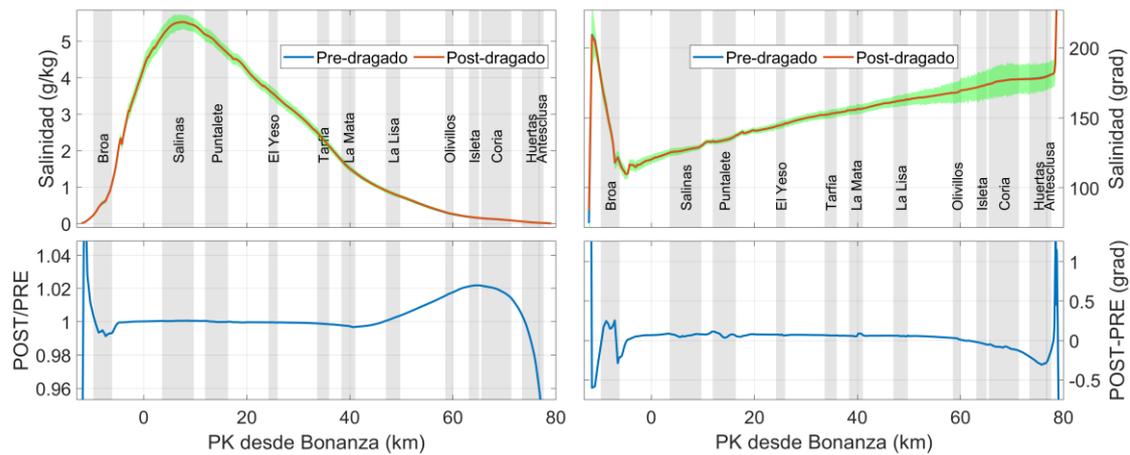


Figura 2.12 – Como en la Figura 2.10 para la salinidad superficial.

Las discrepancias tanto en amplitud como en fase son una vez más insignificantes. Descartando las dos zonas de plataforma y Antesclusa mencionadas, la ratio de amplitud se mantiene en 1 de forma continuada hasta aproximadamente el PK40. De ahí en adelante las oscilaciones de la simulación post-dragado aumentan ligeramente, para luego disminuir en la zona de Huertas (~PK73), sin sobrepasar en ambos casos un intervalo de ratio de 0.95 – 1.03. La fase no presenta discrepancias apreciables.

2.4.3.- Corriente longitudinal

La corriente es una variable particularmente sensible a los cambios de batimetría. Por limitaciones debidas a la resolución del mallado del modelo, los 600 puntos escogidos para representar el perfil longitudinal del estuario no siempre caen exactamente en la zona más profunda del canal de navegación (ver también Figura 2.8), y, en algunos casos pueden darse variaciones de unos metros entre celdas contiguas. En tanto que otras variables como el nivel no están afectadas por estas discrepancias, la corriente sí puede variar bastante de una celda a otra debido a los saltos en la batimetría. La Figura 2.13 muestra los perfiles promedios de la corriente longitudinal (líneas azul y naranja, indistinguibles como en los casos anteriores), junto con la batimetría de los puntos que componen el perfil (línea fina verde). Debido a esas repentinas variaciones, el perfil de velocidad longitudinal muestra sendos saltos, coincidentes con la ubicación de esas variaciones. Esos saltos son obviamente irreales, y solo dependen de las discrepancias entre celdas contiguas que no siempre recorren exactamente el centro del canal de navegación. Un perfil más realista podría ser aquel dibujado por la línea gruesa gris, que representa una versión de la línea naranja suavizada mediante un filtro paso-bajo. Este perfil muestra una velocidad longitudinal negativa (dirigida hacia la desembocadura) con un aumento progresivo del gradiente horizontal aguas abajo, similar al del perfil promedio del nivel (Figura

2.9). Asumiendo un caudal promedio constante, determinado por el aporte de agua dulce desde la presa de Alcalá del Río, el perfil de corriente debe reflejar el del nivel, salvo el progresivo cambio en la razón entre los gradientes de los dos perfiles, debido al ensanchamiento del río hacia la desembocadura.

Independientemente de las discontinuidades del perfil de velocidad longitudinal, lo que interesa para el objetivo de este análisis es la diferencia entre los perfiles pre- y post- dragado que, una vez más, es anecdótica. Ésta oscila alrededor del cero, con picos irregulares inferiores a ± 2.5 mm/s de amplitud, localizados principalmente en La Mata y Huertas, que presentan algunas de las profundizaciones más significativas (ver Figura 2.7).

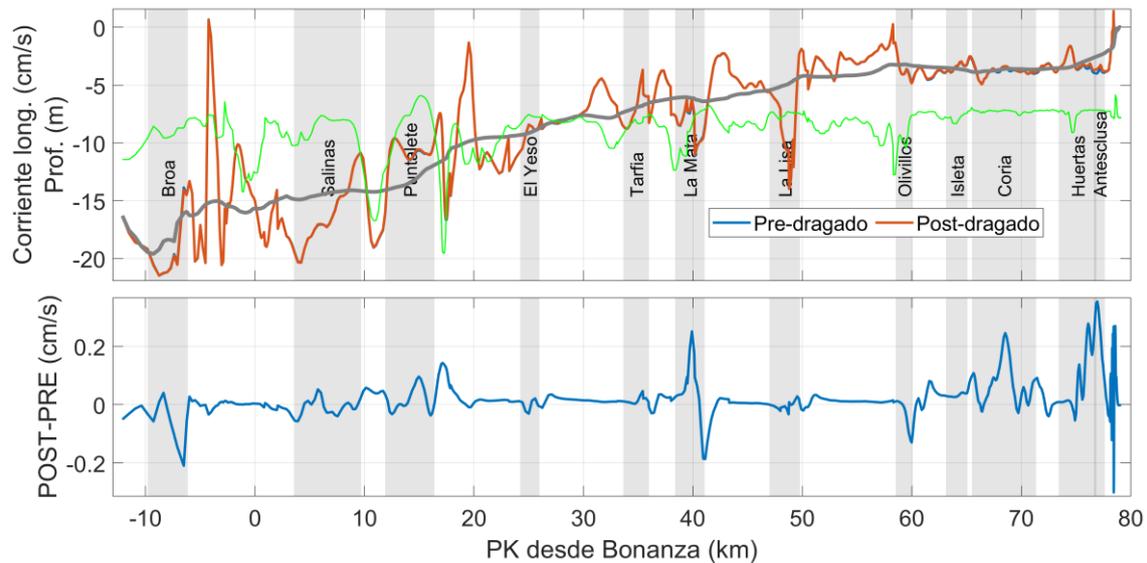


Figura 2.13 – Como en la Figura 2.9 para la corriente longitudinal. En el panel de arriba también se muestra una versión suavizada de la curva tras su filtrado paso-bajo (línea gruesa gris), y la batimetría de los puntos empleados para definir el perfil (línea fina verde). La escala numérica en el eje de ordenadas del panel superior sirve tanto para velocidad (cm/s, líneas roja, azul – apenas visible pues está oculta tras la roja – y gris) como para batimetría (m, línea verde).

La amplitud de las oscilaciones semidiurnas de la velocidad longitudinal (Figura 2.14) muestra un máximo en torno al PK 10-20 (el perfil de amplitud de la M2 también está afectado por la irregularidad en la batimetría de los puntos, aunque en este caso no interesa suavizar la curva), coincidente con el máximo de amplitud de la salinidad (Figura 2.12). **Esta última, de hecho, está fuertemente correlacionada con la corriente longitudinal, que es su vector principal de advección. Si multiplicáramos la curva de amplitud de corriente (Figura 2.14) por la del promedio de la salinidad (Figura 2.11) obtendríamos un proxy del perfil de amplitud de M2 de la salinidad (Figura 2.12), resultado de esa combinación de dinámica y gradiente salino del estuario.** La fase también presenta el mismo comportamiento que la salinidad, con el mismo desfase de aproximadamente 90 grados entre desembocadura y esclusa, y una cuadratura con la salinidad retrasada de 90 grados respecto a la corriente.

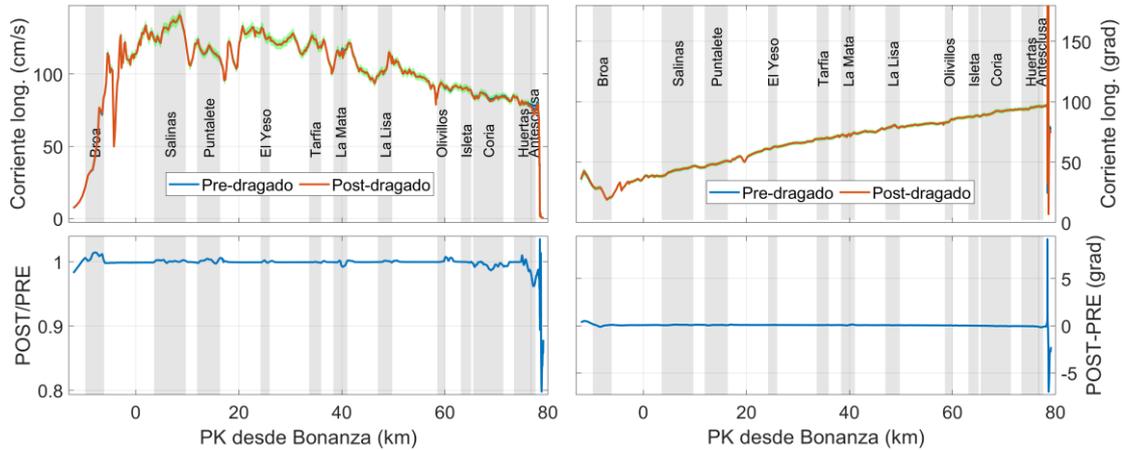


Figura 2.14 – Como en la Figura 2.10 para la velocidad longitudinal.

Las diferencias entre la simulación pre-y post-dragado son en ambos casos insignificantes.

2.4.4.- Prisma mareal

El prisma mareal es una magnitud útil en dinámica costera de estuarios y bahías. No tiene una definición unívoca, aunque la más aceptada es la de *volumen de agua que sale del estuario durante la marea vaciante* (Xiao et al., 2017). Su valor P , en cada semiciclo mareal, se puede calcular de la siguiente forma:

$$P = \int_{t_H}^{t_L} A(t) \cdot v(t)$$

Donde $A(t)$ es el área de la sección transversal del río en la desembocadura, $v(t)$ es la velocidad longitudinal media en esta sección y los límites de integración t_H y t_L representan los instantes de tiempo en el cual se alcanza la pleamar y la bajamar, respectivamente, en esa sección. Cuando el cálculo se aplica a las salidas de un modelo numérico, el caudal instantáneo $Q(t) = A(t) \cdot v(t)$ se define como el sumatorio de los productos de todas las velocidades longitudinales y todas las celdas transversales que componen la sección (ver sección 1.3 del Informe 2).

La Figura 2.15 muestra un ejemplo de cálculo del prisma mareal en un fragmento temporal de las series de caudal y nivel extraídas en la sección de la desembocadura identificada en rojo en la Figura 2.8, ubicada en el PK0, a la altura de Bonanza.

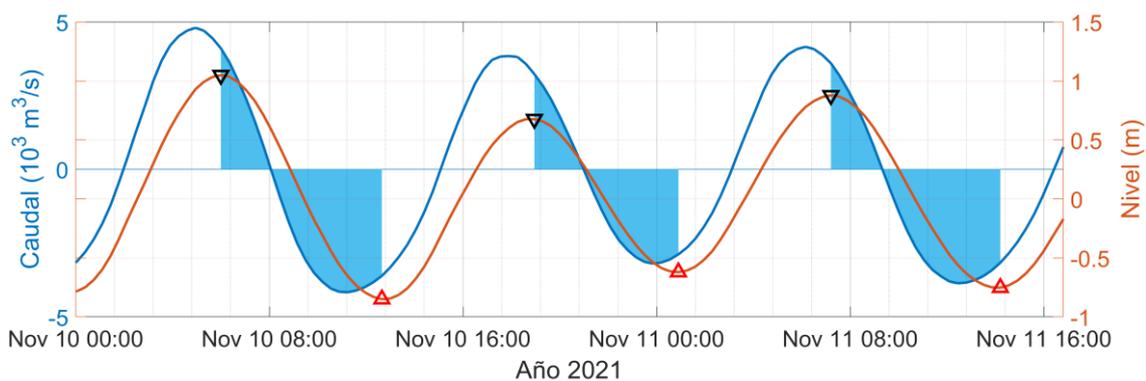


Figura 2.15 – Caudal (en azul) y nivel (en naranja) extraídos en la sección en la desembocadura identificada en rojo en la Figura 2.8. Los triángulos negros y rojos identifican las pleamares y bajamares, respectivamente. Las áreas en

celeste ilustran el cálculo de las integrales del caudal entre pleamares y bajamares, con las cuales se determinan los valores del prisma mareal.

El caudal está ligeramente adelantado respecto al nivel. Su análisis armónico (no mostrado) devuelve una fase en torno a los 30 grados, cuando el nivel en Bonanza presenta un valor de 60 grados (Figura 2.10). Este desfase de 30 grados corresponde aproximadamente a un adelanto de 1 hora de la constante semidiurna. Esto se traduce en un caudal positivo (hacia la cabecera) durante la primera parte de la vaciante, aunque finalmente el cómputo neto es negativo, correspondiente a un flujo dirigido hacia la desembocadura (en la Figura 2.15 se puede comprobar cómo el tamaño de las áreas debajo del cero es sistemáticamente mayor que las que se encuentran por encima).

La Figura 2.16 (panel superior) muestra las series temporales del prisma mareal (cambiado de signo por facilidad de lectura de la gráfica), calculado en la sección mencionada anteriormente, para todos los semiciclos de marea vaciante identificados en el periodo simulado. La serie muestra una clara modulación quincenal (ver serie de nivel en el panel inferior de la Figura 2.16), con valores máximos (mínimos) en marea viva (muerta). Una vez más, las dos líneas son indistinguibles: el valor promedio de la diferencia (panel central) se sitúa en torno a $-9 \times 10^4 \text{ m}^3$, lo que significa que la cantidad de agua que entra/sale del estuario tras el dragado es inferior a la que lo hacía antes del dragado, en buena correspondencia con el comportamiento mareal del nivel mostrado en la Figura 2.10, donde se ve que la amplitud de M2 post-dragado es inferior a la pre-dragado. En cualquier caso, la diferencia de prismas mareales es de menos del 0.3 % del valor medio del prisma mareal ($\sim 3 \times 10^7 \text{ m}^3$), y es irrelevante, al igual que lo son las diferencias de amplitudes de M2 en la Figura 2.10.

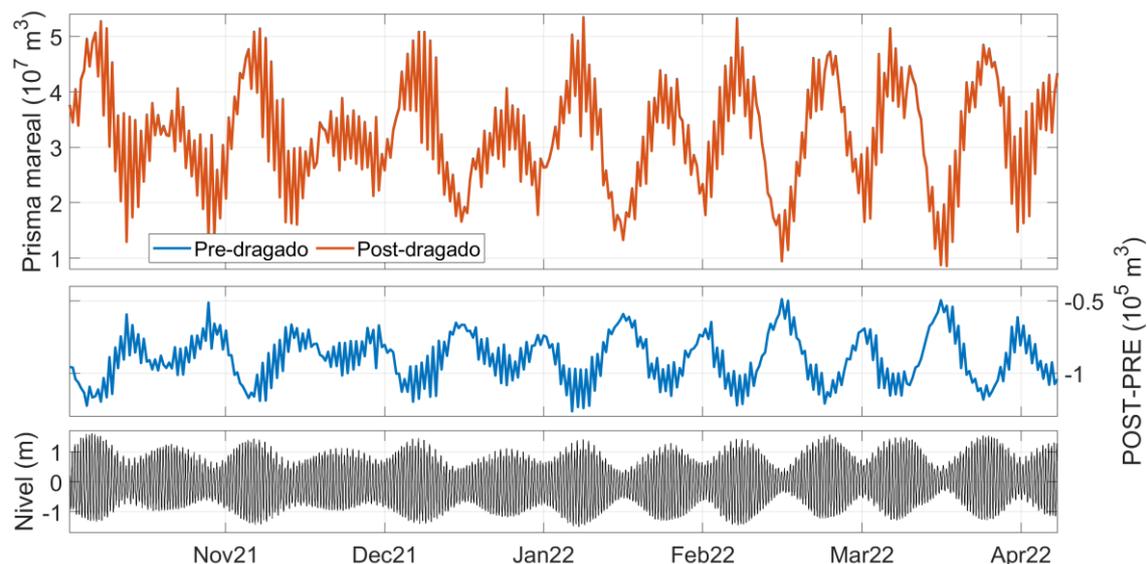


Figura 2.16 – Panel superior: series temporales del prisma mareal (cambiado de signo) calculadas como el caudal acumulado durante los semiciclos de marea vaciante identificados en el periodo simulado. En azul la serie calculada para la simulación pre-dragado y en rojo la post-dragado. Panel central: diferencias entre la serie obtenida para la simulación post-dragado y pre-dragado. Panel inferior: nivel del río en el centro de la sección donde se ha calculado el prisma mareal. La sección está ubicada en la desembocadura, a la altura del Bonanza (PK0), identificada en rojo en la Figura 2.8.

La serie temporal de la diferencia también está fuertemente modulada por el ciclo marea viva-muerta mostrando discrepancias máximas (mínimas) en mareas vivas (muertas).

2.5.- Conclusiones

Para el análisis del efecto de las operaciones de dragado sobre la dinámica del estuario, ha sido necesaria una serie de pasos previos, que no estaban previstos en la fase de planificación de esta tarea. Las diferencias entre la batimetría que se llevaba usando hasta la fecha, que se remonta al 2013, y la más reciente, de octubre 2021, han resultado ser mayores de lo esperado, lo que repercute sobre la dinámica del modelo que ha tenido que ser recalibrado. La nueva validación del modelo ha requerido buscar observaciones posteriores a la fecha de la nueva batimetría pues las anteriores con las que se venía validando hasta la fecha no son representativas de la nueva configuración del estuario. Se ha visto que las constantes armónicas deducidas de las observaciones de los años 2016-2017, con las que se ha estado validando el modelo, no son las mismas que se deducen de las observaciones más recientes. Las consecuencias de todo esto ha sido una necesaria (a la vez que imprevista) recalibración del modelo, configurado con la nueva batimetría del 2021, y una nueva validación del mismo, basada en esas nuevas series de observaciones más recientes llevadas a cabo con nuevos mareógrafos.

Tras haber alcanzado de nuevo una configuración satisfactoria, que devuelve discrepancias en el nivel inferiores a los 2 cm, se ha podido proceder al análisis propiamente dicho del efecto del dragado. Primeramente, se ha analizado la diferencia entre la batimetría anterior y posterior al dragado, descubriendo que no en todas las regiones afectadas por los dragados (12 en total) hay una efectiva profundización del canal de navegación. Se han lanzado simulaciones paralelas con las dos batimetrías interpoladas antes y después de los dragados, y se han analizado las siguientes variables: nivel, salinidad, velocidad longitudinal y el prisma mareal. En todas las series temporales analizadas se observan diferencias insignificantes entre las dos simulaciones, inferiores al 1 % (bastante inferiores en muchos casos) para cada variable considerada. **Aunque las series temporales y los perfiles longitudinales de estas diferencias confirman el correcto funcionamiento del modelo numérico y su capacidad de identificar cambios mínimos en la dinámica fluvial, está del todo justificado afirmar que los dragados no tienen ningún efecto apreciable ni en el nivel ni en la distribución de la salinidad a lo largo del estuario.**

3. Validación del modelo hidrodinámico con los datos recogidos en verano del 2021 por TECNOAMBIENTE

Durante los meses de julio y agosto de 2021, la empresa TECNOAMBIENTE desplegó una serie de perfiladores de corriente y sensores de temperatura/salinidad en tres puntos estratégicos del estuario con la finalidad de monitorear la parte baja, media y alta del río, aguas abajo de la Esclusa del Puerto de Sevilla. Para conocer los detalles de los instrumentos empleados se puede consultar al Anexo 1 del Informe 2 del proyecto actual. La Figura 3.1 muestra la ubicación de las estaciones. Se observa que el perfilador de corriente (ADCP) y el sensor de temperatura y salinidad (CTD) han sido desplegados en la misma posición en las estaciones de Salinas (estación 3) y Lebrija (estación 2), mientras que en Queipo (estación 1) ambos están separados unos 13 km.

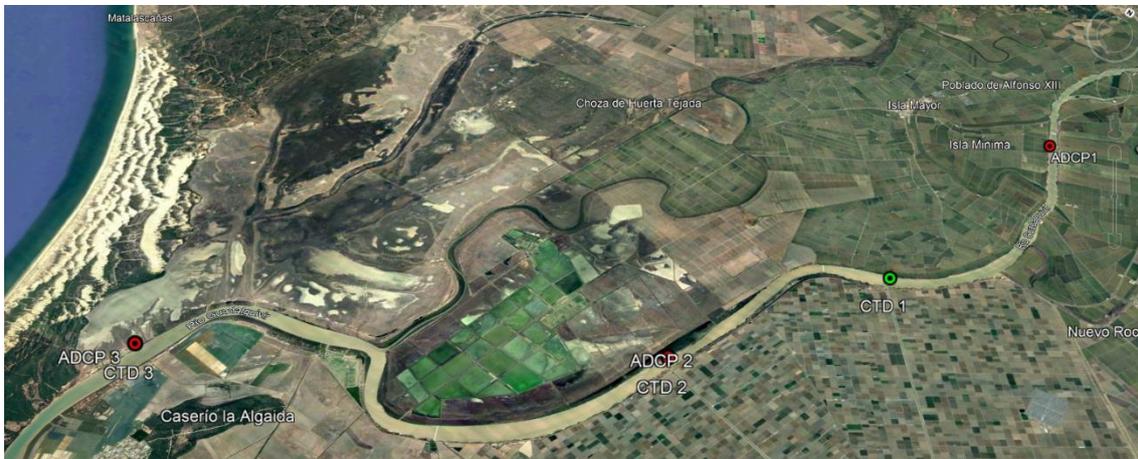


Figura 3.1 – Mapa de ubicación de las estaciones desplegadas por TECNOAMBIENTE entre julio y agosto 2021.

A este respecto, es oportuno indicar que el etiquetado de las estaciones de medidas era incorrecto, y los perfiles de corriente ilustrados en la Figura 3.1 del mencionado anexo, que son ubicados en la zona de Salinas, en realidad se deben referir a la estación de Lebrija. A la hora de redactar dicho anexo, solo se realizó una lectura rápida de los datos y un chequeo de los registros válidos, y no se realizaron otros análisis, que sí se han llevado a cabo para este informe, y que han evidenciado el error.

También conviene mencionar que todas las series temporales registradas están referidas a la hora local. Esta elección es algo inusual en el tratamiento de datos científicos, ya que puede conducir a incongruencias en el análisis armónico de series largas. En esta ocasión ha sido suficiente aplicar una única corrección de dos horas, diferencia entre el horario de verano local y la hora GMT.

A continuación, se detallan los resultados de la validación del modelo numérico, ordenado por zonas investigadas, desde la desembocadura (Salinas) hasta la zona de los campos de arroz (Queipo). Las variables validadas son nivel, corriente y salinidad. Al no aplicarse un forzamiento baroclino de las propiedades termohalinas en el contorno abierto, la validación de la temperatura carece de sentido y no se aplica. La salinidad tampoco se fuerza con valores realísticos en la desembocadura y su distribución en el estuario está afectada por la falta de definición de un esquema de uso de agua que simule el aplicado por la comunidad de regantes.

Sin embargo, considerando el gran interés de los agentes sociales y económicos en la salinidad, sí se incluye su tratamiento en el proceso de validación, con la particularidad de concentrar la interpretación de los resultados en la capacidad del modelo de reconstruir la variabilidad mareal y el gradiente longitudinal más que los valores absolutos de esta magnitud. El modelo validado es el que se ha descrito en el Capítulo 2.1.- Actualización de la batimetría del modelo: octubre 2021 de este informe, con la batimetría actualizada al año 2021 y completamente recalibrado y validado con las observaciones más recientes.

3.1.- Estación de Salinas

La estación de Salinas está ubicada a una distancia de aproximadamente 13 km de la desembocadura, en correspondencia del máximo de amplitud de la corriente y cerca del pico de variabilidad de la salinidad (ver Capítulo 2).

El sensor de presión del ADCP puede proporcionar un buen proxy del registro de variación del nivel del mar, si se transforma la presión en profundidad mediante la aplicación de la ecuación hidrostática. En este caso no se puede aplicar una referencia absoluta de nivel cero, como se suele hacer con un mareógrafo (GOFIMA, 2017), y por tanto se han de comparar las dos series observadas (registro de presión) y nivel del mar modelado, restándole a cada una su media. La Figura 3.2 muestra el acuerdo muy satisfactorio entre las dos series.

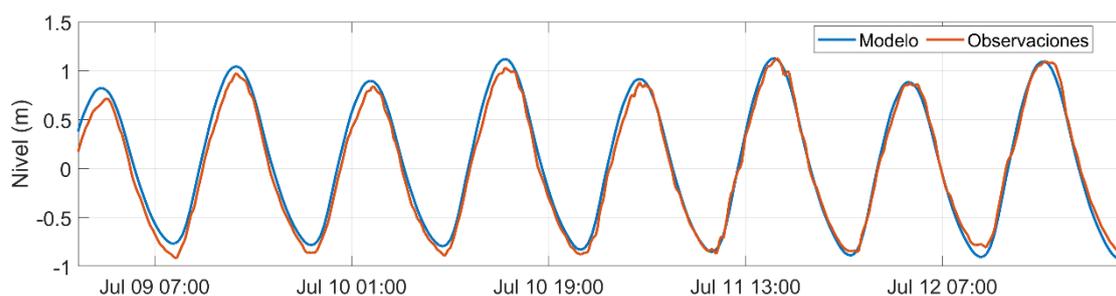


Figura 3.2 – Fragmento del registro de presión del ADCP en Salinas y nivel del mar modelado en la celda del mallado más cercana. A ambas series se le ha restado su promedio correspondiente.

Las constantes armónicas para las constituyentes M2 y K1 (Tabla 3.1) confirman este acuerdo visual, con discrepancias de menos de 0.5 cm en amplitud y 5 grados (aproximadamente 10 minutos) en la fase para la M2, y menos de 2 cm y aproximadamente 10 grados (~40 minutos) para la K1. Este último valor debe ponderarse con la ratio de amplitud K1/M2, que ronda el 8 %, y que hace que su importancia relativa sobre el desfase del nivel total sea despreciable.

Tabla 3.1 – Constantes armónicas calculadas para el registro de presión observado y el nivel modelado, en Salinas.

	M2		K1	
	Amplitud (cm)	Fase (grados)	Amplitud (cm)	Fase (grados)
Modelo	79.2±1.7	72.7±1.2	7.5±0.4	90.7±2.9
Observaciones	78.8±2.0	77.3±1.3	6.8±1.1	102.7±8.5

La Figura 3.3 muestra un fragmento de las series temporales modelada y observada para perfiles de corriente longitudinal al eje del río. Se puede apreciar el buen acuerdo en la periodicidad de la corriente y cierto gradiente negativo vertical (la amplitud disminuye con la profundidad). Sin embargo, los máximos y mínimos de corriente modelada presentan tonalidades de color más acentuadas, señales de una mayor amplitud de las series simuladas.

Los registros de corriente observados presentan cierto nivel de ruido, seguramente debido al corto periodo empleado para promediar los perfiles (ping) individuales, fijado en 60 segundos. Las limitaciones de consumo de baterías (debido al muestre simultáneo de corriente y oleaje) han obligado a elegir una configuración relativamente poco precisa en términos de la incertidumbre de las medidas de corriente. También se aprecia una escasa cobertura de la columna de agua. Los perfiles se han cortado a una profundidad fija de aproximadamente medio metro del nivel medio. Esto ha implicado la pérdida de información sobre todo en el rango de variabilidad mareal de los dos o tres metros más someros del perfil. Esto, sumado al *blanking* del instrumento, que elimina el último metro más profundo del perfil, reduce la longitud del registro observado a aproximadamente 4.5 m, contra los más de 7 m del modelo. Esta situación se repite en el resto de estaciones.

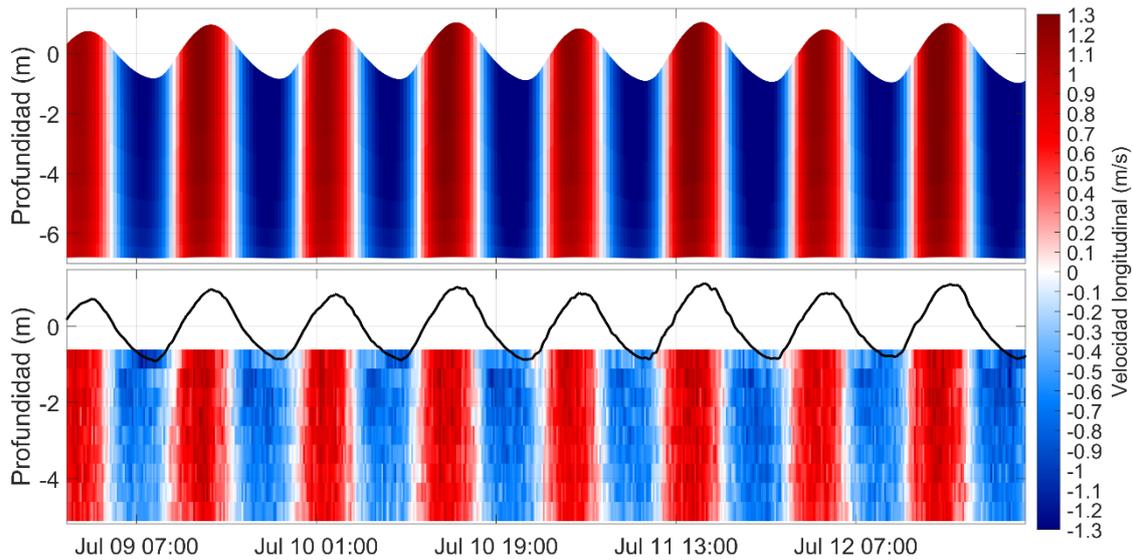


Figura 3.3 – Diagrama de Homvöller de un fragmento de la serie temporal de la corriente longitudinal al eje del río, modelada (arriba) y observada (abajo) para la estación de Salinas.

El análisis armónico vectorial (componente M2) de los perfiles de corriente simulados y observados, confirma la sobrestimación de la amplitud de las variaciones semidiurnas por parte del modelo. Es una sobrestimación importante, que no afecta la excelente validación del nivel, pero que deberá ser tratada con atención por su influencia sobre los trazadores advectados por la corriente (salinidad). El resto de constantes armónicas reflejan el muy buen acuerdo entre modelo y observaciones en términos de orientación geográfica de la corriente (inclinación) y fase de la periodicidad semidiurna. El desfase se mantiene por debajo de los 5 grados (aproximadamente 10 minutos). Es interesante notar la nula amplitud del semieje menor (para ambas series), indicio de una corriente extremadamente polarizada.

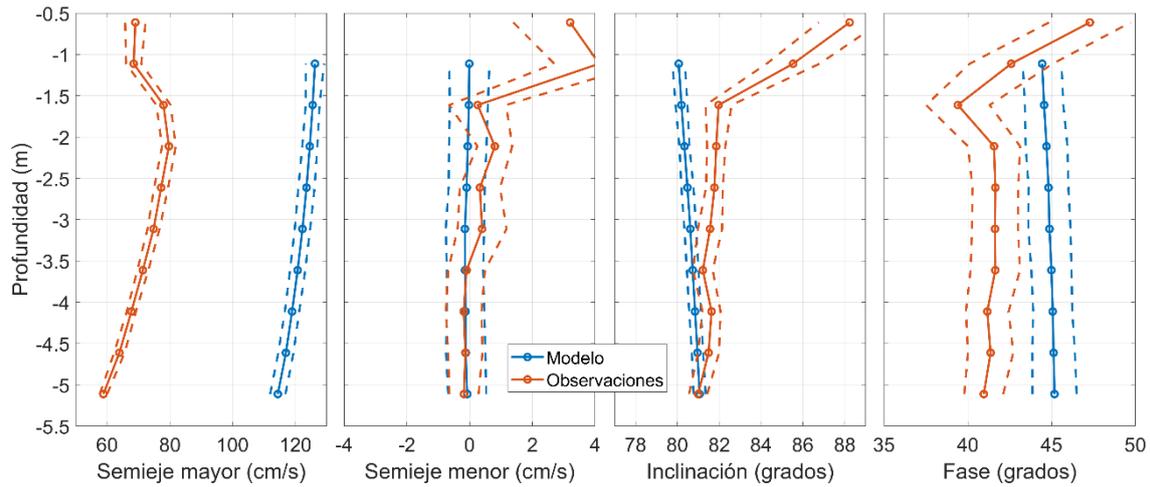


Figura 3.4 – Constantes de la constituyente M2 del análisis armónico realizado sobre las magnitudes vectoriales de velocidad horizontal simulada (en azul) y observada (naranja). Para este análisis, los perfiles modelados se han interpolado previamente a las profundidades fijas del ADCP. La falta de datos en la capa más somera refleja la pérdida periódica de los datos interpolados, que no permite el cálculo de las constantes armónicas. Estación de Salinas.

La serie de salinidad medida por el CTD presenta un registro poco usual (Figura 3.5). Las variaciones periódicas de los primeros 6 días coinciden satisfactoriamente con las del modelo. Durante ese periodo la simulación reproduce muy correctamente las fluctuaciones semidiurnas, aunque sobrestima las amplitudes de estas oscilaciones de aproximadamente 1 g/kg y subestima su valor promedio alrededor de 1.3 g/kg. Sin embargo, a partir del 7 de julio el registro de salinidad observada presenta una tendencia negativa muy pronunciada y una evidente irregularidad en las variaciones mareales. La serie de caudales registrada en Alcalá del Río, cuyos picos pueden ser los únicos responsables de estas bruscas disminuciones en la salinidad (las demás descargas de agua dulce que se incluyen en el modelo – ver Informe 2 – son muy inferiores a la de la presa), no presenta eventos dignos de mención. Los dos incrementos más sustanciales se observan en torno al 22 de julio y 21 de agosto, pero solo se limitan a un aumento del caudal de unas pocas decenas de m^3/s . Estos aumentos, más allá de no coincidir temporalmente con las bajadas repentinas de la salinidad observada, no pueden justificar tales caídas a tanta distancia de la presa.

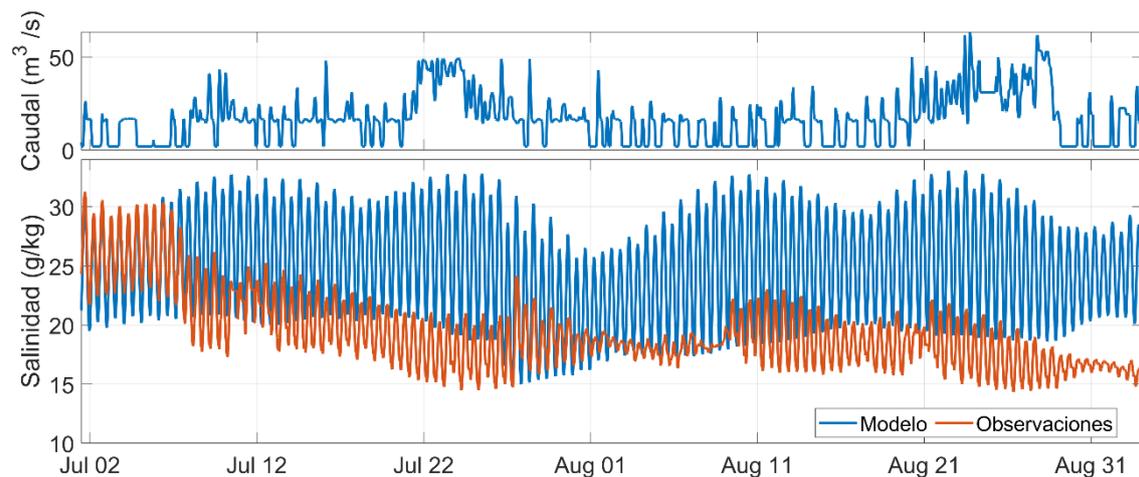


Figura 3.5 – Panel superior: serie de caudales en m^3/s de la presa de Alcalá del Río. Panel inferior: serie de salinidad modelada (extraída en la celda más cercana y a la profundidad de ubicación del sensor) en azul y observada en naranja. Estación de Salinas.

La serie de temperatura (se puede consultar en el Anexo 1 del Informe 2) presenta cierta coherencia con los registros de salinidad, pero no explica del todo el comportamiento de esta última. **Descartando (aunque no del todo) un posible mal funcionamiento del sensor, se plantea la duda de que tales variaciones del registro de salinidad solo se puedan explicar por la acción de otras fuentes de agua dulce que no se están teniendo en cuenta en el modelo.** Se hace patente la necesidad de explorar estos aspectos en colaboración con la comunidad de arrozeros y la propia Autoridad Portuaria de Sevilla.

3.2.- Estación de Lebrija

La estación de Lebrija a la altura de la finca de Veta La Palma, presenta una validación muy satisfactoria del nivel (Figura 3.6).

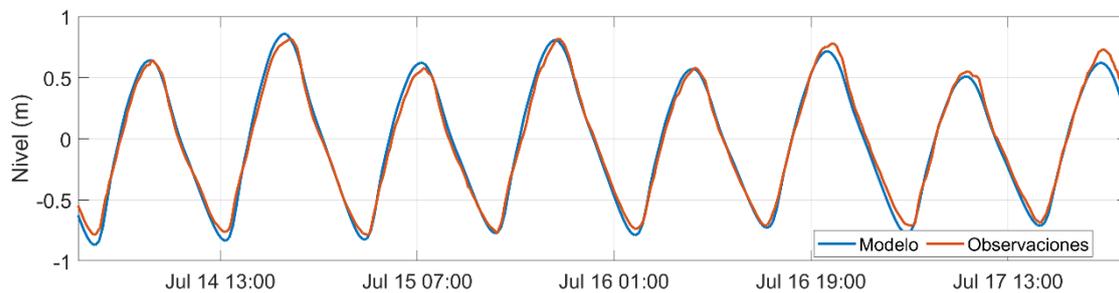


Figura 3.6 – Como en la Figura 3.2 para la estación de Lebrija.

Las constantes armónicas (Tabla 3.2) reflejan una discrepancia en amplitud de poco más de 3 cm y menos de 1 cm, para la componente M2 y la K1, respectivamente. El desfase es de apenas 2 grados (4 minutos) para la M2 y de poco más de 6 grados (12 minutos) para la K1.

Tabla 3.2 – Como en la Tabla 3.1 para la estación de Lebrija.

	M2		K1	
	Amplitud (cm)	Fase (grados)	Amplitud (cm)	Fase (grados)
Modelo	67.4±1.4	111.7±1.1	7.5±0.4	116.9±3.4
Observaciones	64.2±1.4	113.6±1.3	7.7±0.5	123.4±3.0

Los perfiles de velocidad longitudinal (Figura 3.7) presentan una concordancia mayor que la estación de Salinas, con valores de amplitud de las oscilaciones observadas menos sobrestimadas por el modelo que en el caso anterior.

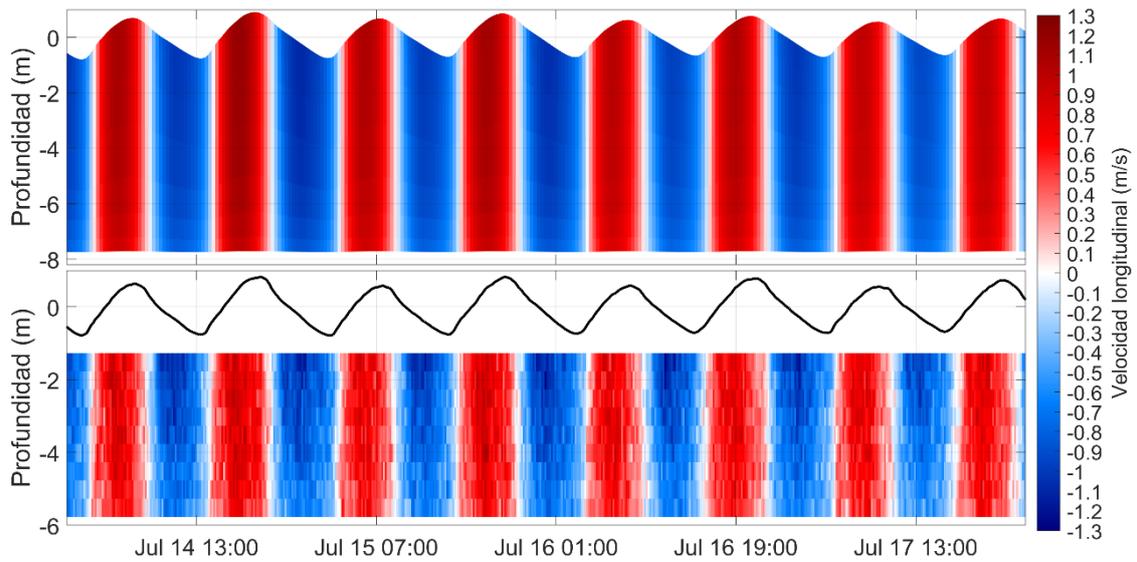


Figura 3.7 – Como en Figura 3.3 para la estación de Lebrija.

El análisis armónico confirma lo anterior, con perfiles del semieje mayor más similares. La sobrestimación del modelo en este caso varía alrededor de 20 cm/s. La inclinación y la fase presentan una concordancia excelente.

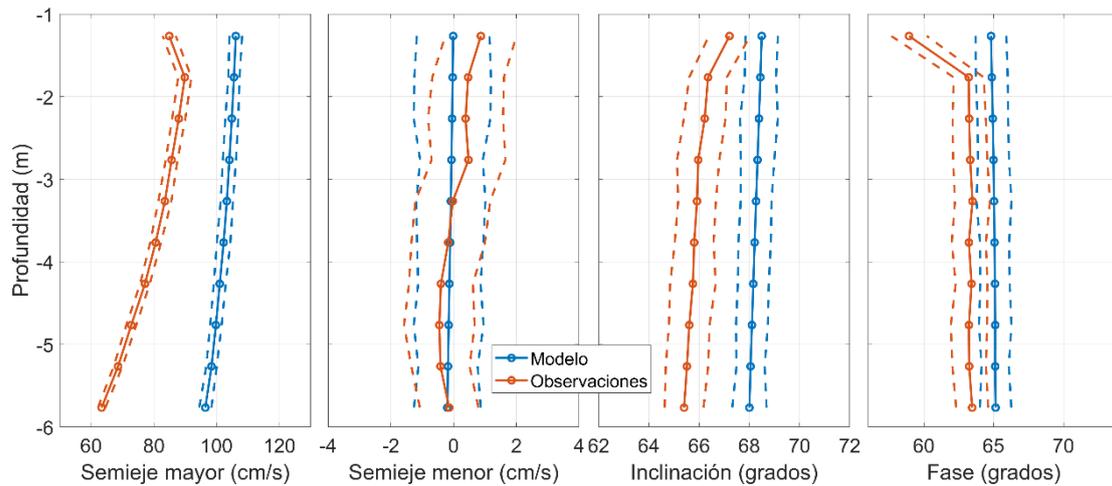


Figura 3.8 – Como en Figura 3.4 para la estación de Lebrija.

El registro del CTD de la estación de Lebrija se interrumpió antes de tiempo, proporcionando una serie de solo 20 días (Figura 3.9). **A pesar de su corta longitud, la serie es muy regular y no presenta ninguna variación brusca similar al registro del sensor de Salinas, lo cual refuerza la hipótesis de un malfuncionamiento del sensor de aquella estación.**

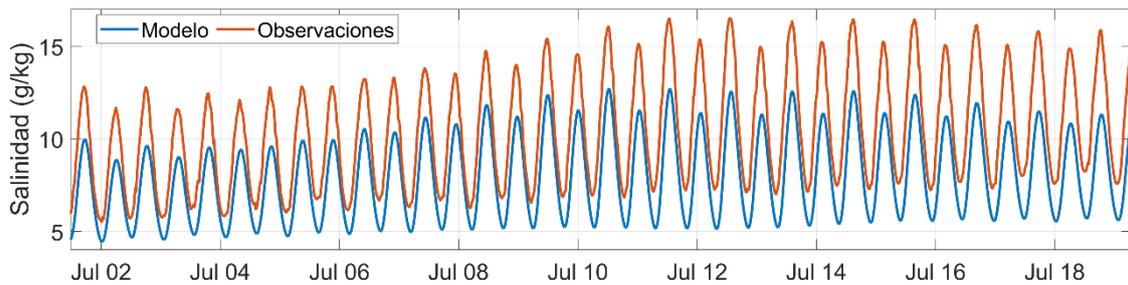


Figura 3.9 – Como en Figura 3.5 para la estación de Lebrija. En este caso se omite la gráfica de la serie de caudal en Alcalá del Río.

El análisis armónico de las dos series de salinidad (Tabla 3.3) muestra una subestimación de la amplitud de las oscilaciones semidiurnas de 0.8 g/kg, aproximadamente el 10% del valor promedio, y diurnas de solo 0.2 g/kg. El desfase es algo mayor, con retrasos de algo menos de media hora para la M2 y un cuarto de hora para la K1.

Tabla 3.3 – Como en Tabla 3.1 para la salinidad en la estación de Lebrija.

	M2		K1	
	Amplitud (cm)	Fase (grados)	Amplitud (cm)	Fase (grados)
Modelo	2.9±0.2	150.7±4.0	0.3±0.0	125.3±3.9
Observaciones	3.7±0.3	136.4±5.1	0.5±0.1	121.0±7.3

En términos de valores promedios, el modelo subestima las observaciones con una salinidad media de 8.10 g/kg contra los 10.4 g/kg de la serie medida.

3.3.- Estación de Queipo

En la estación de Queipo, ubicada en plena zona de cultivos de arroz, el ADCP sufrió algún tipo de accidente y quedó inhabilitado durante casi la mitad de la serie (ver detalles en el Anexo 1 del Informe 2). Desde el 28 de julio hasta el 23 de agosto retomó un funcionamiento normal, para volver a pararse poco antes del final de la serie. A pesar de la distancia entre ADCP y CTD, este último también presenta un registro completamente inutilizable, y la salinidad no puede ser incluida en la validación en esta estación. La comparación se limita por tanto a ese fragmento de algo menos de un mes y solo afecta al nivel y la corriente.

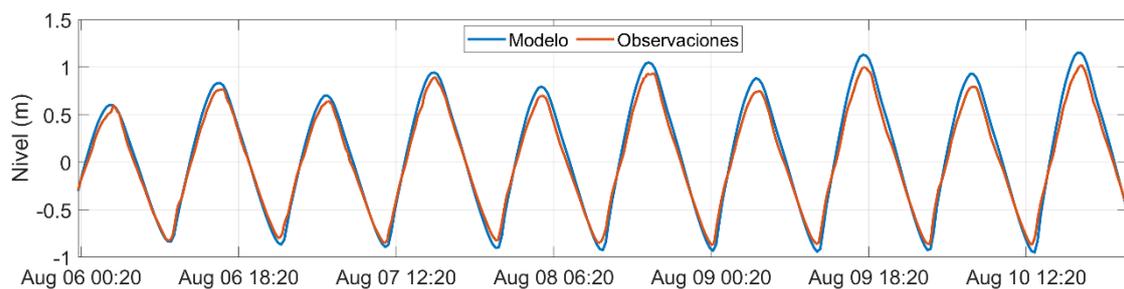


Figura 3.10 – Como en la Figura 3.2 para la estación de Queipo.

La validación del nivel es de nuevo muy satisfactoria (Figura 3.10). **La sobrestimación del modelo de más de 6 cm en la amplitud de la M2 (Tabla 3.4) se debe interpretar considerando que la corta longitud de la serie no permite separar adecuadamente las constituyentes semidiurnas, hecho confirmado por las incertidumbres del análisis armónico más altas que los casos anteriores.** Por eso, a pesar de los excelentes resultados

de la validación, la fase no se tiene en cuenta. La diferencia en amplitud para la K1 es de menos de medio centímetro.

Tabla 3.4 – Como en Tabla 3.1 para la estación de Queipo.

	M2		K1	
	Amplitud (cm)	Fase (grados)	Amplitud (cm)	Fase (grados)
Modelo	74.7±5.4	149.2±4.7	7.8±0.9	138.1±5.6
Observaciones	68.5±7.1	149.2±5.6	8.2±1.0	149.9±6.5

La comparación para la corriente también presenta resultados incluso mejores que las anteriores estaciones (Figura 3.11).

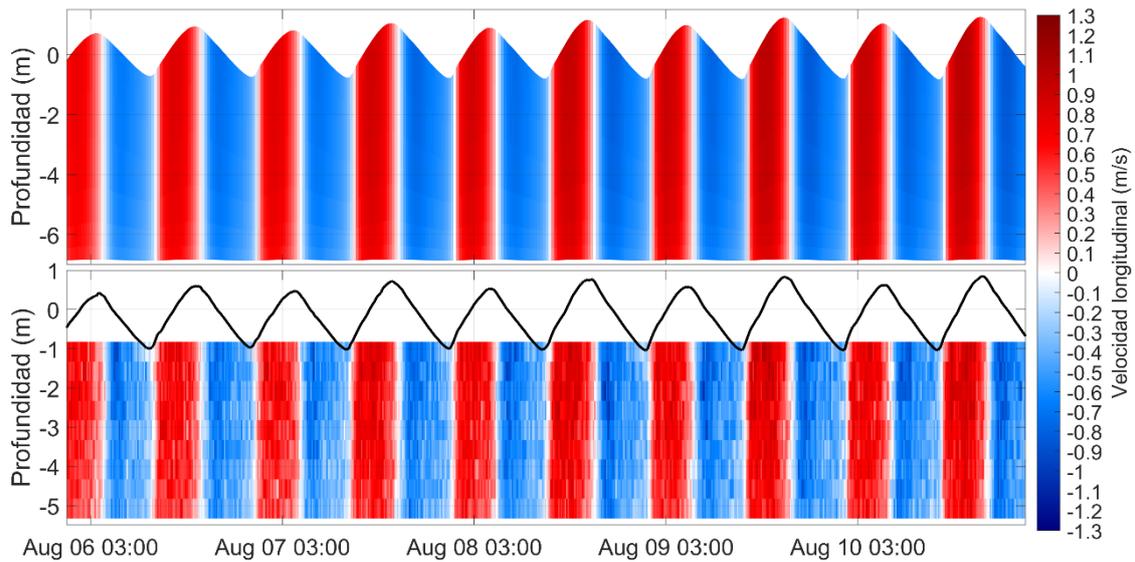


Figura 3.11 – Como en la Figura 3.3 para la estación de Queipo.

La marcada sobrestimación de la amplitud que se observa en Salinas y Lebrija no se da en esta ocasión (Figura 3.12), y las discrepancias del semieje mayor están en torno a los 10 cm/s, aumentando ligeramente en el fondo. La inclinación y la fase presentan comparaciones muy satisfactorias.

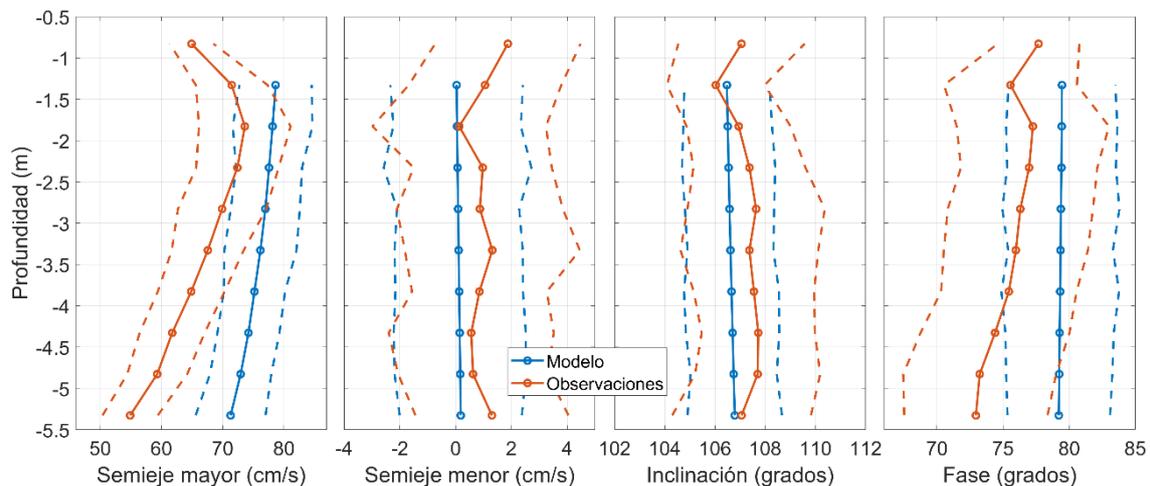


Figura 3.12 – Como en la Figura 3.4 para la estación de Queipo.

3.4.- Conclusiones

La validación del modelo en su configuración actualizada (batimetría del 2021 y calibración realizada sobre los registros de los mareógrafos más recientes – ver Capítulo 2.1.- Actualización de la batimetría del modelo: octubre 2021) es en general muy satisfactoria. El nivel presenta diferencias del orden del cm o menos y desfases prácticamente despreciables. La corriente presenta cierta sobrestimación de la amplitud de las oscilaciones semidiurnas, que es máxima en la desembocadura y va disminuyendo aguas arriba.

Esta sobrestimación no afecta al nivel, pero puede empeorar la validación de la salinidad, y debe ser tratada adecuadamente. **La tarea de calibración de la corriente puede resultar larga y tediosa y no es viable realizarla sin antes haber establecido un esquema de uso del agua de riego que simule lo más fielmente posible las estrategias empleadas por el sector arrocerero.** A la espera de poder aplicar tal esquema más elaborado que el empleado hasta la fecha (ver Informe 2) la validación de la salinidad es relativamente satisfactoria, con diferencias del 4% y 10% en la amplitud de las oscilaciones y del 4% y 20% en los valores promedios, en Salinas y Lebrija respectivamente.

Si bien las series analizadas presentan una buena calidad (excepto la sospechosa variabilidad y tendencia en la serie de salinidad de Salinas y las interrupciones de la corriente y salinidad de Queipo) su corta longitud no permite completar un proceso de calibración/validación como el llevado a cabo con el nivel durante la actualización del modelo (ver Capítulo 2.1.- Actualización de la batimetría del modelo: octubre 2021), y se hace patente la necesidad de registros largos, continuos y de alta fiabilidad estadística para poder afinar el modelo de manera más robusta.

4. Implantación de llanuras mareales en el estuario.

En este capítulo se completa y amplía el estudio mostrado en el informe anterior sobre la influencia en el estuario del Guadalquivir de implantar llanuras mareales. Para ello se han realizado experimentos con diferentes configuraciones y ubicaciones de llanuras mareales y se ha analizado su efecto en el prisma mareal, la posición de la cuña salina y la dinámica de las corrientes en base a una simulación de referencia con idénticos forzamientos externos y con la batimetría y calibración más recientes. Como valor añadido a este informe, indicar que se ha llevado a cabo un primer estudio (Anexo 1) sobre usos del suelo, restricciones jurídicas de parques naturales y proyectos actuales relacionados con la recuperación de marismas en el Guadalquivir, que podría servir como preámbulo a la aplicación a un caso realista de implantación de llanuras.

4.1.- Presentación de los escenarios estudiados.

Tras varias pruebas preliminares, se han seleccionado cuatro ubicaciones en diferentes tramos del río (Figura 4.1), dos extensiones de llanura con áreas una el doble que la otra, y dos conexiones de la llanura con el estuario, estrecha y ancha según se consideren una o dos celdas del mallado del cauce principal. La Tabla 4.1 recoge sus características: tamaño del mallado computacional, área de la llanura, longitud máxima de ésta tierra adentro, longitud de la boca, definida como la distancia paralela al cauce del estuario que conecta la llanura y el estuario, y ubicación, especificada como la distancia a Bonanza. Las discrepancias entre las diferentes ubicaciones son debidas a que la resolución del mallado varía para ajustarse a la morfología del cauce en cada zona.

La batimetría de la llanura se ha configurado con cuatro valores constantes de -1, -0.5, 0 y +0.5 m, incluyendo la boca que la conecta con el estuario. Los bordes de la llanura se mantienen a una cota de 1.5 m, salvo en la linde con el estuario donde se establece a 2 m. En la Figura 4.2 se muestran los cuatro valores de batimetrías escogidos en este estudio para las cuatro combinaciones de extensión de llanura y tamaño de la boca para la ubicación 1. La batimetría del estuario en la zona de conexión con la llanura es siempre igual o más profunda que la de la llanura con la finalidad de que ésta no se comporte como una “piscina” en ningún momento. En otras palabras, no puede darse la situación de que la llanura mantenga atrapada agua y llegue a tener un nivel superior al del estuario en algún momento del ciclo mareal.

Se ha ejecutado un experimento de referencia sin llanura y 64 experimentos más que corresponden con 4 ubicaciones, 2 extensiones (650 y 325 ha aprox.), 2 conexiones de la llanura con el estuario (longitud 512 y 256 m aprox.) y 4 batimetrías (profundidad -1, ± 0.5 y 0 m). Por razones obvias, sólo se mostrará una selección de los resultados producidos. La Tabla 4.1 aporta información resumida sobre todas las configuraciones empleadas y facilita ayuda para su identificación en las subsiguientes secciones.

La configuración del modelo es la descrita en el Capítulo 2 de este informe. Todas las simulaciones duran 8 meses (2 de *spin-up* + 6 de simulación), tienen un paso de tiempo de 0.2 minutos y el único forzamiento es la marea astronómica en la desembocadura. Las condiciones iniciales son variables en el espacio, extraídas de la media de una simulación de 6 meses, salvo para la llanura, donde son fijas y con un valor próximo al de equilibrio en su ubicación. Las condiciones de contorno son: descargas hidrológicas constantes en Alcalá del río (25 m³/s, 19 °C y 0.01 ppt), Brazo de la Torre (0.35 m³/s, 19 °C y 0.1 ppt), Guadaira (0.75 m³/s, 19 °C y 0.01 ppt)

y Gergal ($0.8 \text{ m}^3/\text{s}$, $19 \text{ }^\circ\text{C}$ y 0.01 ppt) y salinidad y temperatura constantes (36.7 ppt , $20 \text{ }^\circ\text{C}$) en la desembocadura.

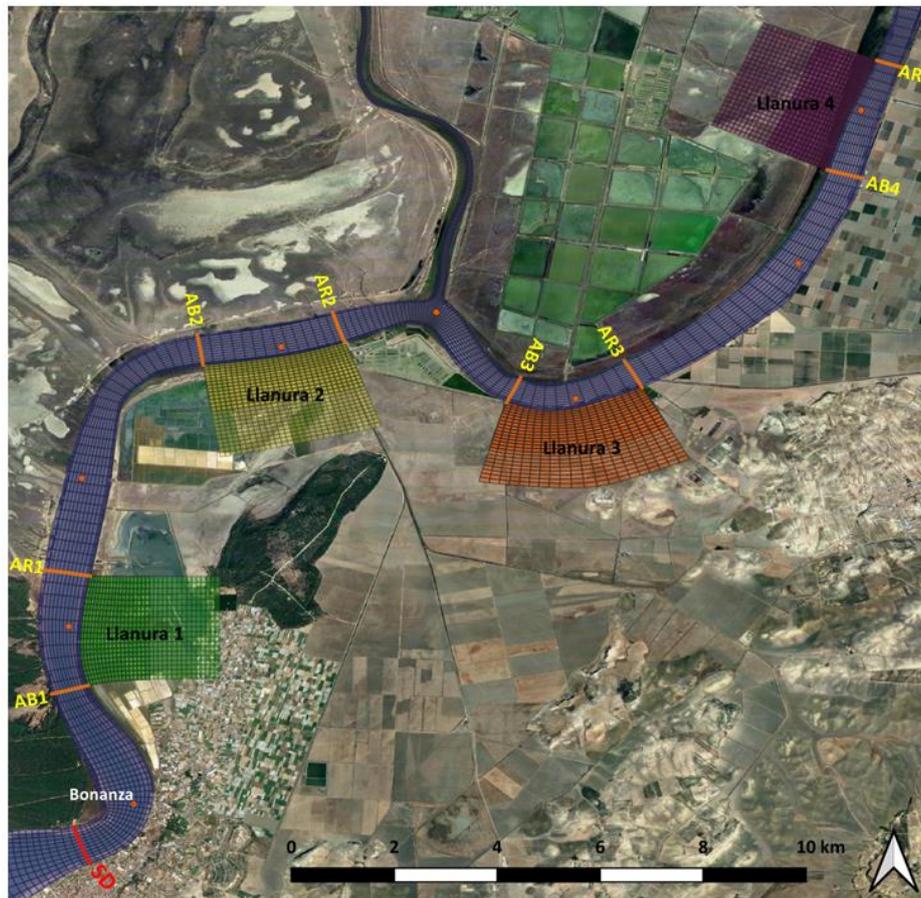


Figura 4.1 – Ubicaciones de las cuatro zonas de estudio para la implantación de llanuras mareales, de algunos de los puntos de control y de las secciones transversales usadas para el análisis de los resultados. La más aguas abajo, en las cercanías de la desembocadura y coloreada en rojo (“SD”), se emplea para estimar el prisma mareal en todo el estuario. Las marcadas en naranja (etiquetadas en amarillo) se han situado inmediatamente aguas arriba y aguas debajo de cada llanura implantada.

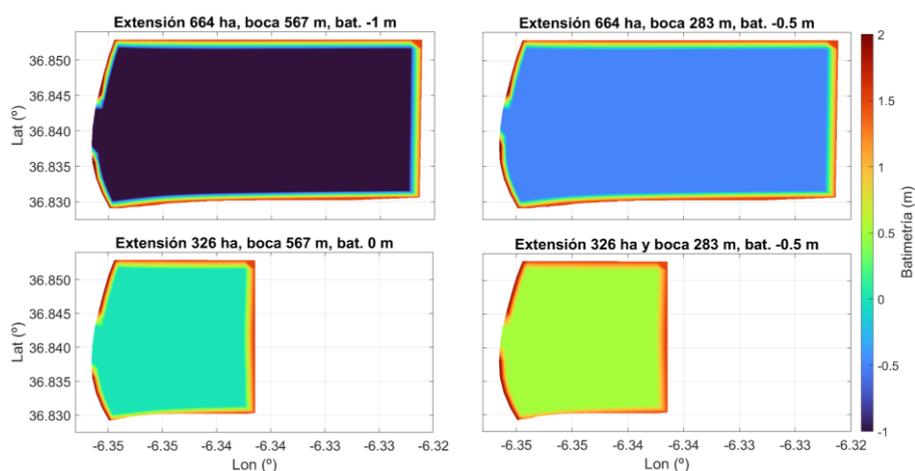


Figura 4.2 – Batimetrías para diferentes configuraciones de extensión y boca de la llanura 1.

El método de análisis aplicado ha sido el siguiente: se han definido 25 puntos de observación a lo largo del cauce y 9 secciones transversales, una en la desembocadura (señalada en rojo en la Figura 4.1) y las 8 restantes en el estuario, justo aguas abajo y arriba de cada llanura

(señaladas en naranja en la Figura 4.1). En todos ellos se han extraído datos de nivel, salinidad, corriente longitudinal y caudal. Para cada una de estas variables se han elaborado perfiles a lo largo del estuario de valores promedios y constantes armónicas de la constituyente dominante M2. Con estos datos se han calculado diferencias entre la simulación con llanura menos la simulación de referencia sin llanura para el caso de valores promedios y ganancia en amplitud y diferencia de fase para el análisis armónico mareal. También se ha calculado el prisma mareal a partir del caudal en las secciones transversales al cauce principal.

Tabla 4.1 – Características de las llanuras mareales analizadas. Los valores entre corchetes hacen referencia al área/longitud extra correspondiente a las celdas del estuario que pasan a ser inundables al crear la llanura. La longitud de la boca es la distancia paralela al cauce del estuario que lo conecta con la llanura y son dos valores, estrecho o ancho, según se consideren una o dos celdas del mallado del cauce principal. Los colores de las distintas celdas hacen referencia a las llanuras y siguen el criterio empleado para representarlas en la Figura 4.1.

Zona estudio	Tamaño mallado (MxN)	Área llanura (ha)	Longitud máxima de la llanura tierra adentro (m)	Longitud de la boca (m)	Distancia a Bonanza (km)
1.1	34x21	664 [+4]	2690 [+80]	283/567	4.7
1.2	19x21	326 [+4]	1335 [+80]		
2.1	26x29	653 [+3]	2250 [+65]	220/444	14.1
2.2	15x29	323 [+3]	1140 [+65]		
3.1	24x21	676 [+4.5]	2005 [+105]	290/569	20.9
3.2	15x21	337 [+4.5]	1130 [+105]		
4.1	29x25	660 [+2.5]	2490 [+50]	230/469	30.3
4.2	17x25	339 [+2.5]	1315 [+50]		

4.2.- Influencia de la ubicación de la llanura para una configuración dada de la misma.

Este apartado estudia el efecto de la localización de la llanura en el sistema estuarino. Para ello se escogen configuraciones de las llanuras similares (extensión≈660 ha, boca≈512 m, batimetría=-0.5 m) de modo que la única variable diferenciadora es su posición en el estuario.

4.2.1.- Nivel

El nivel medio (Figura 4.3, panel superior) aumenta progresivamente hasta la presa de Alcalá en todos los casos. El aumento es ligeramente mayor en presencia de las llanuras, lo que se observa mejor en el panel inferior de la Figura 4.3. Hay un comportamiento recurrente y es que aguas abajo de la ubicación de la llanura, el nivel disminuye localmente y aguas arriba aumenta. Esto se atribuye al papel que tiene la llanura durante el ciclo mareal: en el semiciclo de marea vaciante, ésta aporta agua al estuario dificultando el flujo que viene por el cauce desde su parte alta hacia la desembocadura, lo que hace que el nivel no disminuya tanto aguas arriba de la llanura. Por otra parte, aguas abajo el nivel disminuye porque la llanura capta agua durante la fase de llenante, provocando ese mínimo local. La llanura 1, ubicada a 5 km de Bonanza, muestra un comportamiento ligeramente diferente, presentando una disminución aguas abajo más pronunciada que las demás, y un aumento aguas arriba mucho más suave, que pudiera ser debido a su proximidad a la desembocadura y, por tanto, a una influencia más directa del océano

abierto. En todos los casos, las diferencias respecto a la situación de referencia nunca alcanzan los 2cm, siendo inferiores a 1.5cm en la parte navegable (<PK80). Por tanto, la influencia que la ubicación de la llanura pueda tener sobre el nivel medio es mínima, con la poco relevante excepción comentada de la llanura ubicada en las proximidades de la desembocadura, la cual puede causar una disminución relativa de nivel medio de poco más de 1 cm frente a otras ubicaciones (panel inferior de Figura 4.3, inmediaciones de PK0).

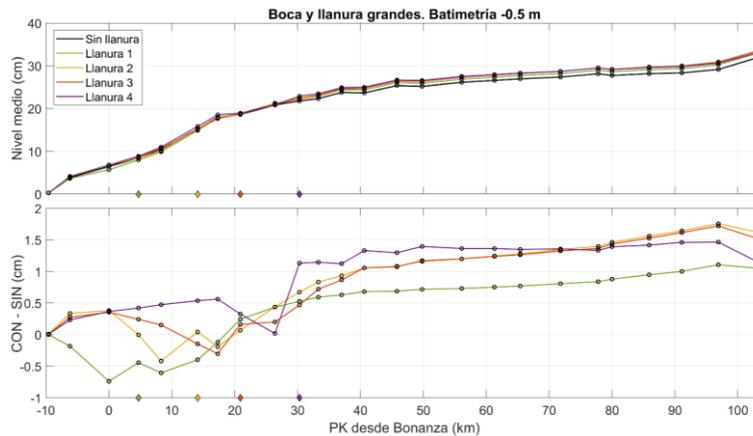


Figura 4.3 – Panel superior: perfiles longitudinales del valor promedio de nivel (cm) para el caso sin llanura y las 4 ubicaciones de las llanuras para la misma configuración de extensión y boca mayores y batimetría de la llanura de -0.5 m. Panel inferior: perfil longitudinal de las diferencias calculadas como el resultado de la simulación con llanura menos sin llanura. En ambos paneles se indica la ubicación de las llanuras con rombos con el código de color de los perfiles.

La Figura 4.4 muestra los cambios que experimenta la onda de marea en presencia de llanuras, empleando para ello las constantes armónicas de M2. **La implantación de una llanura, independientemente de la ubicación, siempre disminuye la amplitud (menor rango mareal) y aumenta la fase (mayor tiempo de tránsito o mayor intervalo entre, por ejemplo, las pleamares en Bonanza y Sevilla).** Resulta interesante ver que estas modificaciones sí dependen de la ubicación de la llanura, **acentuándose a medida que la llanura se implanta más hacia el interior del estuario** (paneles superiores, Figura 4.4). La amplitud llega a disminuir hasta 6 cm respecto a la situación de referencia en el caso 4 (llanura más interior, panel superior izquierdo), lo que significa una reducción del 10 % en la parte central del estuario (panel inferior izquierdo).

Estas variaciones porcentuales muestran, además de esa reducción con la ubicación, una segunda característica consistente en un patrón en "V" cuyo mínimo se detecta aguas arriba de la ubicación de la llanura, tanto más lejos de ésta cuanto más próxima a la desembocadura esté la llanura (panel inferior izquierdo, Figura 4.4). Igualmente, es interesante el pico en la diferencia de fases justo en la zona donde se implanta la llanura (panel inferior derecho), que aumenta a medida que la llanura se ubica más hacia el interior del estuario. Ambas características indican una influencia local de la llanura en la parte donde conecta con el estuario, influencia que se acentúa a medida que la llanura se desplaza hacia el interior. A esta influencia local se ha de añadir la más general e importante ya mencionada de disminución de amplitud y retardo de propagación que afecta a todo el estuario (paneles superiores, Figura 4.4) **que se explicaría si la llanura actuase como un mecanismo que incrementa la fricción en la parte del estuario comprendida entre la desembocadura y la ubicación de la llanura.** Por esa razón, cuanto más alejada de la desembocadura, mayor el efecto observado. A ello hay que añadir el efecto más local (y secundario) de la mínima ratio y máxima diferencia de fase en las inmediaciones de la llanura ya comentado.

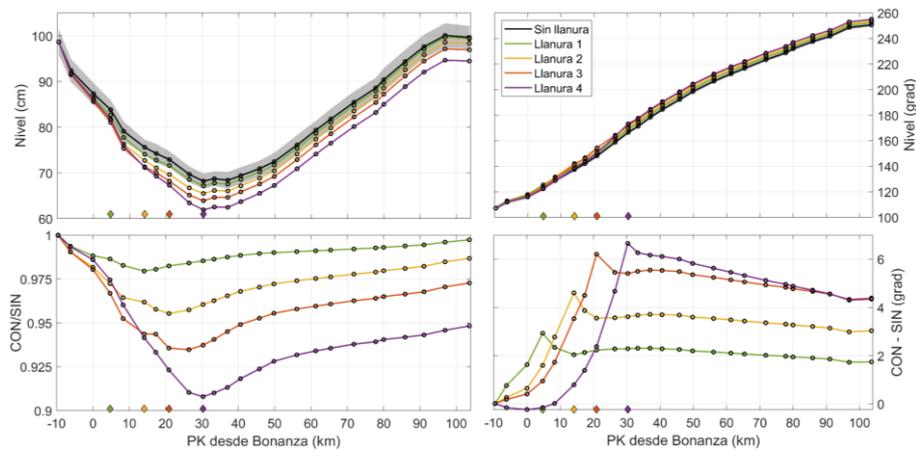


Figura 4.4 – Paneles superiores: perfiles de amplitud (izquierda) y fase (derecha) de M2 para el nivel para distintas ubicaciones de la llanura. Se incluye el perfil para el caso de referencia sin llanura, el cual aparece con su incertidumbre (franja gris) que es representativa del resto de casos (que no se dibujan por razones de claridad). Paneles inferiores: ratio de amplitudes ($CON_llanura/SIN_llanura$, izquierda) y diferencia de fases ($CON_llanura-SIN_llanura$, derecha). En todos los paneles se indica la ubicación de las llanuras con rombos con el código de color de los perfiles.

4.2.2.- Salinidad

El perfil longitudinal promedio de salinidad (Figura 4.5) muestra que **la llanura aumenta la salinidad en todo el estuario independientemente de su ubicación y que ésta alcanza su máximo una pequeña distancia aguas arriba de la posición de la llanura. Como consecuencia, el tapón salino tiende a adentrarse en presencia de llanuras, aunque ese avance tiende a mitigarse cuanto más aguas arriba se ubique la llanura.** Esto está relacionado con la dinámica comentada para el nivel: la llanura se inunda de agua salina que viene del océano durante la fase llenante, y se convierte en un reservorio que, durante la vaciante, aporta un extra de agua más salina al estuario y limita parcialmente la ventilación de la zona baja con el agua menos salina proveniente de la cabecera. La posición de la llanura influye en este patrón, siendo menores las diferencias cuanto más hacia el interior esté la llanura (panel inferior, Figura 4.5). Esto es consecuencia directa de la distribución de salinidad media en el estuario, que disminuye a medida que se avanza hacia la cabecera.

La Figura 4.6 compara las constantes armónicas de amplitud y fase de M2 para la salinidad superficial media. El patrón de amplitudes es bastante recurrente: en la ubicación de la llanura la amplitud muestra un mínimo con excepción del caso 1, más próximo a la desembocadura, donde ese mínimo sólo se insinúa. Ello hace que las amplitudes aguas abajo de la llanura sean inferiores a las del caso de referencia (dando lugar a valores de $ratio < 1$, panel inferior izquierdo), en tanto que aumentan por encima de las del caso de referencia aguas arriba. A este respecto, debe advertirse que las elevadas ratios de amplitud aguas arriba son engañosos porque en esas zonas altas la fluctuación mareal de salinidad es pequeña siempre debido al escaso gradiente salino allí (“cola asintótica” de todas las curvas en el panel superior de la Figura 4.5). Ello causa amplitudes de marea muy pequeñas: en el denominador de la ratio figura la amplitud del caso de referencia que hace que el cociente tome valores muy altos los cuales, físicamente, son irrelevantes. La fase aumenta progresivamente con la posición de la llanura, con diferencias poco importantes que tienden a estabilizarse aguas arriba de ella.

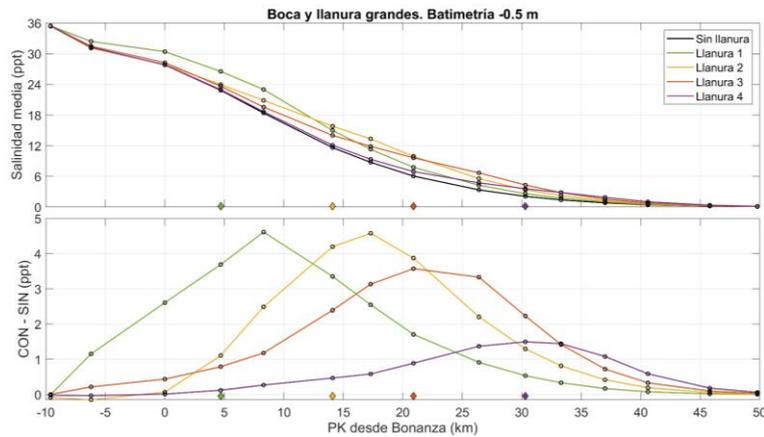


Figura 4.5 – Como en la Figura 4.3, pero para la salinidad superficial media.

Puesto que en un punto dado la fluctuación mareal de la salinidad es función de la corriente y del gradiente horizontal de salinidad, y que aquella no cambia tanto (ver Figura 4.8), se concluye que la disminución y los mínimos de amplitud aguas abajo de la llanura se deben a la disminución de éste, es decir, a una tendencia a acumular sal aguas abajo de la llanura respecto a la situación de referencia. En otras palabras, **la llanura mareal tiende a reducir el gradiente salino aguas abajo y a aumentarlo aguas arriba de su ubicación, lo que origina una concomitante disminución y aumento de amplitudes mareales de salinidad** (panel superior izquierdo, Figura 4.6). La explicación es el ya mencionado efecto reservorio que tiene la llanura, que acumula agua salina durante la marea llenante y evita en parte que proceda río arriba. En vaciante, la llanura libera esa agua y hace que las fluctuaciones mareales aguas abajo se reduzcan respecto al caso en el cual las aguas dulces alcanzan directamente esa región.

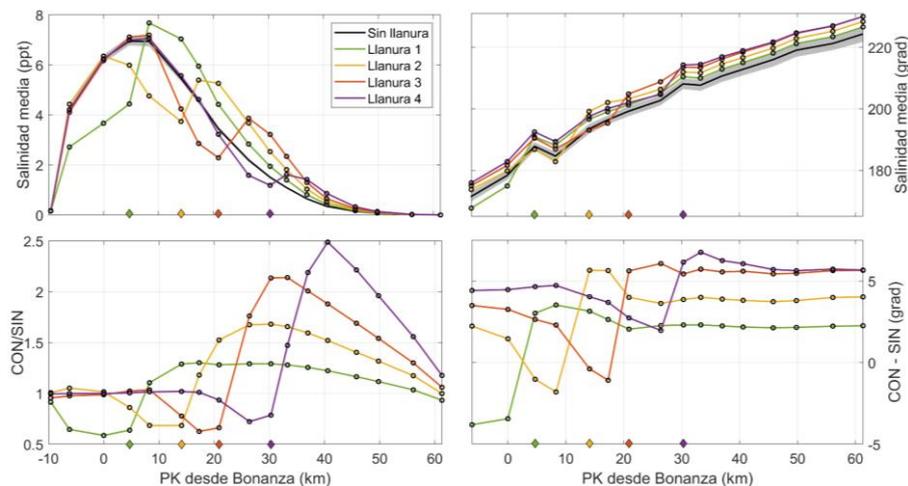


Figura 4.6 – Como en la Figura 4.4, pero para la salinidad superficial.

4.2.3.- Corriente longitudinal

Esta variable es sensible a la batimetría y la posición en la sección transversal del punto seleccionado para extraer la variable (ver comentarios en la sección 2.4.3.- Corriente longitudinal). La corriente media no debe cambiar respecto a la de la situación de referencia pues sólo depende de la descarga de agua dulce impuesta, que es la misma en todos los casos. Esto es básicamente lo que indica la Figura 4.7 en la que únicamente se aprecian cambios apreciables en las posiciones de las llanuras, consecuencia de que la velocidad en el punto

empleado para extraer el dato en la simulación de referencia cambia cuando se coloca la llanura debido al comportamiento local del vaciado/llenado de la misma. Aguas arriba y abajo de la llanura apenas hay modificaciones en la corriente longitudinal.

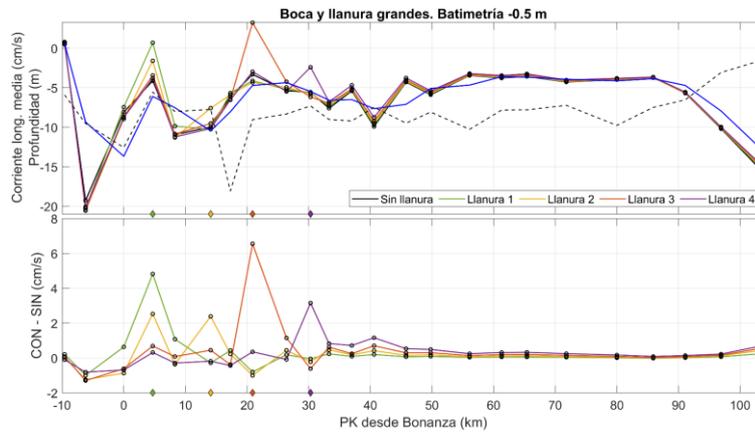


Figura 4.7 – Como en la Figura 4.3, pero para la corriente longitudinal media. En el panel de arriba también se muestra una versión suavizada del perfil sin llanura tras un filtrado paso-bajo (línea gruesa azul) y la batimetría de los puntos empleados para definir el perfil (línea discontinua).

La amplitud de la corriente longitudinal muestra, por un lado, un aumento de amplitud en toda la extensión de estuario comprendida entre la llanura y la desembocadura (Figura 4.8, paneles izquierdos), que es físicamente consistente con la necesidad de que llegue más agua para inundar la llanura en cada ciclo mareal. La máxima amplificación ocurre ligeramente aguas abajo de la posición en la que se implante la llanura y es bastante independiente de la ubicación de la misma. Por otro lado, se observa una ligera disminución de amplitudes aguas arriba de la misma, consistente también con la disminución de amplitud mareal registrada en el nivel (Figura 4.4). En este caso, esa disminución sí se ve afectada por la ubicación de la llanura, siendo mayor cuanto más hacia el interior esté situada, patrón que es totalmente coherente con lo observado en la Figura 4.4 para el nivel. La fase aumenta pocos grados en todos los casos, presentando un mínimo local antes de la llanura.

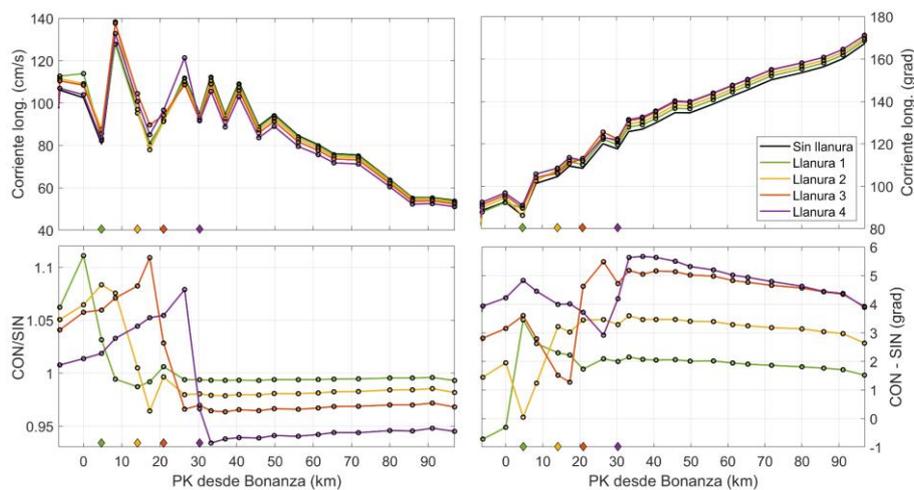


Figura 4.8 – Como en la Figura 4.4, pero para la corriente longitudinal.

4.2.4.- Prisma mareal

La Figura 4.9 presenta series temporales de prismas mareales calculados siguiendo el procedimiento detallado en la sección 2.4.4.- Prisma mareal para la sección transversal de la desembocadura (“SD” en la Figura 4.1). Se muestran los prismas calculados en el caso de referencia y en los casos en que se implantan llanuras de la misma configuración (extensión y boca grandes, batimetría de -0.5m) pero ubicadas en posiciones diferentes. Debido a las distintas frecuencias presentes en los ciclos mareales, la Figura es complicada de interpretar, aunque sí se aprecia (y muy claramente en el caso de la llanura 1) cómo este prisma aumenta en presencia de llanuras mareales. Es el resultado lógico esperable, dado que la presencia de la llanura requiere la entrada/salida de más agua del océano para inundarla/vaciarla.

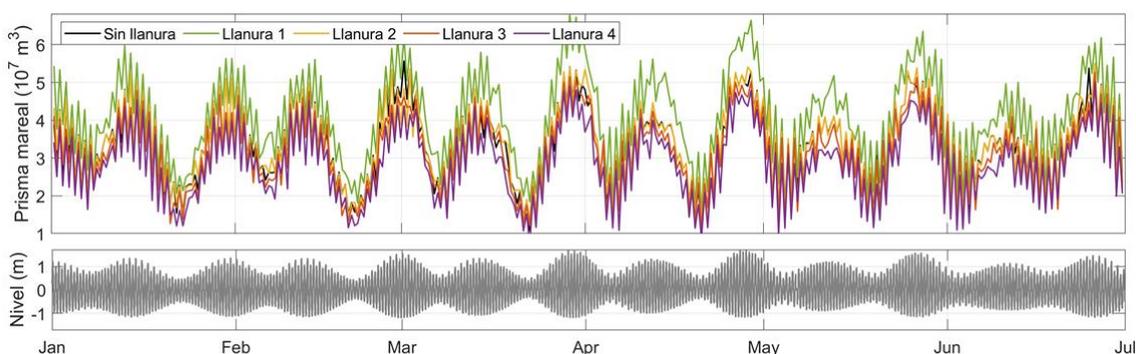


Figura 4.9 – Prisma mareal (panel superior) calculado en la desembocadura (sección transversal “SD”, ver Figura 4.1) para diferentes ubicaciones de llanuras mareales con configuraciones morfológicas similares. El prisma muestra una clara periodicidad quincenal siguiendo el ciclo marea viva – marea muerta, como lo confirma la comparación visual con la oscilación del nivel del estuario en el centro de la sección razón mostrada en el panel inferior.

Debido a esa complicación, se ha preferido realizar el estudio en términos de constantes armónicas de los caudales movidos por la marea. Los resultados son evidentemente comparables pues el prisma mareal es el caudal integrado entre pleamar y bajamar excluyendo la contribución continental. La Tabla 4.2 resume las constantes armónicas de la selección de constituyentes más importantes calculadas en la desembocadura (sección transversal “SD”) y muestra cómo las amplitudes de los caudales a través de esa sección aumentan con la presencia de la llanura y lo hacen con un patrón común: el aumento es tanto mayor cuanto más próxima esté la llanura a la desembocadura. Respecto a la constituyente más importante M2, por ejemplo, la presencia de la llanura 1 aumenta la amplitud mareal del caudal en un 8%, proporción que va disminuyendo progresivamente hasta reducirse a apenas un 1% en el caso de la llanura 4. El resto de constituyentes se comportan de manera similar.

Tabla 4.2 – Constantes armónicas de las constituyentes principales del caudal en la sección de la desembocadura (“SD”, Figura 4.1) para los 4 experimentos de ubicación de la llanura. Los resultados se muestran en forma amplitud/fase, estando medida la amplitud en m^3s^{-1} y la fase en grados. Se incluye el experimento de referencia, para el cual no existe llanura, a efectos de comparación.

Experimento	Constituyente					
	M2	S2	N2	K1	O1	M4
Sin llanura	4310/29.4	1274/55.3	764/14.7	230/10.8	196/272.1	392/61.3
Llanura 1	4651/28.5	1372/54.3	824/14.2	251/11.1	214/272.7	653/68.6
Llanura 2	4580/31.3	1349/57.1	808/16.7	249/12.8	212/274.2	497/83.1
Llanura 3	4527/32.8	1329/58.4	795/18.0	248/14.3	212/275.7	417/84.0
Llanura 4	4353/33.9	1282/59.0	766/18.7	244/15.5	208/277.0	302/73.8

La Tabla 4.3 da las constantes armónicas (en este caso solamente 3 de ellas) en cada una de las secciones aguas abajo y arriba de cada ubicación de llanura. Esa diferencia entre ambas (siempre mayor la de aguas abajo, columnas "ABn") indica el caudal de agua retraído del que circula por el estuario para inundar la llanura. La

Tabla 4.4 confirma lo anterior, mostrando que las amplitudes de esas constituyentes en la boca de la llanura coinciden bien con las diferencias que se deducen de la Tabla 4.3. Esta última indica que las llanuras captan volúmenes similares de agua independientemente de dónde se ubiquen en tanto que la configuración (extensión, profundidad, tamaño de boca) sea también similar.

Tabla 4.3 – Constantes armónicas de las constituyentes M2, S2 y K1 del caudal en las secciones aguas abajo (ABn) y aguas arriba (ARn) de cada ubicación de llanura. La letra "n" (n=1,2,3,4) hace referencia a la llanura, la cual se indica explícitamente en la primera columna, y sirve para identificar las secciones en la Figura 4.1. Por ejemplo, la celda de la columna 3ª, fila 4ª [4087/35.3] se refiere a la sección AB1, la de la columna 6ª, fila 8ª [908/85.1], a la sección AR3, etc. Los resultados se muestran en forma amplitud/fase, estando medida la amplitud en m^3s^{-1} y la fase en grados. Se incluye para cada ubicación de llanura el experimento de referencia, sin llanura, a efectos de comparación.

Llanura	Experimento	Constituyente					
		M2		S2		K1	
		ABn	ARn	ABn	ARn	ABn	ARn
1	Sin (ref.)	4087/35.3	3964/38.5	1189/62.1	1143/65.9	216/13.8	208/15.6
	Con llanura	4409/33.6	3924/40.9	1281/60.3	1129/68.4	237/13.8	206/17.3
2	Sin (ref.)	3695/45.2	3570/48.2	1049/73.9	1007/77.4	190/18.9	182/20.5
	Con llanura	3971/45.5	3475/52.2	1126/73.8	977/81.6	209/20.2	178/23.3
3	Sin (ref.)	3353/52.5	3260/54.6	937/82.6	908/85.1	168/22.5	161/23.5
	Con llanura	3625/53.5	3126/60.3	1009/82.8	866/91.0	188/24.8	158/28.0
4	Sin (ref.)	2940/61.3	2830/63.4	812/93.2	780/95.8	141/26.9	134/28.0
	Con llanura	3162/63.7	2650/69.2	871/94.3	729/101.4	160/30.8	129/32.8

Tabla 4.4 – Constantes armónicas de las constituyentes M2, S2 y K1 del caudal en la sección de la boca de la llanura. Los resultados se muestran en forma amplitud/fase, midiendo la amplitud en m^3s^{-1} y la fase en grados.

Experimento	Constituyente		
	M2	S2	K1
Llanura 1	468/356	141/21.5	23.1/357.4
Llanura 2	448/14.3	135/38.8	23.3/7.0
Llanura 3	496/21.4	148/46.2	25.1/11.3
Llanura 4	446/42.1	131/66.6	24.6/25.0

En las anteriores tablas llama la atención el hecho de que el caudal en la desembocadura sí tenga dependencia con la ubicación de la llanura, disminuyendo cuanto más lejos se implante. Podría pensarse que esta disminución es debida a que la llanura capta menos caudal a medida que nos alejamos de la desembocadura, pero la

Tabla 4.4 desmiente esta hipótesis. La explicación realmente está en la Figura 4.4, que indica una reducción de la amplitud mareal en el estuario (especialmente en la parte alta) a medida que la llanura se aleja de la desembocadura. Desde este punto de vista, la llanura actúa como si se aumentase la fricción en el estuario, reduciendo la amplitud de la onda (Figura 4.4) y aumentando la fase (progresión más lenta). Y ambos aspectos se ven acentuados a medida que la llanura se implanta más y más alejada de la desembocadura (Tablas 4.2 a 4.4).

4.3.- Influencia de la configuración de la llanura para una ubicación dada de la misma

En esta sección se analiza la influencia que tienen en el estuario distintas configuraciones morfológicas de una llanura. Se ha escogido la llanura 2 ubicada en el PK14 (ver Figura 4.1) para presentar los resultados del análisis, aunque se hayan hecho experimentos en todas las demás. Los efectos producidos son similares para todas las ubicaciones (no se muestran en este informe); los resultados expuestos a continuación para la llanura seleccionada son extrapolables a las demás.

4.3.1.- Nivel

La Figura 4.10 detalla el efecto de las diferentes configuraciones de bocas y llanuras en el nivel promedio, mostrando la diferencia entre el caso con llanura menos el caso sin llanura. En todos los experimentos el cambio es menor de 2 cm (y menor de 1.5 cm en la parte navegable del estuario) y puede ignorarse a efectos prácticos. La situación de una llanura con elevación +0.5m (líneas fucsias en la Figura 4.10), que sólo se inunda cuando el nivel mareal excede esta cota, no produce cambios dignos de mención y apenas se hará alusión a ella en esta sección.

Se confirma el patrón de nivel medio comentado en la sección anterior: la llanura produce una alteración local consistente en una disminución centrada alrededor de la misma, cuya magnitud depende del resto de variables analizadas. Por ejemplo, es mayor cuando la boca de conexión es grande. La gran similitud de las simulaciones con menor extensión (configuración 2.2 en Tabla 4.1) que se aprecia en los paneles inferiores de la Figura 4.10 parece indicar que, en tanto que las extensiones sean parecidas, los efectos también lo son. O, alternativamente, **que la extensión de la llanura es la variable con mayor peso en las variaciones que se produzcan.** Aguas arriba de la llanura, todas las simulaciones muestran un aumento del nivel, más pronunciado en los casos con extensión mayor, y menos para la batimetría de -1 m, debido a que la llanura no llega a vaciarse durante el semiciclo de marea vaciante (ver Figura 4.15 más adelante).

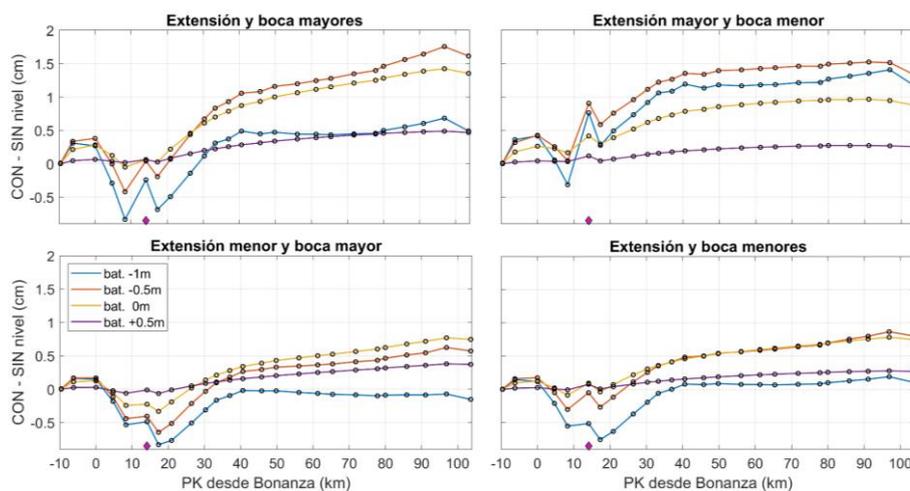


Figura 4.10 – Perfil longitudinal de diferencias de nivel medio calculadas como nivel con llanura menos nivel sin llanura para la llanura 2. Panel superior izquierdo: tamaño grande (configuración 2.1 en Tabla 4.1) con boca grande. Panel superior derecho: configuración 2.1 con boca pequeña. Panel inferior izquierdo: tamaño pequeño (configuración 2.2) con boca grande. Panel inferior derecho: configuración 2.2 con boca pequeña. Todos los paneles muestran los

resultados para las cuatro batimetrías consideradas (leyenda en panel inferior izquierdo); la ubicación de la llanura se indica con el símbolo rosa.

La Figura 4.11 muestra el análisis armónico del nivel para la constituyente M2. La diferencia más evidente la produce la extensión de la llanura: cuánto mayor ésta, mayor aquélla también (comparar los 4 paneles superiores con los 4 inferiores en la Figura 4.10). Para extensión y tamaño de boca dados, el efecto disminuye de mayor a menor profundidad, siendo la batimetría -1m la que causa las mayores diferencias (de nuevo la batimetría +0.5 m no produce cambios apreciables). La anchura de la boca tiene un efecto menor. En términos generales, **la llanura con extensión menor centra la reducción del nivel medio en sus inmediaciones dejándolo inalterado en el resto del estuario y apenas modifica la dinámica mareal. La llanura más extensa deja sentir algo más su efecto en el nivel medio en todo el estuario, disminuyéndolo en las inmediaciones y aumentándolo aguas arriba, y reduce las oscilaciones semidiurnas, con mayor acento en sus inmediaciones.** Para las llanuras investigadas, todos esos efectos son menores, no llegando a suponer nunca variaciones porcentuales superiores al 10% en las situaciones más desfavorables y que no superan el 5% en promedio. Si la llanura está por encima de la cota cero (batimetría +0.5 en Figura 4.10 y Figura 4.11), no ocurren efectos dignos de mención.

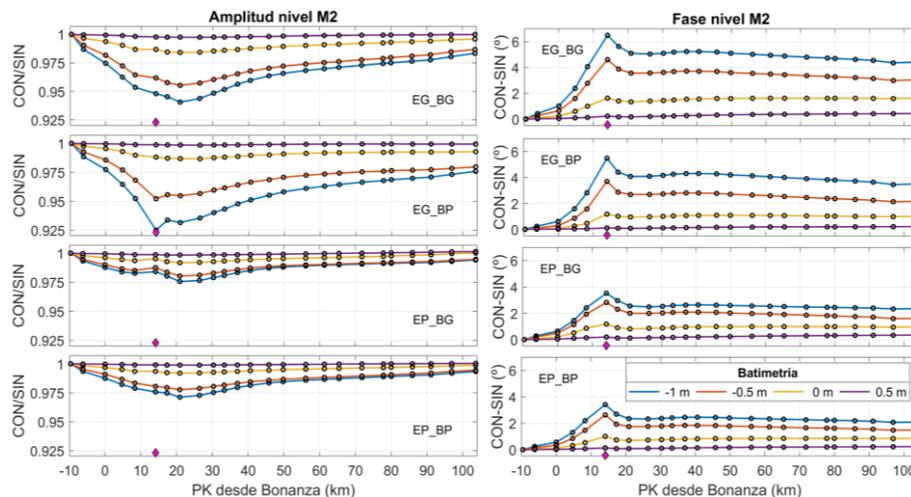


Figura 4.11 – Ratio de amplitudes (izquierda) y diferencia de fases (derecha) en las constantes armónicas de M2 a lo largo del estuario producidas por la implantación de la llanura 2. Se muestran las 4 posibles combinaciones extensión-tamaño boca (EG: extensión grande, EP: extensión pequeña; BG: boca grande, BP: boca pequeña) y las 4 batimetrías en cada combinación. En todos los paneles se indica la ubicación de la llanura con un rombo rosa.

4.3.2.- Salinidad

La Figura 4.12 muestra que la salinidad media en el estuario aumenta con la presencia de la llanura, independientemente de su morfología (extensión, tamaño de boca, batimetría) y alcanza su mayor aumento unos 3 km aguas arriba de esta (PK17). Cuanto mayores son las batimetrías, extensiones y tamaños de boca, mayor es el aumento de salinidad, siendo especialmente notable para el caso de mayores proporciones. Al igual que en las anteriores ocasiones, la batimetría +0.5m por encima de la cota cero produce cambios insignificantes. Los mayores cambios los produce la batimetría de -1m y las proporciones de los cambios en la Figura 4.12 sugiere linealidad entre el tamaño de la batimetría y el incremento de salinidad media.

La Figura 4.13 compara las constantes armónicas de la constituyente M2 de la salinidad superficial media para las distintas configuraciones de llanura y el caso de referencia. Se observa

que la amplitud de la señal mareal disminuye aguas abajo de la llanura hasta alcanzar casi el 50% frente a ella en el caso de la batimetría más profunda. El aumento porcentual aguas arriba es mayor (aunque la alerta dada anteriormente sobre lo engañoso de este porcentaje continúa vigente) y siempre siguiendo el orden de mayor a menor batimetría. Su efecto es también más notorio cuanto mayor es el tamaño de la boca y su extensión.

Respecto a la fase, se distinguen dos comportamientos dentro del estuario: aguas abajo de la llanura, donde disminuye, y aguas arriba, donde aumenta. La explicación para este comportamiento es la ya facilitada en la sección 4.2.2.- Salinidad: en la vaciante aporta agua más salina al estuario, provocando que no haya tanta renovación de agua menos salina; mientras que, durante la llenante, la salinidad penetra más aguas arriba por las condiciones de mayor salinidad que ha dejado la llanura durante la vaciante.

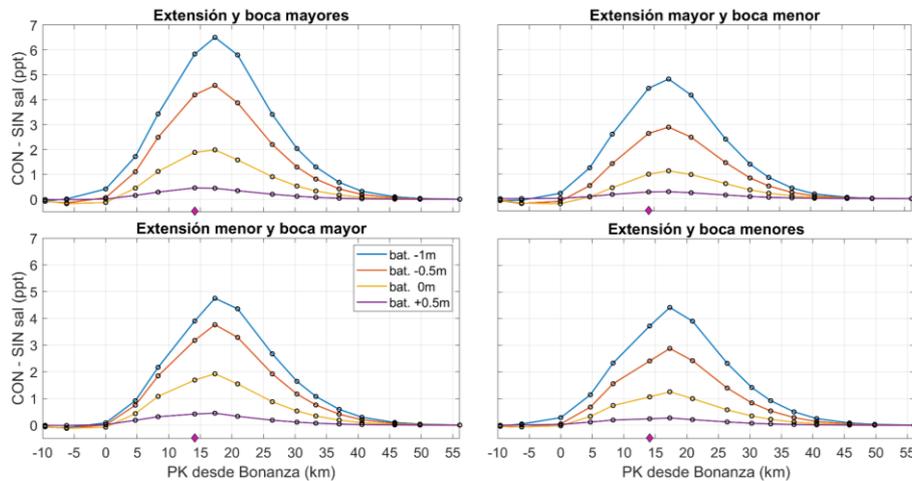


Figura 4.12 – Como en la Figura 4.10 para la salinidad superficial media.

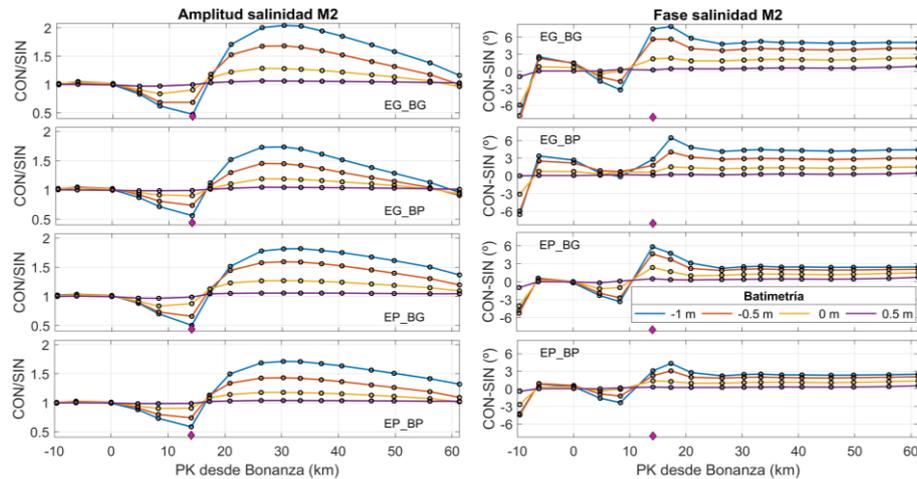


Figura 4.13 – Como en la Figura 4.11, pero para la salinidad superficial. Nótese que a partir del PK50 la salinidad es menor a 0.1 PSU y, por tanto, la ratio no proporciona información relevante.

4.3.3.- Corriente longitudinal

El efecto de la llanura en la velocidad longitudinal media es principalmente local y apenas se ve alterado por las distintas configuraciones adoptadas. Teniendo además en cuenta la sensibilidad de la velocidad longitudinal a la batimetría del punto de control seleccionada comentada en la sección 2.4.3.- Corriente longitudinal, que puede causar diferencias

importantes en la comparación que no están sustentadas físicamente, se concluye que la velocidad media no es alterada por la presencia de la llanura, conclusión respaldada por el hecho de que esa velocidad media viene impuesta exclusivamente por la descarga de agua dulce establecida. No se incluyen figuras de estas variaciones con el fin de evitar interpretaciones infundadas.

Respecto al comportamiento mareal, la amplitud (Figura 4.14) aumenta aguas abajo de la llanura (máx. del 10%) y disminuye (mín. del -5 %) en sus cercanías, disminución que se mantiene constante aguas arriba en todo el estuario. El efecto es mayor conforme mayor es la extensión y la batimetría, mientras que la anchura de la boca apenas tiene efecto. La fase siempre aumenta, salvo para la extensión pequeña antes de la llanura, donde disminuye. Las explicaciones dadas en la sección 4.2.3.- Corriente longitudinal son aplicables aquí y no se insiste sobre ellas.

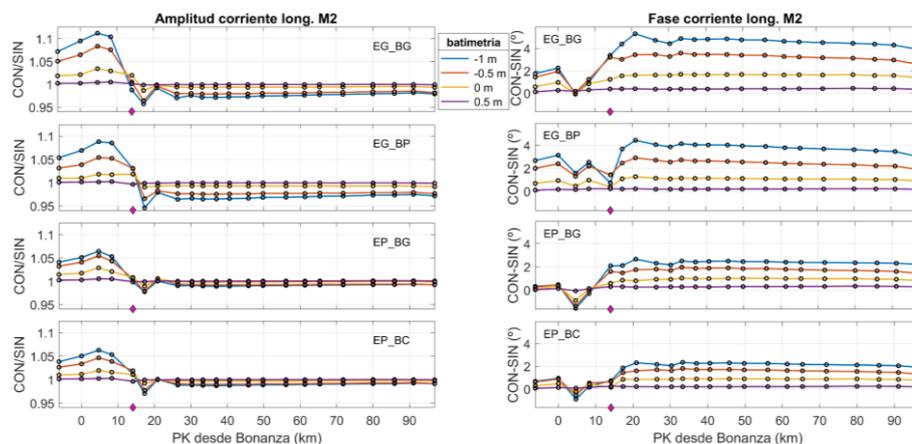


Figura 4.14 – Como en la Figura 4.11, pero para la corriente longitudinal.

4.3.4.- Prisma mareal

La Figura 4.15 muestra un fragmento de cuatro días de la serie temporal del caudal en la boca de la llanura. Durante el ciclo de creciente, la llanura se llena hasta la pleamar siguiendo un patrón similar al del estuario (comparar paneles superiores y medios con los inferiores en la Figura 4.15). Durante la vaciante se desagua rápidamente al principio para seguir después haciéndolo poco a poco hasta que se queda vacía para todas las batimetrías (antes cuanto más somera es), salvo para la de -1 m y en alguna ocasión esporádica, la de -0.5 m (paneles superiores y medios, Figura 4.15). Así pues, **la configuración de la llanura es determinante en el comportamiento del caudal a través de su boca**. El hecho de que la llanura con batimetría -1m no llegue a vaciarse totalmente, ni siquiera cuando el nivel instantáneo en el estuario está por debajo, es la causa del patrón inesperado del nivel medio en la Figura 4.10 mencionado anteriormente. Por lo demás, cuanto mayor es la boca, más repentino es el intercambio de agua y cuanto mayor es la extensión de la llanura más regular es el vaciado/llenado. Es interesante el mínimo local que ocurre durante la llenante, más ostensible en la batimetría de +0.5 m. Se piensa que su causa es el choque que provoca la onda de marea al irrumpir en la llanura por primera vez, que se opone a la entrada de agua brevemente y que es probable que esté directamente relacionado con la forma regular de la llanura.

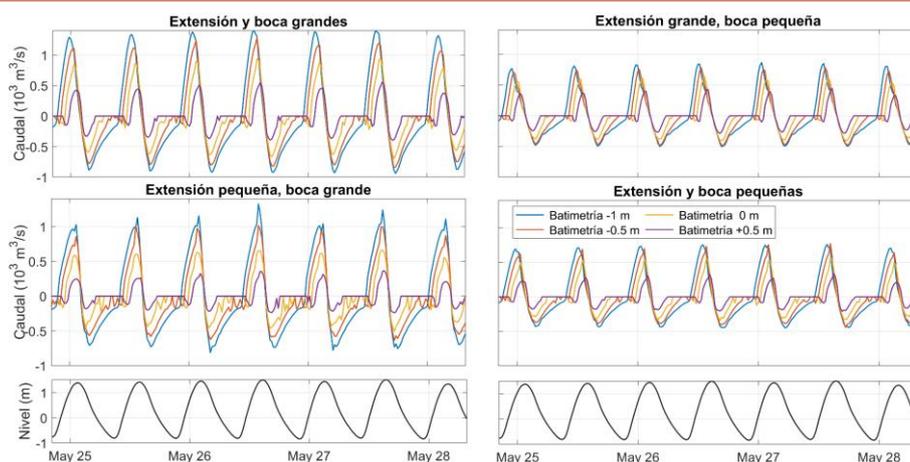


Figura 4.15 – Fragmento de la serie de caudal en la boca de la llanura 2 para las cuatro combinaciones de extensiones de llanura y de boca y las cuatro batimetrías consideradas. Se añade el nivel en el cauce principal frente a la boca de la llanura.

Por las mismas razones argumentadas en la sección 4.2.4.- Prisma mareal se escoge el método de análisis armónico para explicar las variaciones del prisma mareal, utilizando la sección de la desembocadura (“SD”, Figura 4.1) para evaluar los cambios en la constituyente principal M2. La Tabla 4.5 presenta los resultados de dicho análisis.

Tabla 4.5 – Constantes armónicas (amplitud, m^3s^{-1} ; fase, grados) de la constituyente M2 del caudal en la sección de la desembocadura (“SD”, Figura 4.1) para las 16 configuraciones implementadas en la llanura 2. La última fila muestra los resultados obtenidos para el caso de referencia (sin llanura) a efectos de comparación.

Configuración			Constituyente M2	
Extensión	Boca	Batimetría	Amplitud	Fase
Grande	Ancha	-1 m	4689	31.4
		-0.5 m	4580	31.3
		0 m	4411	30.4
		+ 0.5 m	4323	29.7
	Estrecha	-1 m	4520	29.7
		-0.5 m	4482	29.8
		0 m	4391	29.7
		+ 0.5 m	4327	29.6
Pequeña	Ancha	-1 m	4595	32.6
		-0.5 m	4476	32.0
		0 m	4360	30.5
		+ 0.5 m	4315	29.6
	Estrecha	-1 m	4512	30.2
		-0.5 m	4453	30.3
		0 m	4365	29.9
		+ 0.5 m	4319	29.6
Referencia (sin llanura)			4310	29.4

En lo referente a amplitud, ésta es mayor en todos los casos con llanura a la del caso de referencia sin llanura. A igualdad de extensión y tamaño de boca, la diferencia de caudal respecto al caso de referencia aumenta conforme lo hace la batimetría. A igualdad de batimetría y extensión, el mayor tamaño de boca determina el mayor caudal (con excepción de un par de casos irrelevantes en el caso de batimetrías someras) y a igualdad de batimetría y tamaño de boca, es la extensión. Todo lo anterior se resume en que cuanto más volumen contenga la

llanura y mayor sea su conexión con el estuario, mayores son los cambios, que oscilan entre un aumento del 8.8 % para el caso más favorable (extensión y tamaño de boca grande, batimetría=-1 m, primera fila de la Tabla 4.5) y un despreciable 0.2 % en el menos (extensión y tamaño de boca pequeños, batimetría=+0.5 m, penúltima fila de la Tabla 4.5).

Respecto a la fase, ocurre algo similar. Siempre es mayor en todos los casos con llanura, correspondiendo los mayores incrementos a las batimetrías más profundas. Curiosamente para esta variable, las extensiones pequeñas producen desfases ligeramente mayores, aunque la máxima diferencia es apenas de 3 grados (3.2 para el caso de extensión pequeña, boca grande y batimetría de -1 m, novena fila de la Tabla 4.5) y en la mayoría de los casos, inferiores a 2 grados. Son irrelevantes. Pero el comportamiento regular de retraso sí es interesante, pues confirma lo comentado de que la implantación de llanuras juega un papel similar al de aumentar la fricción en el estuario.

4.4.- Conclusiones

Este capítulo ha estudiado la influencia de la implantación de hipotéticas llanuras mareales de geometría simple en la dinámica del estuario. Se han escogido diferentes configuraciones en base a su ubicación, extensión, longitud de la conexión llanura-estuario y profundidad. Se ha evaluado el efecto que cada grado de libertad tiene en la dinámica del estuario y en la posición del tapón salino analizando variables de interés dinámico como son el nivel, la salinidad, la velocidad longitudinal y el prisma mareal. Dado el enorme número de combinaciones posibles para generar la configuración final de la llanura, el estudio individual de cada caso carece de interés práctico. Sí se puede decir que, en general y para las configuraciones seleccionadas (que cubren un muy amplio rango de posibilidades) la cifra del 10% es muy indicativa como límite superior de los cambios que experimentan las variables comentadas, siendo posiblemente la ubicación y la batimetría las variables más determinantes. Las variaciones inducidas en la dinámica mareal y salina no son, por lo tanto, grandes en comparación con otros factores (como podría ser una gran descarga en Alcalá), pero sí serían significativos en el medio-largo plazo. A continuación, se listan los resultados y conclusiones más destacables:

- Las mayores modificaciones que introducen las llanuras mareales son de naturaleza local, es decir, afectan al estuario en la zona que se extiende unos pocos km alrededor de su boca.
- La ubicación de la llanura en el estuario juega un papel importante en todas las variables al trasladar sus efectos locales. Las diferentes configuraciones de la llanura muestran un efecto menor en el nivel y la velocidad longitudinal y un efecto mayor en la salinidad.
- La llanura retrasa la onda de marea a lo largo del estuario (máximo de unos 10-12 minutos en la cabecera del estuario) y disminuye su amplitud (máximo un 10 %). Cuánto más aguas arriba se ubique la llanura, más acentuados son estos cambios.
- Ambos patrones coinciden con los resultados que produciría una mayor fricción en el estuario, por lo que la introducción de una llanura es dinámicamente equivalente a aumentar la fricción².

² Desde un punto de vista de calibración de modelos numéricos, este resultado es muy importante, ya que la omisión de cauces obsoletos o de zonas inundables o, incluso, de ramales no implementados en el dominio numérico tienen potencial para modificar los resultados predichos por el modelo.

-
- El comportamiento de la llanura se acopla al ciclo de marea y afecta a la distribución salina: durante la creciente se nutre de agua del océano más salina que, posteriormente, libera durante la vaciante, modificando el gradiente horizontal de salinidad. Ello repercute en la señal mareal de salinidad, que puede sufrir importantes variaciones porcentuales.
 - La salinidad aumenta proporcionalmente al aumento de la profundidad, extensión y longitud de la conexión de la llanura con el estuario. Son cambios de naturaleza local que se concentran principalmente en la zona donde se implante la llanura.
 - La profundidad de la llanura tiene un efecto particular en la dinámica puesto que pone el límite al vaciado de la llanura.

5. Primeros casos de estudio de dispersión de contaminantes en el estuario

Este capítulo, de especial interés para la APS, muestra una aplicación preliminar del modelo de dispersión de contaminantes en el estuario del Guadalquivir. Dicha aplicación ha consistido en llevar a cabo una serie de simulaciones para estudiar eventuales vertidos ficticios de contaminantes en el estuario. La primera parte de este trabajo se ha centrado en recopilar información sobre las fuentes de contaminación más relevantes en el estuario y, en base a esto, se han programado simulaciones del modelo en las zonas más afectadas. Se ha prestado especial atención a las inmediaciones de la zona portuaria y al tramo medio y bajo del estuario, puesto que es en dichas zonas donde se registran las ratios más elevados de contaminación por metales pesados y por compuestos orgánicos, respectivamente (López-López et al., 2013). En la segunda parte del capítulo, se muestran los resultados preliminares de los experimentos de dispersión ficticia de contaminantes en dichas zonas.

5.1.- Identificación de las principales fuentes de contaminación en el estuario

Los principales aportes de contaminantes al estuario, entre los que se pueden incluir nutrientes y diversos compuestos, surgen de la intensa actividad antropogénica que se ha venido ejerciendo en la cuenca desde hace décadas (López-López et al., 2013). Dada la relevancia de las labores agrícolas en gran parte del estuario, los aportes puntuales de compuestos procedentes de este sector, como nitratos, fosfatos, pesticidas, plaguicidas, fitosanitarios y metales, entre otros elementos, suponen uno de los problemas ambientales más importantes (Contreras, 2012), especialmente en la margen izquierda, donde la extensión de canales de riego es aproximadamente un tercio superior al de la margen derecha (1890 km frente a 1418 km, respectivamente; ver Figura 1.1; Capítulo 1). Los vertidos de aguas residuales urbanas insuficientemente depuradas procedentes de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs, de aquí en adelante), por otro lado, resultan también una importante fuente de contaminación fecal, que ha sido ocasionalmente documentada en el tramo bajo del estuario, especialmente en época estival y durante episodios de intensas lluvias, cuando las estaciones de tratamiento no son capaces de gestionar los grandes volúmenes de aguas urbanas que se generan ante estos sucesos (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2021; Ecologistas en Acción, 2020a). A estas contribuciones, se suman las concentraciones de metales pesados introducidos accidentalmente en la dársena por la industria portuaria. Otros aportes, menos documentados, pero también de especial atención son los compuestos puntualmente transportados desde la tierra hasta la cuenca por escorrentía, así como la introducción accidental de residuos plásticos que pueden afectar notablemente a las comunidades bentónicas que se alimentan en la cuenca (Bermúdez et al., 2021).

El Geoportal IDE dispone, en colaboración con la CHG, de información sobre las zonas de posibles vertidos en la cuenca, entre las que se incluyen EDARs, áreas agrícolas, y presiones puntuales de contaminación orgánica y química. Dicho Geoportal también identifica aquellas zonas de riesgo que requieren de una especial atención, como las marismas del Parque Natural de Doñana, o los humedales del Brazo del Este. Ambos conjuntos de información se han recopilado en la Figura 5.1.

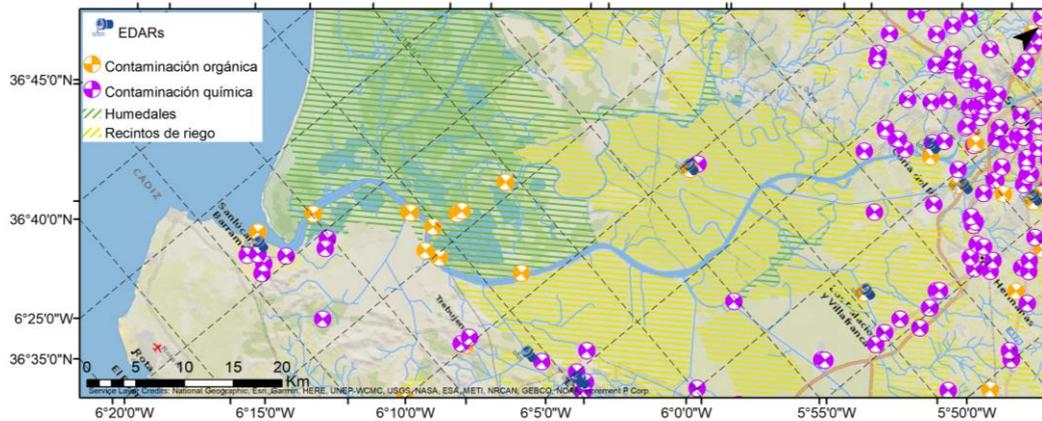


Figura 5.1 – Inventario de localizaciones de posibles vertidos ligados a las actividades antropogénicas en el Estuario del Guadalquivir. Se muestran, como zonas de potencial contaminación, las EDARs (símbolo de emisario), las fuentes puntuales de contaminación orgánica (círculos naranjas) y química (círculos morados) en la cuenca y los recintos agrícolas (sombreado amarillo). Como zonas de riesgo, se muestran los humedales de la cuenca (sombreado verde). Ver leyenda para interpretación de la simbología.

Del amplio abanico de sustancias tóxicas que pueden ser identificadas en el estuario, se hace especial mención a dos grupos de componentes por su mayor influencia en la cuenca: los metales pesados vertidos ocasionalmente en la dársena del Puerto de Sevilla y los nutrientes vertidos en las áreas agrícolas. Entre las sustancias mencionadas, se les da particular importancia a las primeras, dado que son las que presentan una mayor toxicidad a niveles bajos. No se ha de restar importancia, sin embargo, a las otras contribuciones citadas anteriormente, que serán motivo de simulaciones más detalladas en las próximas tareas del proyecto.

5.2.- Modelo de dispersión de contaminantes

Como ya ha sido mencionado en informes previos, el modelo DELFT3D dispone de una gran variedad de herramientas que permiten estudiar el estuario desde diversos enfoques. Entre ellos, se incluye la opción de estudiar la dispersión de trazadores, bien considerados como sustancias conservativas, es decir, aquellas que no reaccionan químicamente, advectadas en su totalidad por las corrientes, o bien considerados como sustancias reactivas, que, en cambio, sí pueden experimentar interacciones con el medio, entre las que se incluye la adsorción, precipitación, disolución y diversas reacciones químicas. Un ejemplo del primer tipo de compuestos (no reactivos) son los residuos plásticos, que presentan degradación temporal muy baja en comparación con la escala temporal manejada en las simulaciones numéricas (Chamas et al., 2020). Entre el segundo tipo de compuestos (reactivos) se incluyen los metales pesados, por su elevada capacidad de adsorción en el medio bentónico, y los nutrientes (nitrógeno, fósforo), por su capacidad de reaccionar químicamente entre sí, y con otros compuestos.

Dentro de la amplia variedad de parámetros que se pueden configurar en el módulo de dispersión de trazadores, se incluye la posibilidad de introducir una o diversas concentraciones de contaminante, así como especificar la ratio de decaimiento, la densidad, el coeficiente de dispersión, y el coeficiente de adsorción de cada contaminante, entre otros.

En este capítulo, se presenta una configuración preliminar del modelo de dispersión, considerando diversas concentraciones del mismo trazador virtual, vertido en varias zonas, y se muestran los resultados preliminares de los experimentos de dispersión de trazadores. Para cada caso, se indica una breve motivación de la elección de la zona y los resultados en términos de comportamiento del trazador, distancia alcanzada y tiempo de permanencia.

5.3.- Vertido de trazadores en la Antecclusa del Puerto de Sevilla

En junio de 2021, la UTE McValnera-Sener-Tecnoambiente (2021) presentó, en el documento ‘Fase 3: Documento de Inicio’ del presente proyecto, una caracterización de los sedimentos extraídos en la dársena interior del Puerto de Sevilla, en la que identificaron concentraciones significativas de diversos metales pesados. Entre ellos mencionan: mercurio (Hg), plomo (Pb), zinc (Zn) y otros compuestos organoclorados como tributilo de estaño (TBT), bifenilos policlorados (PCB) y derivados. De todos los elementos detectados, el tributilo de estaño (TBT) es generalmente uno de los compuestos organoestánicos más comunes en las zonas portuarias o de elevado tráfico marítimo, dado su uso como biocida en las pinturas anti-fouling hasta su prohibición en el año 2003 (Rodríguez et al., 2008). De acuerdo con los autores citados, el TBT es, además, un compuesto que presenta un tiempo de degradación muy elevado cuando se encuentra adherido a las partículas de pintura, por lo que la detección de esta sustancia en el sedimento de la dársena del Puerto de Sevilla no es insólita.

En el documento citado, se categorizan las concentraciones de los metales detectados como ‘Nivel de Acción B’ en base a la clasificación general del material dragado aprobada por la Comisión Interministerial de Estrategias Marinas en 2014 (Capítulo V – Art. 22, Directrices para la caracterización del material dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo-terrestre). De acuerdo con esta clasificación, el nivel de acción A ‘representa el umbral de concentraciones por debajo del cual se puede considerar el compuesto como carente de efectos biológicos significativos’, mientras que las concentraciones comprendidas entre los niveles de acción B y C, entre los que se encuentran los contaminantes identificados en la dársena, ‘representan el rango en el que existe incertidumbre sobre los posibles efectos sobre la biota, para cuya resolución se deben realizar bioensayos en laboratorio’. Se asume, por tanto, que es importante prestar atención a los metales pesados detectados en el Puerto de Sevilla.

De acuerdo con la última revisión sobre la clasificación general mencionada, los umbrales de concentración de los metales pesados según los niveles de acción son los siguientes (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 – Comparación de las concentraciones de contaminante en mg/kg, y su conversión a kg/m³, según los niveles de acción establecidos por la Directriz de Caracterización del Material Dragado (Comisión Interministerial de Estrategias Marinas, 2017). Dado que los datos de referencia que se han considerado son los obtenidos por las mediciones de la UTE en la dársena, en la tabla se especifican únicamente los umbrales de aquellos metales detectados en esta área, obviando las concentraciones de otros metales pesados no mencionados en el Documento de Fase 3, como cobre, zinc, cromo, níquel, arsénico y PAHs (hidrocarburos aromáticos policíclicos). La última fila muestra un sumatorio de los umbrales de concentración de los 5 compuestos presentados.

Parámetro	Niveles de acción					
	A		B		C	
	mg/kg	kg/m ³	mg/kg	kg/m ³	mg/kg	kg/m ³
Hg	0.35	3.5·10 ⁻⁴	0.71	7.1·10 ⁻⁴	2.84	2.84·10 ⁻³
Pb	80	0.08	218	0.218	600	0.6
Zn	205	0.205	410	0.410	1640	1.64
TBT	0.05	5·10 ⁻⁵	0.2	2·10 ⁻⁴	1	1·10 ⁻³
PCB	0.05	5·10 ⁻⁵	0.18	1.8·10 ⁻⁴	0.54	5.4·10 ⁻⁴
Σ	285.45	0.28545	629.09	0.62909	2244.38	2.54438

Se entiende, por tanto, que las concentraciones de los compuestos que se encuentren por debajo del orden de magnitud de 10⁻⁵ kg/m³ pueden ser consideradas como carentes de efectos ambientales y, por tanto, despreciables.

Con el objetivo de aplicar el modelo hidrodinámico del Guadalquivir como una herramienta de evaluación de impacto ambiental, se han estudiado los patrones de dispersión de trazadores liberados numéricamente en el tramo de la Antescclusa del Puerto de Sevilla con distintos valores de concentración sintetizados. La zona de la Antescclusa hace referencia al brazo del río que conecta el estuario con la Nueva Esclusa del Puerto de Sevilla. Se han realizado tres conjuntos de experimentos: el primero tiene por objetivo analizar el comportamiento de los trazadores vertidos numéricamente a la Antescclusa con concentraciones bajas ($0.1, 0.5, 1 \text{ kg/m}^3$); el segundo analiza el comportamiento del mismo trazador liberado con concentraciones medias ($5 \text{ y } 50 \text{ kg/m}^3$); y el tercero simula sintéticamente posibles vertidos accidentales extremos, con concentraciones de contaminante muy elevadas ($100 \text{ y } 1000 \text{ kg/m}^3$).

En los tres conjuntos de experimentos, el contaminante ha sido liberado con condiciones de vaciante en marea viva, cuando las corrientes son intensas hacia la desembocadura, y los tiempos de traspaso son cortos (ver nota técnica “Cálculo de traspasos en la vía navegable”, GOFIMA 2019).

Dado que las fluctuaciones más relevantes de la lámina de agua en el estuario del Guadalquivir son las originadas por la onda de marea, se ha previsto ejecutar nuevas simulaciones de dispersión de contaminante en distintas condiciones de marea, no solamente asociadas al ciclo quincenal (marea viva-muerta), sino también asociadas a la fase de marea (pleamar, bajamar, llenante, vaciante). El estudio de dispersión bajo las diferentes condiciones de marea se realizará en las próximas tareas del proyecto.

La Figura 5.2 muestra una serie de fotogramas de la evolución espacio-temporal del contaminante ficticio liberado uniformemente en la Antescclusa con una concentración inicial de 1 kg/m^3 .

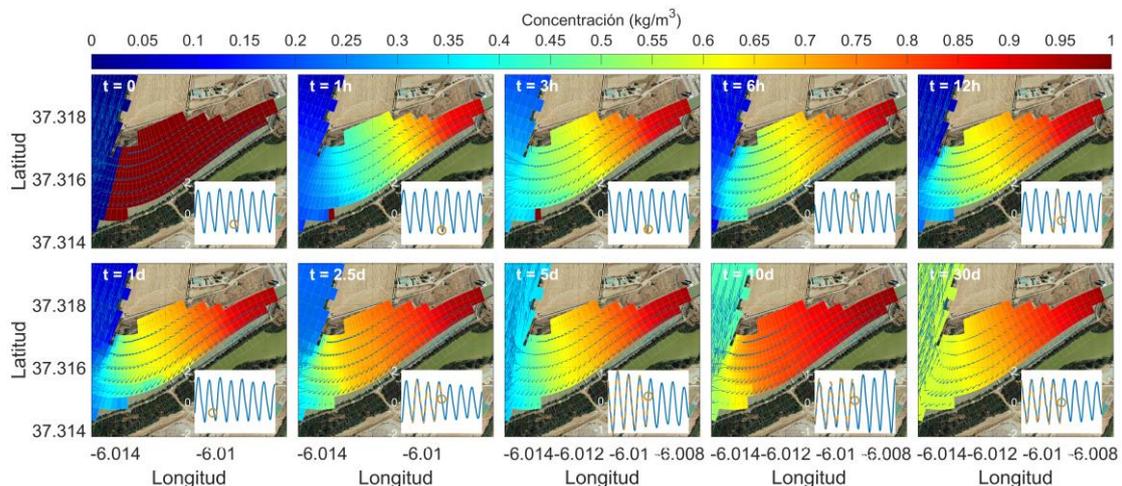


Figura 5.2 – Panel de fotogramas que muestra la evolución temporal de la concentración de contaminante liberado en el tramo de la Antescclusa con valor inicial de 1 kg/m^3 , sobre el campo de velocidades (vectores azules), en los instantes siguientes a la liberación: [1, 3, 6 y 12 horas] (fila superior), [1, 2.5, 5, 10 y 30 días] (fila inferior). En el inset de cada fotograma, se muestra la serie temporal del nivel del río (línea azul) extraída por el modelo numérico en el nodo más cercano al mareógrafo de la Esclusa. El punto marrón corresponde con el momento actual de visualización del mapa.

La evolución de fotogramas mostrados en la Figura 5.2 facilita la interpretación del comportamiento del contaminante y permite entenderlo como trazador advectivo-dispersivo, en lugar de como partícula pasiva flotante. Al igual que en el caso de salinidad o temperatura, la variabilidad espacio-temporal de la **concentración de contaminante está altamente correlacionada con la velocidad de la corriente, y particularmente con su componente**

longitudinal, que es el principal vector de advección horizontal. El campo de velocidades, más intenso en el canal de navegación (ver vectores de velocidad en la Figura 5.2), hace que el contaminante liberado tienda a dispersarse más en esta zona, acumulándose en aquellas áreas donde las velocidades son más bajas (la Antesclusa, en este caso), con una concentración notable de contaminante hasta 30 días después de la liberación. Aparentemente, **el contaminante muestra una acumulación mayor cuanto más tiempo ha transcurrido desde la liberación inicial.** Este comportamiento acumulativo motiva estudios futuros más detallados sobre los tiempos de renovación y ventilación de agua en la zona de la Antesclusa, que se llevarán a cabo en las próximas tareas del proyecto.

La serie temporal de los contaminantes liberados con distintas concentraciones (Figura 5.3) y extraídos cerca de la conexión del canal con el cauce principal (punto blanco en la Figura 5.3), muestra que el decaimiento de la concentración es de tipo exponencial. La ampliación de la primera parte de la serie temporal (Figura 5.3a), muestra que el decaimiento más importante ocurre en las primeras 6 horas tras la liberación, a causa de la rápida advección por la corriente longitudinal. Sorprendentemente, los contaminantes liberados con concentraciones bajas ($<5 \text{ kg/m}^3$), tras la disminución inicial, convergen asintóticamente hacia un único valor base de 0.1 kg/m^3 en un lapso de tiempo de aproximadamente 10 días. El comportamiento observado en las concentraciones bajas se estudiará con más detalle en las tareas próximas.

La ampliación realizada sobre la segunda parte de la serie temporal (se considera únicamente la concentración de 1000 kg/m^3 por facilidad de visualización - Figura 5.3b) revela que **la concentración de contaminante disminuye asintóticamente hasta aproximadamente el día 13 tras la liberación, pero que lo hace fluctuando de manera armónica, bajo el efecto del forzamiento mareal y con la modulación típica de amplitudes del ciclo marea viva-muerta.** De nuevo, los resultados preliminares plantean la motivación de realizar experimentos de sensibilidad próximos con condiciones de marea diferentes (por ejemplo, fase llenante vs. vaciante en condiciones de marea viva vs. muerta).

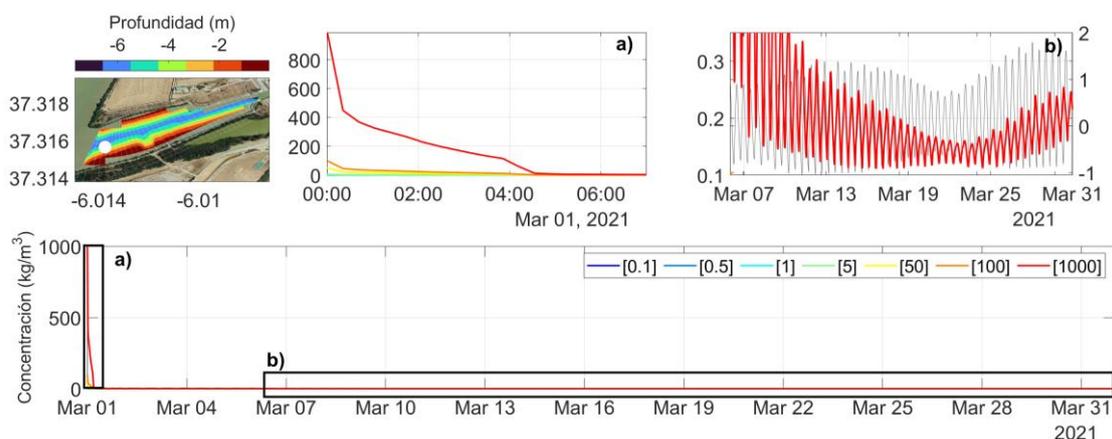


Figura 5.3 – Panel inferior: evolución temporal de las concentraciones de los contaminantes (kg/m^3) liberados en la zona de Antesclusa, extraída en un punto del dominio cercano a su salida (ver localización del punto de observación en el mapa batimétrico). Recuadro (a) (panel superior izquierda): zoom de la serie temporal de la concentración de los contaminantes en las primeras 7 horas tras la liberación. Recuadro (b) (panel superior derecha): zoom de la serie temporal del contaminante de 1000 kg/m^3 en el intervalo de 7 a 30 días después de la liberación, superpuesta a la serie de nivel del río en el nodo más cercano al mareógrafo de la Esclusa.

Por otro lado, como también es de esperar, el perfil longitudinal de la concentración de los contaminantes muestra una disminución progresiva, encontrándose el valor máximo en las inmediaciones de la zona de liberación (PK 80), y el valor mínimo en la desembocadura (Figura

5.4). Naturalmente, cuanto más elevado es el valor inicial de contaminante, mayor es la concentración que se alcanza en la parte baja del estuario. Es importante remarcar que **el contaminante ficticio alcanza las inmediaciones de la desembocadura en todos los experimentos con concentración inicial $>50 \text{ kg/m}^3$, si bien lo hace en concentraciones bajas** (el contaminante liberado inicialmente con una concentración de 1000 kg/m^3 , alcanza la desembocadura con una concentración de $1 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$). Los contaminantes liberados inicialmente con una concentración inferior a 5 kg/m^3 , en cambio, alcanzan el umbral de $1 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ en el PK20.

Este resultado preliminar, pendiente de elaborar en mayor detalle en las tareas del proyecto próximas, sugiere que los contaminantes vertidos puntualmente en la zona de la Antesclosa, posiblemente ocasionados por la industria portuaria, podrían llegar a generar un impacto ambiental en toda la extensión del estuario.

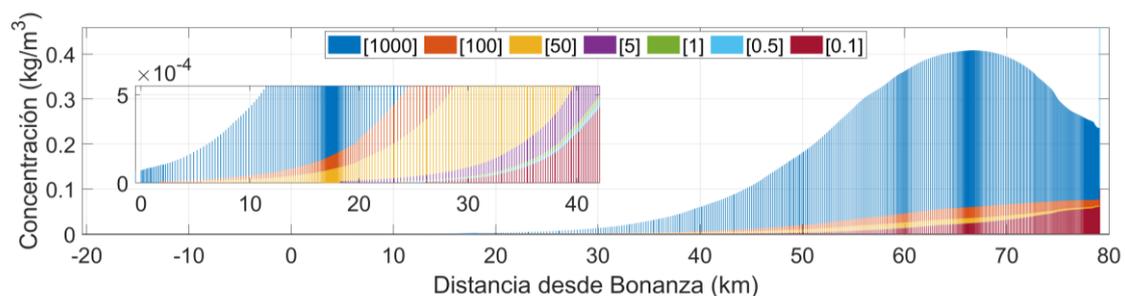


Figura 5.4 – Concentración de los contaminantes (kg/m^3) a lo largo del estuario. Se muestran únicamente aquellos valores de concentración que superan el umbral de referencia de $1 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^3$.

5.4.- Vertido de trazadores en la EDAR de Sanlúcar de Barrameda

De acuerdo a la Declaración Anual de Vertidos del Ayuntamiento de Sanlúcar, la EDAR de Sanlúcar vertió, durante el año 2020, aproximadamente 160.000 m^3 de agua sin recibir el tratamiento biológico correspondiente. Acompañados a los episodios de vertido, particularmente ocurridos durante eventos de intensas lluvias, se documentó en varias ocasiones la presencia de sólidos superficiales (tanto orgánicos como inorgánicos), en el litoral de la desembocadura, obligando a cerrar el acceso temporal a diversas playas de la zona (Ecologistas en Acción, 2020a, 2020b). Estos episodios de vertido fueron documentados de nuevo en el año 2021 (Ecologistas en Acción, 2021a, 2021b). Por otro lado, el Documento Fase 3 del presente proyecto (UTE McValnera-Sener-Tecnoambiente, 2021), también menciona la presencia de concentraciones bajas de contaminación fecal en el tramo bajo del estuario, corroborando la existencia de vertidos de aguas fecales en esta zona, especialmente en el tramo de Salinas, donde existe una mayor cercanía a los puntos de vertido (ver localizaciones de los vertidos en la Figura 5.1).

Con el fin de determinar los patrones de dispersión de los contaminantes vertidos en las inmediaciones desembocadura y, así, evaluar el impacto que han podido ocasionar dichos compuestos en el estuario, la segunda prueba con el módulo de dispersión ha consistido en el vertido ficticio de diversos trazadores superficiales en los nodos del dominio del modelo más cercanos al aliviadero de la EDAR de Sanlúcar. La concentración inicial definida para la dispersión de trazadores es de 10 kg/m^3 . La Figura 5.5 muestra la evolución temporal de dicho contaminante en las inmediaciones de la desembocadura, donde éste es liberado. Debido a que la variabilidad de la concentración del contaminante en este caso abarca varios órdenes de

magnitud, se ha optado por mostrar los mapas de color en escala logarítmica (ver interpretación en el pie de la Figura 5.5).

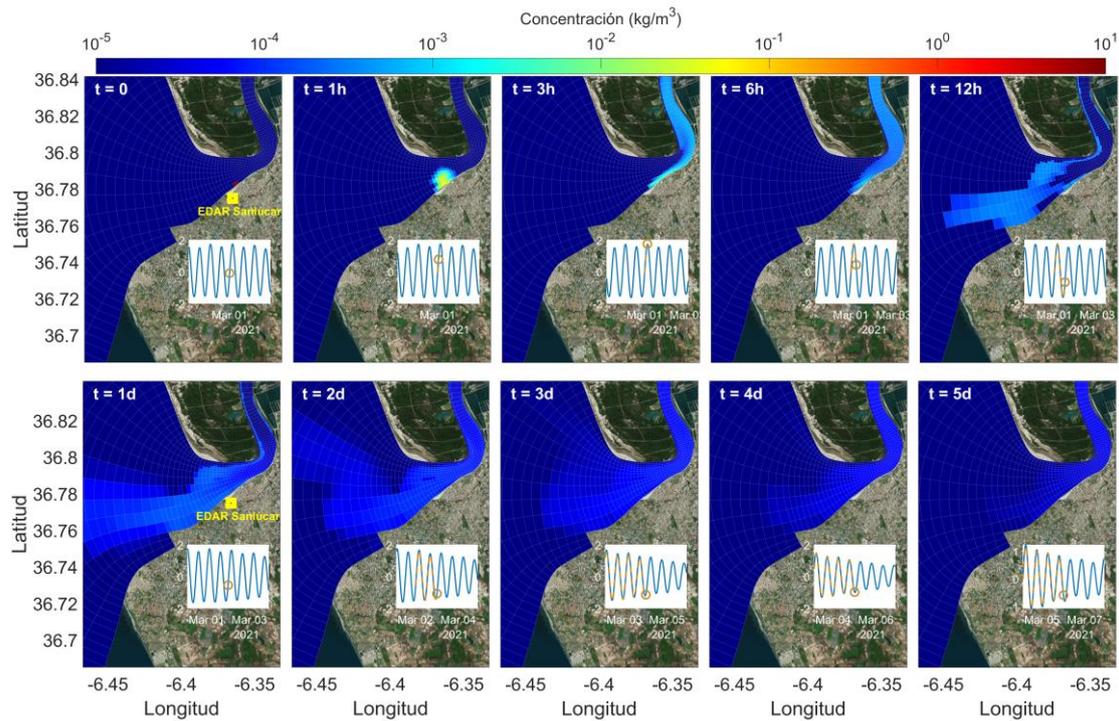


Figura 5.5 – Panel de fotografías que muestra la evolución temporal de la concentración de contaminante liberado en las inmediaciones del aliviadero de la EDAR de Sanlúcar con una concentración inicial de 10 kg/m^3 , en los instantes siguientes a su liberación: [1, 3, 6 y 12 horas] (fila superior), [1, 2, 3, 4 y 5 días] (fila inferior). En el recuadro de cada fotografía, se muestra la serie temporal del nivel del río (línea azul) extraída por el modelo numérico en el nodo del dominio más cercano al mareógrafo de la Esclusa. El punto marrón corresponde con el momento actual de visualización del mapa.

La alta exposición del contaminante a la hidrodinámica del océano abierto y el mayor volumen de agua en la región donde éste es liberado, hace que la dispersión del trazador sea también más elevada con respecto al contaminante liberado en la Antescclusa (ver Figura 5.2).

El comportamiento del contaminante sigue el patrón esperado. **Dado el sentido de propagación de la onda de marea hacia el interior del estuario, el contaminante liberado es advechado en la misma dirección, propagándose aguas arriba poco tiempo después de su liberación inicial. Poco más de cinco días después tras la liberación inicial, el contaminante comienza a detectarse en concentraciones bajas en la Antescclusa** (ver Figura 5.6). Alrededor de 15 días después, el contaminante se estabiliza en la misma región con concentraciones relativamente elevadas (0.1 kg/m^3) con respecto al valor introducido inicialmente. Es importante remarcar que el contaminante, liberado inicialmente en la desembocadura, llega a alcanzar los umbrales establecidos para los metales pesados (Tabla 5.1) a una distancia de $\sim 80 \text{ km}$ aguas arriba.

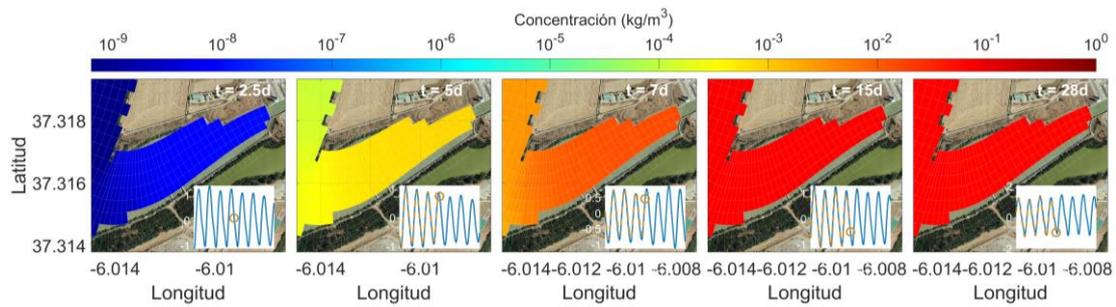


Figura 5.6 – Evolución temporal de la concentración de contaminante liberado en la cercanía al aliviadero del EDAR de Sanlúcar y observado en la Antesclusa 5 días ($t = 5d$), 7 días ($t = 7d$), 15 días ($t = 15d$) y 1 mes ($t = 28$ días) después.

5.5.- Conclusiones y planteamiento de futuros estudios

En este capítulo se presentan ejemplos de primeras aplicaciones del modelo DELFT3D a la dispersión de contaminantes, con el fin de proporcionar una evaluación preliminar del impacto ambiental que pueden originar estos compuestos en el estuario. En su configuración preliminar, los contaminantes se han considerado en concepto de ‘trazador advectivo-dispersivo’, usando distintos valores de concentración sin contar con la advección vertical. Por el momento, no se han considerado interacciones bioquímicas con el medio, como procesos de precipitación y adsorción en el medio bentónico.

En base a la revisión sobre las zonas más afectadas por contaminación orgánica y química, se han seleccionado dos zonas para la liberación de contaminantes: la Antesclusa y la Estación Depuradora de Sanlúcar de Barrameda. En la Antesclusa, se han llevado a cabo tres conjuntos de experimentos, con valores concentración bajos (0.1 , 0.5 y 1 kg/m^3), medios (5 y 50 kg/m^3) y elevados (100 y 1000 kg/m^3). En la estación depuradora, se ha llevado a cabo una única liberación de un contaminante con concentración de 10 kg/m^3 .

Los resultados preliminares muestran que la variabilidad del contaminante es causada por las oscilaciones de la marea y la corriente. En el caso de los contaminantes liberados en la Antesclusa con concentraciones elevadas, se observa una clara tendencia de disminución gradual, estableciéndose en un valor base de 0.1 kg/m^3 . En el caso de las concentraciones inferiores a 5 kg/m^3 , se observa una disminución gradual seguida de un aumento y estabilización en torno al mismo valor. En los casos de liberación en la Antesclusa con concentraciones iniciales superiores a 50 kg/m^3 , los contaminantes alcanzan la desembocadura, motivando un estudio exhaustivo del impacto ambiental en todo el estuario.

Los contaminantes liberados en la EDAR de Sanlúcar muestran un rango de variabilidad espacial considerablemente mayor por la elevada dinámica existente en la zona en la que son liberados, evidenciando un claro patrón de propagación hacia el interior del estuario.

En el informe próximo se plantea la ampliación de los experimentos considerando, por un lado, los parámetros bioquímicos necesarios (coeficiente de dispersión, adsorción, precipitación) y, por otro, la especificación de una densidad variable del contaminante dependiendo de su origen. También se plantea la posibilidad de llevar a cabo un análisis de sensibilidad de la variación de la concentración de contaminante en función de las distintas condiciones de marea.

6. Forzamientos necesarios para el modelo operacional. Estudios preliminares

6.1.- Consideraciones previas

En sentido amplio, un modelo (o más bien, módulo) operacional tiene como objetivo predecir con la mayor precisión posible el comportamiento de un sistema sometido a diversos forzamientos externos. En el caso del estuario del Guadalquivir, el forzamiento más importante con diferencia es la marea astronómica, que tiene un horizonte de predicción que sólo depende de las alteraciones morfodinámicas importantes que pueda sufrir el cauce. Predicciones más finas del estado del sistema han de incluir otros forzamientos menores, principalmente el meteorológico y las descargas de agua dulce. El horizonte de predicción de los efectos que producen en el estuario es de muy pocos días, pues ha de coincidir con el que tienen las predicciones meteorológicas que produce la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y las descargas reguladas de agua dulce al estuario en diversos puntos de la cabecera (principalmente la presa de Alcalá del Río), controladas por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG).

Los distintos modelos operacionales que están actualmente funcionando en nuestro país trabajan con horizontes temporales de 72 horas en cuanto a la predicción meteorológica, por ser esta la ventana temporal de los modelos que usa la AEMET (HARMONIE; Bengtsson et al., 2017). Éste será también el horizonte temporal del modelo operacional del estuario. En muchos entornos donde funcionan estos modelos no ha lugar las descargas de agua dulce. En el caso del estuario del Guadalquivir, sí son necesarias. La política de gestión de estas descargas es complicada porque, además de las acciones a seguir forzadas por los regímenes de precipitación o eventos extremos, la mayor parte del tiempo obedecen a intereses sectoriales para cubrir una serie de necesidades. Por ello no hay una metodología científica detrás de las predicciones de descargas de agua, como sí la hay en la de las predicciones meteorológicas, las cuales se producen sistemática y continuamente cada día a partir de modelos elaborados de circulación general de la atmósfera. El tratamiento de una y otra ha de ser obligadamente diferente en el modelo operacional del estuario.

6.2.- El esquema operacional a implementar

El módulo operacional funcionará haciendo predicciones diarias para los siguientes tres días (horizonte temporal de la AEMET). El elemento fundamental del módulo es el modelo hidrodinámico del estuario, que ya lleva tiempo siendo usado por la APS como herramienta para la gestión de la navegación por el estuario. Hasta la fecha, el modelo ha trabajado en modo predictivo usando exclusivamente el forzamiento astronómico. Dado que es el que rige la dinámica estuarina en un muy alto porcentaje, sus predicciones son fiables, útiles y en muchas ocasiones suficientes para realizar esa gestión. Además, dado el gran horizonte temporal de esta predicción, el modelo proporciona predicciones anuales, que son las que está usando la APS. Recientemente y en el marco del proyecto AIRIS-II se ha implementado una estrategia off-line que facilita una corrección meteorológica (marea meteorológica) a la predicción astronómica, remedando en cierta medida un módulo operacional (GOFIMA, 2020d), pero sin llegar a serlo (el módulo operacional incorpora la marea meteorológica on-line en el modelo).

El módulo operacional incluye desde el primer momento todos los forzamientos que tienen relevancia en la salida final del modelo hidrodinámico. Para su correcto funcionamiento, los valores predichos de todos los forzamientos (en el horizonte temporal de 72 horas) deben

estar disponibles con periodicidad diaria en el momento en el que el módulo operacional vaya a ser ejecutado. Estos forzamientos son:

- Marea astronómica (en el contorno lateral oceánico)
- Marea meteorológica (en el contorno lateral oceánico)
- Forzamiento atmosférico en superficie (en la superficie libre)
- Prescripción propiedades hidrológicas (en todos los contornos laterales)
- Descargas de agua dulce (en los contornos interiores – presas)

Sobre los mecanismos físicos, efectos que producen y forma de acceder e incorporarlos al modelo se habla a continuación.

6.2.1.- Forzamiento astronómico

Es el recurrentemente empleado y bien conocido. No requiere apoyo institucional y/o fuentes de información externa puesto que se impone como condición de contorno en el límite del dominio abierto al océano. **Emplea constantes armónicas de las principales constituyentes de marea (un total de 27), todas ellas conocidas, para reproducir la oscilación mareal en el contorno y no requiere información externa.**

6.2.2.- Marea meteorológica

Tanto la presión atmosférica como los vientos interaccionando con la topografía (costa) producen fluctuaciones de la superficie libre del mar que, globalmente, se conoce como marea meteorológica.

Respecto a la presión, el mecanismo físico es simple: una alta presión atmosférica produce un hundimiento de la superficie del mar en la proporción 1 cm/mb, el llamado factor barométrico. Sin embargo, el tamaño del dominio sobre el que actúa la presión es determinante. Si es pequeño frente a las dimensiones de los sistemas atmosféricos, todo el dominio sentirá la misma presión atmosférica, intentará disminuir el nivel en respuesta a ella, para lo cual o evacúa agua por algún punto o la “mueve” de un sitio del dominio donde la presión sea alta a otro donde sea baja, lo cual no es posible si el dominio está sometido a idéntica presión. Por ello, en dominios pequeños, la presión atmosférica no tiene efecto directo sobre el nivel. Tal es el caso del Guadalquivir. Pero sí hay un efecto indirecto. En dominios mayores (escala oceánica, por ejemplo) ocurre el segundo ajuste: el océano se hunde donde hay altas presiones y se eleva donde sean bajas, verificándose así el ajuste barométrico. Este ajuste afecta a la zona de la desembocadura e influye en la dinámica del Guadalquivir a través del contorno abierto.

Añadido al efecto de la presión está el de arrastre del viento, que actúa tanto a nivel local (un viento actuando sobre la superficie de un dominio, independientemente del tamaño que tenga, acumula agua a sotavento desplazándola de barlovento), como a gran escala. En ésta, la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis) cambia el anterior esquema, haciendo que el agua se acumule a la derecha del sentido en que sopla el viento (hemisferio norte). En el caso del Guadalquivir hay que considerar ambos efectos. El arrastre local y el que es importado desde el océano a través de la desembocadura.

Con respecto a este último, el efecto se añade al que origina la presión atmosférica y **ambos dan lugar a la llamada marea meteorológica**. Esta contribución conjunta se analiza con modelos globales (o regionales de gran escala espacial) de interacción océano atmósfera, como es el caso del modelo de predicción barotrópico NIVMAR, ejecutado en modo operacional por

Puertos del Estado (Álvarez Fanjul et al., 2001). **Las salidas de este modelo son las que se incorporarán en el módulo operacional del Guadalquivir para incluir la marea meteorológica.** Las salidas son accesibles y, de hecho, ya han sido utilizadas en los estudios mencionados para incorporar off-line esta marea como corrección a la predicción astronómica en el ámbito del proyecto AIRIS-II.

El efecto directo de arrastre del viento sobre la superficie libre dentro de los límites del estuario se aborda en el marco del forzamiento atmosférico que se explica a continuación.

6.2.3.- Forzamiento atmosférico en superficie

Los agentes meteorológicos actúan directamente sobre el dominio a través de la superficie libre. Son forzamientos tanto mecánicos (cizalla del viento) como radiativos (flujos de calor y agua dulce – evaporación y precipitación). Los primeros alteran la altura de la superficie libre debido al efecto de arrastre del viento que tiende a acumular agua en la dirección de sotavento y a evacuarla en la de barlovento. La sinuosa y compleja morfología del estuario complica este esquema simple. El efecto directo del viento sobre la dinámica del estuario no había sido aún abordado numéricamente con el modelo, razón por la cual se ha llevado a cabo un estudio dirigido a este proceso cuyos resultados se muestran en la próxima Sección 6.3.

El forzamiento radiativo causa los familiares ciclos de calentamiento/enfriamiento de las aguas con periodicidad diurna y, sobre todo, estacional. Su efecto sobre la salinidad es menos claro ya que a estos ciclos naturales se superpone la variabilidad de la descarga de agua dulce, que es el principal agente controlador de la intrusión salina en el estuario. Al no tener un patrón temporal claro, esta descarga enmascara el muy débil efecto que los ciclos diurno y estacional tiene sobre la salinidad. Con respecto al espesor de la columna de agua, que es el objetivo central de la implantación del módulo operacional, el efecto del forzamiento radiativo es despreciable. Aun así, se incluirá en el módulo.

Ambos tipos de forzamiento **procederían del modelo de predicción atmosférica HARMONIE-AROME** (Bengtsson et al., 2017) **ejecutado rutinariamente por la AEMET** en sus predicciones meteorológicas.

6.2.4.- Prescripción propiedades hidrológicas

En los contornos laterales abiertos (desembocadura en la parte oceánica, represamientos en la parte continental), además de prescribir las condiciones dinámicas (mareas meteorológica y astronómica) debe facilitarse información sobre las propiedades hidrológicas de las aguas, su temperatura y salinidad.

En la desembocadura, estas condiciones pueden importarse **del modelo hidrodinámico de predicción IBI** (Iberian Biscay Irish, Sotillo et al., 2015) **distribuido por el sistema COPERNICUS Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)**. Este modelo facilita predicciones diarias de temperatura, salinidad y corriente barotrópica (promediada en la vertical) sin componente mareal. Dada la clara dominancia de las corrientes mareales en la desembocadura, prescribir esta última variable tiene poco sentido, y no se hará.

En los contornos laterales continentales no hay datos de temperatura provenientes de modelos (en estos contornos solamente se prescribe la temperatura porque se trata de agua dulce). La forma de incluir su variabilidad es imponiendo un ciclo estacional experimental deducido de series de temperatura del agua en los embalses que alimentan el estuario,

registradas a lo largo de varios años, si las hubiere. De no existir, se intentaría adquirir esa información por otras vías o proponer un ciclo empírico estacional que aproxime el real a partir del rango de variación de temperatura de las aguas invierno-verano esperable en la zona.

Estas condiciones hidrológicas van a tener influencia insignificante en los cambios de espesor de la columna y por ello pudiera plantearse no integrarlas en el módulo operacional si ello complicase computacionalmente su ejecución rutinaria. La razón es que el módulo, en el caso del contorno oceánico, debe alimentarse de salidas producidas por otro modelo, lo que añade complejidad al funcionamiento del conjunto. Las condiciones en los contornos interiores son más simples de imponer pues se hace con un modelo predictivo simple del ciclo estacional, cuyo horizonte temporal es tan extenso como se desee. No requiere retroalimentación de ningún modelo externo. En el contorno oceánico podría plantearse un esquema similar, menos preciso que importar la información del modelo IBI, pero mucho más fluido operacionalmente: prescribir un valor único de salinidad (no existen fluctuaciones importantes de esta variable a lo largo del año) y plantear un modelo predictivo de temperatura que incluya un ciclo estacional al estilo de lo planteado en los contornos de cabecera. En este caso, la señal estacional es sencilla de evaluar por la existencia de largas series temporales de temperatura superficial medida desde satélite.

6.2.5.- Descargas de agua dulce

Las descargas de agua dulce están reguladas mediante apertura y cierre de compuertas en las presas o embalses regulados, la de Alcalá del Río fundamentalmente. **El organismo responsable es la CGH, que pone a disposición del usuario las descargas pasadas, pero no ofrece datos sobre las previsiones de descargas,** aspecto éste imprescindible a la hora de incorporar el forzamiento en el módulo operacional.

La solución óptima sería que la CHG pudiera proporcionar predicciones realistas de caudal con el mismo horizonte temporal que los otros forzamientos (72 h) para homogeneizar todos los protocolos de alimentación del módulo operacional. Ello requeriría un sistema automatizado de información por parte de la CHG que facilitase rutinariamente esa información para incorporarla, también de forma automatizada, a las entradas del módulo operacional. Es importante tener garantías de que esto sea así porque si existen fallos o lagunas en el suministro diario de esta información, el módulo operacional romperá. En el momento en que esto se escribe, no hay constancia de que exista ese sistema automatizado ni de que se vaya a implantar en el corto plazo, de modo que hay que buscar soluciones paliativas. Se podría aplicar alguna de las siguientes:

- a) Emplear descargas constantes a lo largo del año.
- b) Emplear descargas con un ciclo anual simulado mediante un modelo regresivo utilizando datos de descargas históricas de los últimos años.
- c) Hacer uso de descargas deducidas de valores extraídos de otras presas aguas arriba.

Las alternativas a) y b) son las más simples de implementar al implicar esquemas predictivos que evitan la fuerte limitación de disponibilidad de información en el momento de ejecución del módulo. La alternativa c) es más realista y compleja. Afectaría casi exclusivamente a las descargas reguladas en la presa de Alcalá del Río que, por ser la más importante, proporcionaría un escenario realista del forzamiento. Responsables de la CHG nos han hecho saber que la presa funciona básicamente según el esquema “liberar lo que llega”. Conociendo

el caudal liberado en el embalse de Peñaflores, el inmediatamente anterior a la presa de Alcalá del Río, situado unos 100 km aguas arriba, se puede predecir el que liberará ésta un tiempo después, que coincidirá con aquél. El tiempo que tarda en llegar es de alrededor de un día, según expertos de la CHG. Esta información se puede aprovechar para elaborar un esquema predictivo con horizonte temporal de 24 horas, menos que el requerido, pero aprovechable de alguna manera.

El forzamiento debido a las descargas es el más impreciso de cuantos intervienen en el módulo operacional debido a los importantes condicionamientos antrópicos que determinan las actuaciones de control. Es sin embargo importante y debe ser incluido en el modelo de una u otra forma (no hacerlo condenaría al estuario a salinificarse). Desde el punto de vista de gestión de la navegación, objetivo principal de la implantación del módulo, descargas por encima de un valor mínimo (ecológico) siempre tienden a aumentar el espesor de la lámina de agua en el estuario, con lo que aumentan el margen de seguridad de la navegación. Cualquiera que sea la solución finalmente adoptada, se tomará la precaución de alimentar el módulo operacional con valores de caudal que se sitúen en el rango inferior del intervalo esperable, de modo que las predicciones de espesor sean una cota mínima que garanticen esa seguridad.

6.3.- Efecto de la cizalla del viento en el estuario. Casos de estudio

El objetivo de estos experimentos numéricos es doble. En primer lugar, comprobar la robustez del modelo hidrodinámico frente al forzamiento mecánico en superficie producido por la cizalla del viento y, en segundo, ver el efecto que produce el viento sobre la dinámica del estuario, fundamentalmente sobre el nivel medio y sobre la propia onda de marea. Respecto al primer objetivo, se tenía la certeza casi total de que no se iban a producir inestabilidades numéricas y que no rompería, como así se ha comprobado. Por lo tanto, esta sección se centra en el segundo de los objetivos.

Se han realizado un elevado número de experimentos. Aquí se presenta una pequeña selección de ellos, comenzando con pruebas preliminares realizadas en puntos seleccionados del estuario. En sucesivas secciones se analizan otros aspectos relevantes.

6.3.1.- Respuesta del nivel en puntos seleccionados del estuario a vientos cambiantes en dirección e intensidad. Pruebas preliminares

La primera prueba ha sido prescribir vientos de intensidad constante que se mantienen soplando en una dirección dada durante un cierto periodo de tiempo, cambiando a continuación la dirección (Figura 6.1). El criterio de direcciones es el convencional en meteorología, es decir, 0° es viento de norte, 90° levante, etc. Se recurrirá a menudo a la nomenclatura más familiar de suroestes, ponientes, etc.

La Figura 6.1 muestra los resultados de un primer experimento forzando el estuario con vientos constantes de 10 ms^{-1} que cambian de dirección cada 30 días. Se han tomado tres puntos de referencia, Bonanza, Torre y Lebrija, que se indican en el mapa superior, y se presenta en ellos la diferencia de nivel entre una situación de referencia sin viento y la producida por el viento. Con este criterio, **valores negativos significan que el viento ha producido un aumento de nivel con respecto a la situación de referencia y valores positivos lo contrario**. El panel inferior de la figura muestra los resultados obtenidos para los distintos ángulos de procedencia del viento, comenzando por 45° (noreste) e incrementando 45° la dirección cada mes. Así, y con referencia a las fechas indicadas en el eje de abscisas, el mes de noviembre de 2016 soplaban un

viento constante de 10 ms^{-1} del noreste, el de diciembre de 2016, desde 90° (levante) con esa misma intensidad, etc. En el último tramo de junio de 2017, incompleto, soplaban desde el norte.

En las tres localidades se observa un mismo patrón: con vientos de componente terrestre (direcciones entre $0^\circ < \text{ángulo} < 180^\circ$ aproximadamente, o meses de noviembre, diciembre, enero) la diferencia es positiva, indicando que estos vientos hacen disminuir el nivel en esos puntos respecto a una situación de calma. Lo contrario ocurre para vientos de componente marítima o ponientes (meses de abril, mayo y junio), cuando la diferencia es negativa, indicando que el nivel aumenta. Comparando los dos paneles inferiores (Torre y Lebrija) con el superior (Bonanza) se observa que la respuesta es mayor en el interior del estuario que en las inmediaciones de la desembocadura (sobre estos aspectos se vuelve más adelante). Una vez dentro del estuario, las diferencias son bastante menores (comparar Torre y Lebrija).

Es interesante y satisfactorio comprobar que ese es el comportamiento esperado, vientos de componente marítima tienden a introducir agua en el estuario por arrastre directo, aumentando el nivel, en tanto que vientos de componente terrestre tienden a evacuarla con la consiguiente disminución del nivel. Igualmente, interesante es comprobar que la mayor respuesta se encuentra para vientos de dirección SW o NE ($45\text{-}90^\circ$ o $225\text{-}270^\circ$), que coincide con la orientación del estuario grosso modo. Estas son precisamente las direcciones de los vientos reales dominantes, como puede verse de la rosa de vientos mostrada en la Figura 6.2.

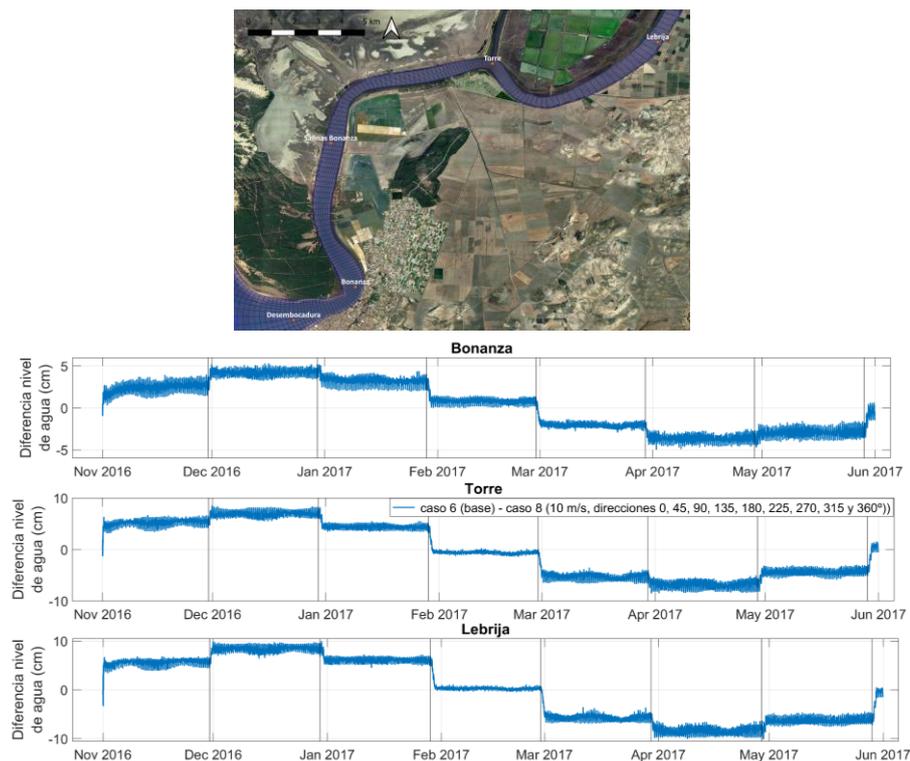


Figura 6.1 – Panel superior: mapa de la parte baja del estuario mostrando las localidades mencionadas en las gráficas inferiores. Gráficas inferiores: diferencia de nivel entre el caso base de referencia (no viento) y el de un viento constante de 10 ms^{-1} que cambia de dirección cada mes ($\text{NIVEL_BASE} - \text{NIVEL_VIENTO}$). Por ejemplo, durante noviembre-2016 el viento soplaban de 45° (noreste) para cambiar a 90° (levante) durante diciembre-2016, y luego a 135° (sureste) en enero-2017 etc. Numéricamente los cambios de dirección se han hecho con una función rampa que pasa de un régimen a otro en un tiempo de un día. Los cambios de dirección siempre ocurren aumentando 45° la dirección del mes precedente. Valores positivos indican que el viento disminuye el nivel y negativos que lo aumenta.

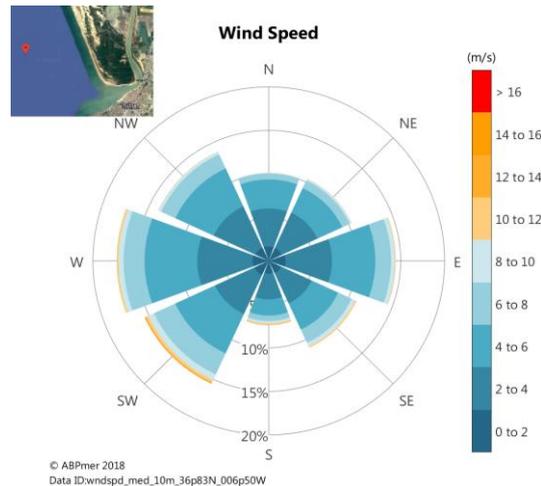


Figura 6.2 – Rosa de vientos para una posición geográfica cercana a la desembocadura del Guadalquivir, elaborada por SEASTATES a partir del modelo global NOAA_WW3.

Basándose en esta distribución de vientos se ha ejecutado una nueva prueba en la que se alternaba un viento constante de suroeste soplando durante 14 días con otro igualmente constante del este soplando el mismo tiempo. Son tres los experimentos realizados para los que se han empleado intensidades de 5, 10 y 15 ms^{-1} . La Figura 6.3 muestra cómo al aumentar la intensidad el nivel responde de manera similar, siendo más notable los cambios a medida que nos adentramos en el estuario (además de con el cambio de intensidad, naturalmente).

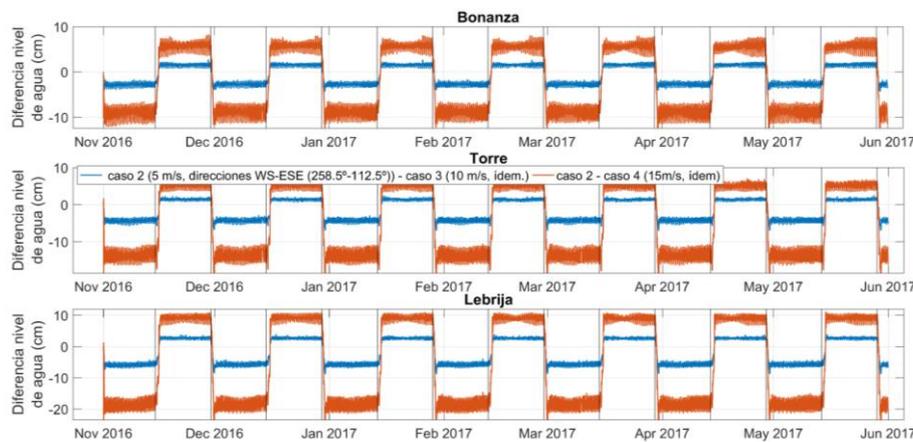


Figura 6.3 – Diferencia de nivel entre el caso base, que en esta gráfica es la situación simulada con el viento de 5ms^{-1} , el más débil de los considerados, y los experimentos con vientos de 10ms^{-1} (azul) y 15ms^{-1} (siena). Los experimentos se han hecho para varios ciclos; en cada uno de ellos, el viento comienza soplando de suroeste (SW) durante 15 días para cambiar a este (ESE) los siguientes 15 días, transitando de un régimen a otro durante 1 día. El ciclo se repite 7 veces. Valores negativos en la gráfica corresponden a suroestes e indican que, a mayor intensidad de viento, mayor aumento de nivel (de ahí el signo negativo de la diferencia), mientras que valores positivos indican lo contrario, mayor descenso de nivel a mayor intensidad (de ahí el signo positivo, pues ahora se restan dos magnitudes negativas).

Los experimentos mostrados en las Figuras 6.1 y 6.3 se corresponden con pruebas preliminares enfocadas a verificar el correcto funcionamiento del modelo y que éste soportaba periodos prolongados de simulación sin que se produjesen inestabilidades que condujesen a su rotura. De ahí el uso reiterado de ciclos con el único fin de aumentar el tiempo de simulación. También se quería comprobar la fiabilidad de las predicciones del modelo usando situaciones en las que la respuesta del estuario era fácilmente predecible. Un valor añadido de las anteriores simulaciones cíclicas es que permite estimar la rapidez de la respuesta del estuario a cambios de régimen del viento. En la transición de SW a ESE de la Figura 6.3, por ejemplo, cuya duración

prescrita es un día, los nuevos niveles en los puntos analizados se alcanzaba antes de cumplirse el segundo día del cambio, es decir, la respuesta tiene una latencia menor de 24 horas.

Una vez que ambos test han sido superados satisfactoriamente, se aborda un estudio más detallado de la influencia del viento en distintos procesos de interés. Para ello se ha trabajado con vientos provenientes de cuatro direcciones (NW, SW, NE y SE) con las tres intensidades diferentes anteriores (5, 10 y 15 ms^{-1}). El estado de referencia es siempre el de no viento y las comparaciones se hacen ahora como la **diferencia o cociente (según convenga) entre los valores obtenidos en el experimento menos los del estado de referencia. Notar que este convenio es el contrario del empleado en las Figuras 6.1 y 6.3.**

6.3.2.- Influencia del viento sobre la dinámica del estuario

Dinámicamente, el viento cambia características en el estuario que abarcan desde el nivel hasta la posible modificación de la onda de marea, pasando por las velocidades de corriente o la distribución salina. Se comentan a continuación todas ellas.

6.3.2.a.- Influencia sobre el nivel

La Figura 6.4 muestra los cambios de nivel medio para las cuatro direcciones de procedencia del viento y las tres intensidades consideradas. Se observa que vientos de componente norte tienden a hacer disminuir el nivel medio (paneles superiores), más cuánto mayor la intensidad, en tanto que vientos del sur producen el efecto contrario. Las variaciones que se observan son sensibles a la procedencia del viento, siendo las direcciones del NE y las del SW las que producen los mayores cambios, disminuyendo el nivel las primeras, aumentándolo las segundas. Esto confirma los resultados preliminares de la sección anterior.

Puede verse que las variaciones alcanzan valores de varias decenas de cm, cantidad que es importante a la hora de planificar la navegación. Los cambios más notables se detectan en la cabecera del estuario. En general rigen las reglas de que los cambios crecen monótonamente con la distancia a la desembocadura y con la intensidad del viento. Hay dos consideraciones que hacer al respecto. La primera es que, en las gráficas de la Figura 6.4, la parte navegable del estuario acaba en el kilómetro 80 aproximadamente y en ella las variaciones son más moderadas que en la cabecera. La segunda es que vientos sostenidos de 15 ms^{-1} (54 km/h) en toda la dimensión del estuario son poco realistas, por lo que las curvas correspondientes a este valor de intensidad representan más bien un límite al que raramente se llegaría. Otra situación de viento intenso, pero realista, sería el caso de 10 ms^{-1} . Así pues, intensidades de viento en el rango alto de 10-15 ms^{-1} que soplen en las direcciones para las que el estuario presenta la mayor sensibilidad (SW, NE), pueden cambiar el nivel medio en las inmediaciones de Sevilla en 20-40 cm, aumentándolo en el primer caso (SW), disminuyéndolo en el segundo (NE). Son cantidades a tener en consideración para la gestión de la navegación.

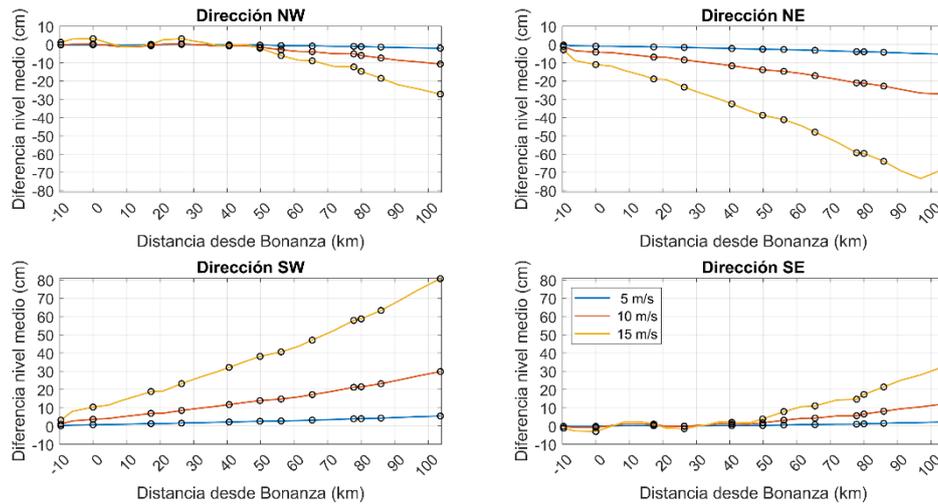


Figura 6.4 – Diferencia de nivel medio entre el experimento con viento y la situación de referencia de no viento, para las cuatro direcciones (NW, SW, NE, SE) y tres intensidades (5, 10 y 15 ms^{-1}) consideradas. Los círculos indican las localizaciones empleadas rutinariamente para calibración. Las distancias en el eje de abscisas están referidas al km 0 ubicado en Bonanza. En esa referencia kilométrica, el puerto de Sevilla se ubica alrededor del kilómetro 80.

La Figura 6.5 muestra las modificaciones que el viento produce en la dinámica mareal usando para ello el cociente de amplitudes y la diferencia de fases entre la constituyente M2 del experimento y la de la situación de referencia. La primera se mantiene alrededor de la unidad en todos los casos, con pequeñas variaciones que, en la parte navegable del estuario, apenas llegan al 3% en el caso de los vientos más intensos de 15 ms^{-1} . De nuevo son las direcciones NE y SW las que producen los mayores cambios en esa zona (paneles 2° y 4° de la columna izquierda, Figura 6.5), aumentando la amplitud mareal la primera, disminuyéndola la segunda. La caída de amplitud en la cabecera del estuario en el experimento de viento de 15 ms^{-1} del NE (PK 100 en segundo panel izquierdo, Figura 6.5) se debe a que ese viento disminuye tanto el nivel medio allí (Figura 6.4, panel superior izquierdo) que deja en seco celdas del modelo durante parte del ciclo mareal. Las fases mostradas en la columna derecha tampoco muestran cambios importantes en la zona navegable, siempre por debajo de los 2° (o 4 minutos de tiempo), que pueden alcanzar valores ligeramente superiores en la parte alta no navegable del estuario, particularmente con vientos del NE. Del análisis anterior puede deducirse que el mayor efecto del viento tiene lugar en el nivel medio, siendo despreciables los cambios que produce en la propagación mareal.

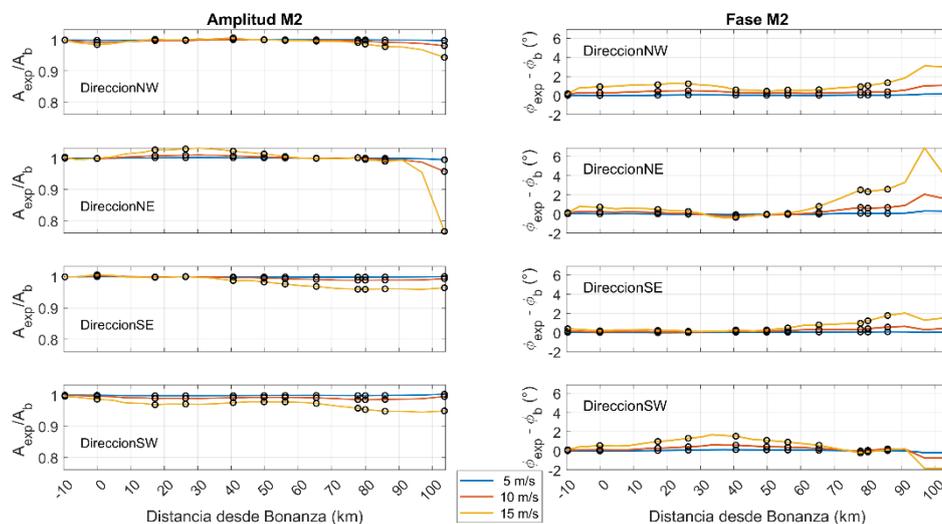


Figura 6.5 – Cociente de amplitudes (paneles izquierdos) y diferencia de fases (grados, paneles derechos) entre las constantes armónicas de la constituyente M2 en los experimentos con viento y la simulación de referencia sin viento para las cuatro direcciones (NW, SW, NE, SE) y tres intensidades (5, 10 y 15 ms^{-1}) consideradas.

6.3.2.b.- Influencia sobre las corrientes

La corriente media en el estuario no se verá afectada por vientos constantes tras alcanzar el estado estacionario, lo que ocurre rápidamente por la escasa latencia del nivel respecto al viento forzante ya comentada. Tras el transitorio, la corriente media recuperará el valor que impone la descarga en la cabecera, que tendrá que coincidir con la modelada en la situación de referencia por razones obvias de continuidad. Es lo que indica el modelo (figuras no mostradas).

El viento influirá en las corrientes mareales en la medida que lo hace sobre la oscilación mareal. La sección anterior indica que ésta cambia poco y así ocurre con la corriente asociada. La Figura 6.6 muestra que las variaciones de la corriente respecto a la situación de referencia son incluso menores que para el nivel. El cociente de amplitudes es prácticamente uno en todo el estuario excepto, de nuevo, en la parte alta no navegable. Allí, la amplitud de corriente para vientos intensos de norte (NW, NE) tiende a aumentar (paneles superiores izquierdos, Figura 6.6) y a disminuir para vientos del sur (SW, SE; paneles inferiores). Son resultados intuitivos si se piensa que los primeros tienden a dejar celdas secas en la zona de la cabecera, lo que exige evacuar agua con cierta rapidez, en tanto que los segundos la acumulan, por lo que la corriente mareal debe debilitarse.

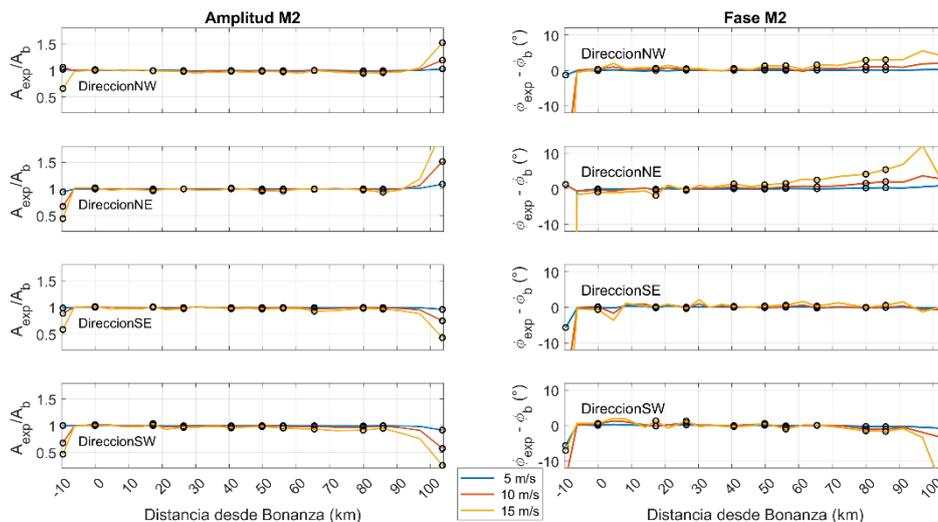


Figura 6.6 – Mismo que Figura 6.5 para la componente longitudinal de la corriente a lo largo del estuario.

6.3.2.c.- Influencia sobre la salinidad

La Figura 6.7 muestra las variaciones de salinidad superficial media en el estuario en función del viento. En la zona de la desembocadura, dominada por las condiciones oceánicas, la salinidad apenas cambia: no lo hace para vientos del norte (paneles superiores) y aumenta muy ligeramente para vientos del sur (0.5 ppt, paneles inferiores). A medida que nos adentramos en el estuario, en todos los casos la salinidad aumenta, más cuanto más intenso el viento. En el caso de vientos del SW este aumento afecta a todo el estuario, aunque los valores mayores se dan en la zona baja, alrededor y ligeramente aguas arriba de Bonanza. En el caso de vientos del NE (panel superior derecho), la salinidad aguas arriba de Bonanza disminuye. Para vientos débiles (5 ms^{-1} , líneas azules) las modificaciones de salinidad que produce son muy pequeñas

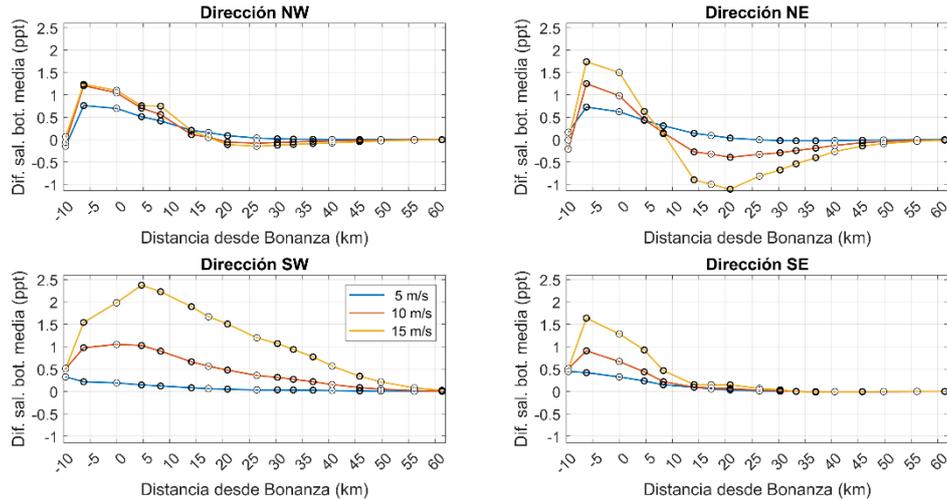


Figura 6.7 – Mismo que Figura 6.4 para la salinidad superficial media a lo largo del estuario. La diferencia de salinidad está calculada como salinidad en el experimento con viento menos salinidad en el estado de referencia.

La interpretación del comportamiento que se ve en la Figura 6.7 no es inmediata. La explicación ha de tener en cuenta factores como la estratificación débil del estuario, que se manifiesta en las ligeras diferencias de salinidad entre superficie y fondo, el *surplus* de energía mecánica generadora de turbulencia (y, por tanto, mezcla) que propicia el viento y, por supuesto su propia dirección e intensidad.

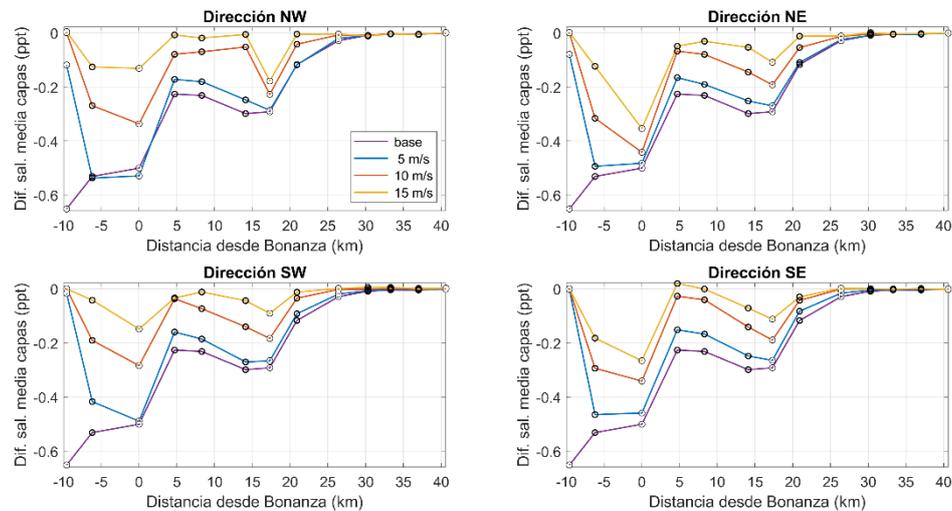


Figura 6.8 – Diferencia de salinidad superficial menos salinidad en el fondo a lo largo del estuario para los vientos considerados. Dado que la primera es menor que la segunda, la diferencia es negativa.

La Figura 6.8 muestra como la estratificación (medida como diferencia de salinidad superficie menos fondo) disminuye con el viento. Aunque el viento actúa directamente sobre la capa superficial, su efecto penetra al interior vía viscosidad turbulenta que propicia mezcla y reduce la diferencia de salinidad. Cuanto mayor el viento, mayor la turbulencia y menor la diferencia de salinidad, que es lo que indica la Figura 6.8. Desde esta perspectiva, el aumento de salinidad superficial a lo largo del estuario que se aprecia en la Figura 6.7 bajo SW (panel inferior izquierdo) es consecuencia de una mezcla turbulenta acentuada por el viento. El caso de viento del NE que disminuye la salinidad aguas arriba de Bonanza (panel superior derecho) es algo más sutil. Este viento favorece el arrastre de aguas superficiales desde la parte alta, donde son más dulces, aguas que son simultáneamente mezcladas en la columna de agua (Figura 6.8) haciendo

que toda ella sea ligeramente menos salina. En otras palabras, este viento favorece el desplazamiento del tapón salino hacia la desembocadura. No hace que el estuario globalmente se dulcifique (eso sólo puede hacerlo una mayor descarga de agua en la presa) sino que aumenta el gradiente horizontal de salinidad, acumulando agua más salina en la zona baja del estuario. De ahí el resultado poco intuitivo de que este viento también aumente la salinidad cerca de la desembocadura.

La argumentación anterior se ve refrendada por el comportamiento mareal. Como es bien sabido, la salinidad en puntos fijos del estuario cambia a lo largo del ciclo de marea, como combinación de la intensidad de corriente mareal y gradiente horizontal salino. Cuanto mayores sean ambas, mayor será la amplitud del armónico mareal de salinidad que originan. La Figura 6.9 muestra cómo cambian estos armónicos en función del viento. Respecto a la dirección NE, se aprecia un aumento de amplitud alrededor del PK10, misma zona donde la Figura 6.7 indica el mayor cambio de salinidad (mayor gradiente) y una disminución aguas arriba donde el gradiente ha disminuido. En el caso de viento del SW, la tendencia de la amplitud es a ser siempre mayor debido a que el gradiente avanza de forma bastante homogénea a lo largo del estuario.

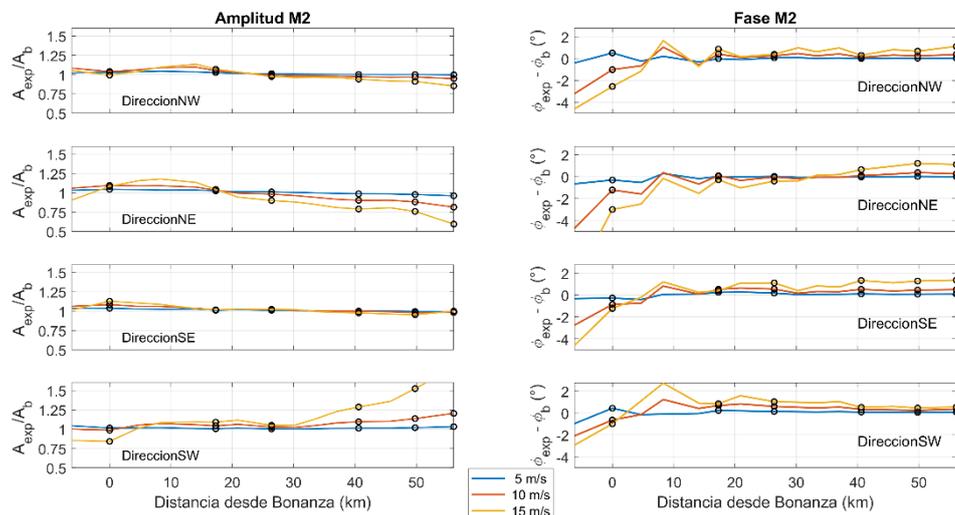


Figura 6.9 – Mismo que Figura 6.5 para la salinidad a lo largo del estuario.

6.4.- Conclusiones sobre el efecto del viento y su importancia en el modelo operacional

El análisis de los casos de estudio llevado a cabo en la sección anterior indica que el mayor efecto del viento tiene lugar en el nivel medio, apenas influye en las corrientes y deja una huella de ligero impacto en la salinidad.

Con vientos de moderados a fuertes, el nivel medio puede variar algunas decenas de cm en la parte navegable alta del estuario, cantidad relevante a la hora de gestionar la navegación. Con vientos del SW (componente marítima) sube, con los del NE (terrestres), baja. **Esta contribución solo puede incorporarse en tiempo real a las predicciones a través del módulo operacional y previa disponibilidad de predicciones meteorológicas, argumento que opera a favor de la implantación de dicho módulo.** Los cambios que causa el viento en la propagación de la onda mareal son despreciables.

Las corrientes tanto medias (que, por continuidad, vienen determinadas por las descargas de agua dulce en las cabeceras) como las mareales no se ven afectadas por el viento, con

excepción hecha de la parte alta junto a la cabecera, por las circunstancias especiales que allí se dan y que conducen al hecho de dejar secas celdas del río durante parte del ciclo mareal. En la zona navegable del estuario, los cambios son prácticamente inexistentes.

Respecto a la salinidad, y centrándonos en los vientos dominantes del SW y NE, sí se producen algunos cambios dignos de mención. Los vientos del SW tienden a suavizar el gradiente de salinidad en el estuario permitiendo que avance el tapón salino, aunque, salvo en el caso de vientos intensos poco realistas, el aumento de salinidad es una fracción de unidad (ppt). Los vientos del NE acentúan el gradiente de salinidad al disminuirla agua arriba de Bonanza y aumentarla aguas abajo. Tienden a desplazar el tapón salino hacia la desembocadura, disminuyendo localmente la salinidad en la parte media-alta del estuario en una pequeña fracción de unidad también.

Todos estos cambios solamente pueden ser predichos en el corto plazo a través del módulo operacional en desarrollo. De todos ellos, el más importante es el vinculado al nivel medio, tanto por la magnitud de la variación como por las implicaciones que tiene a la hora de optimizar la gestión de la navegación.

Referencias

- Álvarez Fanjul, E., Pérez Gómez, B., Rodríguez Sánchez Arévalo, I. (2001). Nivmar: a storm surge forecasting system for Spanish waters. *Sci. Mar.* 65, 145–154. <https://doi.org/10.3989/scimar.2001.65s1145> M4 - Citavi
- Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W., Gleeson, E., Hansen-Sass, B., Homleid, M., Hortal, M., Ivarsson, K.-I., Lenderink, G., Niemelä, S., Nielsen, K.P., Onvlee, J., Rontu, L., Samuelsson, P., Muñoz, D.S., Subias, A., Tijm, S., Toll, V., Yang, X., Køltzow, M.Ø. (2017). The HARMONIE–AROME Model Configuration in the ALADIN–HIRLAM NWP System. *Mon. Weather Rev.* 145, 1919–1935. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1>
- Bermúdez, M., Vilas, C., Quintana, R., González-Fernández, D., Cózar, A., Díez-Minguito, M. (2021). Unravelling spatio-temporal patterns of suspended microplastic concentration in the Natura 2000 Guadalquivir estuary (SW Spain): Observations and model simulations. *Marine Pollution Bulletin.* 170, 112622. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X21006561>
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, H. J., Abu-Omar, M., Scott, S. L., Suh, S. (2020). Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering Publications.* 8,9, pp. 3494 – 3511. doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>.
- Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Demarcación de Andalucía, Ceuta y Melilla. (2012). Informe sobre la situación de la depuración de las aguas residuales de la provincia de Cádiz - Analizando la población que depura sus aguas y qué núcleos disponen de EDAR.
- Contreras Arribas, E. (2012). Influencia de los aportes fluviales en la calidad del agua del estuario del Guadalquivir. PhD thesis. University of Córdoba.
- Ecologistas en Acción (2020a). *Vertidos contaminantes y ocultación de la información en las playas de Sanlúcar* - Ecologistas en Acción. [online] Available at: <https://www.ecologistasenaccion.org/149695/vertidos-contaminantes-y-ocultacion-de-la-informacion-en-las-playas-de-sanlucar/>
- Ecologistas en Acción. (2020b). *Arroyos de agua fecal inundan las playas urbanas de la localidad* - Ecologistas en Acción. [online] Available at: <https://www.ecologistasenaccion.org/154436/arroyos-de-agua-fecal-inundan-las-playas-urbanas-de-la-localidad/>
- Ecologistas en Acción. (2021a). *Bandera Negra por el fuerte incremento de los vertidos contaminantes* - Ecologistas en Acción. [online] Available at: <https://www.ecologistasenaccion.org/175469/bandera-negra-por-el-fuerte-incremento-de-los-vertidos-contaminantes/>
- Ecologistas en Acción. (2021b). *Siguen los vertidos en las playas sanluqueñas* - Ecologistas en Acción. [online] Available at: <https://www.ecologistasenaccion.org/184816/siguen-los-vertidos-en-las-playas/>
- Geoportal IDE (Infraestructura de Datos Espaciales) | CHG Guadalquivir., n.d. [online] idechg.chguadalquivir.es. Available at: <https://idechg.chguadalquivir.es/nodo/index.html>
- Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA). (2017). Oscilaciones (mareales) del nivel del Río con respecto al cero de Alicante. Autoridad Portuaria de Sevilla, 12 pp.
- Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA). (2019) Nota Técnica. Cálculo de traspasos en la vía navegable. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchro.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA). (2020a). Actividad 3 – Subtarea 3.2.0. Descripción y Estimación de la Marea Meteorológica. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchrono.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA). (2020b). Actividad 3 – Subtarea 3.2.1. Validación/ calibración del modelo numérico incluyendo los efectos de las mareas astronómica, meteorológica y descargas. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchrono.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA). (2020c). Actividad 3 – Subtarea 3.2.2. Predicción del espesor de lámina de agua en distintos puntos del estuario y para periodos de tiempo seleccionados. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchrono.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA). (2020d). Actividad 3 – Subtarea 3.3. Estudio preliminar de un modelo predictivo de la respuesta en el interior del estuario a forzamientos meteorológicos y de descargas de río. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchrono.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA). (2021). Informe nº2 Realización de estudios hidrodinámicos y ambientales en el marco del proyecto de Optimización de la Navegación en la Eurovía E.60.02 GUADALQUIVIR. Periodo 2021-2023. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto de Optimización de la Navegación en la Eurovía E.60.02 GUADALQUIVIR (“WORKING WITH NATURE”).

López-López, J. A., Mediguchía, C., García Vargas, M. and Moreno, C. (2013). Assessing pollution trends in the Guadalquivir River estuary using N-way analysis. *E3S Web of Conferences*. 1, 24005. doi: 10.1051/e3sconf/20130124005. Available at: https://www.researchgate.net/publication/259811274_Assessing_pollution_trends_in_the_Guadalquivir_River_estuary_using_N-way_analysis/

Rodríguez, J.G., Franco, J., Borja, Á, Valencia, V. (2008). Estudio de la contaminación por TBT (tributilo de estaño) en la costa vasca. Elaborado por AZTI-Tecnalia para Dirección de Aguas, Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Viceconsejería de Ordenación del Territorio y Biodiversidad, Eusko Jaurlaritz - Gobierno Vasco, 71 pp.

Sotillo, M.G., Cailleau, S., Lorente, P., Levier, B., Aznar, R., Reffray, G., Amo-Baladrón, A., Chanut, J., Benkiran, M., Alvarez-Fanjul, E., 2015. The MyOcean IBI Ocean Forecast and Reanalysis Systems: operational products and roadmap to the future Copernicus Service. *J. Oper. Oceanogr.* 8, 63–79. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1014663>

U.T.E MC Valnera, Sener Ingeniería y Sistemas, Tecnoambiente. (2021). Apoyo en la redacción del proyecto y evaluación ambiental de la optimización de la navegación en la Eurovía E.60.02 Guadalquivir - FASE 3: Documento de Inicio.

Xiao, K., Li, H., Song, D., Chen, Y., Wilson, A. M., Shanahan, M., Li, G., & Huang, Y. (2019). Field Measurements for Investigating the Dynamics of the Tidal Prism during a Spring-Neap Tidal Cycle in Jiaozhou Bay, China. *Journal of Coastal Research*, 35(2), 335–347. <https://www.jstor.org/stable/26626842>

Anexo 1. Llanuras mareales, posibles ubicaciones

Previamente a la creación de llanuras mareales se recopiló información sobre sus posibilidades de ubicación en función de los usos del suelo de toda la zona y sobre proyectos relacionados con restauración de marismas en la zona del Bajo Guadalquivir, con el objetivo de abordar su ubicación y extensión en base a criterios más o menos realistas. Dicha información es recopilada en el presente anexo.

Posibles ubicaciones de llanuras mareales

En la Figura A1.1 se observa un mapa de los usos del suelo y coberturas vegetales de la zona de interés actualizado por última vez en 2007 (Junta de Andalucía, 2007). También se nombran las principales zonas y sus figuras jurídicas de protección como espacios naturales.

En la margen derecha (aguas abajo) se encuentra el Parque Nacional de Doñana, y en base a la protección jurídica que le otorga, se considera descartable como lugar donde ubicar una llanura mareal. Sin embargo, desconocemos si esas marismas están conectadas con el estuario, cómo ocurren dichas conexiones y sus posibles implicaciones. Si se tuviera esa información sí se podría considerar su modelación. Continuando en la margen derecha, se encuentra la zona piscícola de Veta La Palma. Como ya se comentó en el Capítulo 5 del Informe 2, aunque la propia piscifactoría presente un sistema parecido a una llanura mareal, aparentemente ésta no se comporta como tal por ser un sistema controlado por canales y compuertas. Por otro lado, no sería sencillo gestionar un proyecto con los intereses de la piscifactoría, así que también queda *a-priori* descartado. Finalizando en la misma margen, se observa que, alrededor de la piscifactoría mencionada, hay dos zonas potenciales: entre esta y el estuario (Figura A1.2, zona 5), zona que se encuentra relativamente alejada de la desembocadura; y entre el Brazo de La Torre y la piscifactoría (Figura A1.2, zona 4), zona con una difícil conexión directa con el estuario considerando los datos topo-batimétricos usados con los que se ha generado la batimetría (> 6 m). Ambas siguen perteneciendo a Doñana con la denominación de Parque Natural, lo que les quitaría restricciones jurídicas. Por tanto, en la margen derecha, las zonas 4 y 5 serían las únicas posibilidades.

En la margen izquierda (aguas abajo), se encuentra la zona de Salinas y Bonanza. En esta zona hay varias explotaciones salinas que impiden la recuperación de grandes llanuras mareales y que se surten del estuario por un sistema de caños y compuertas cuyo funcionamiento se desconoce. No hay mucha información en la red sobre ellas, aunque parece que, recientemente, pasó a manos de una empresa no familiar (Alabasía) que no ha comunicado su intención de abandonar la producción (Cruz, 2020). Entre las dos salinas principales, se encuentra una potencial zona para una posible llanura mareal (Figura A1.2, zona 1). Aguas arriba existe otra potencial zona, también entre dos explotaciones salinas y dejando otra en medio (Figura A1.2, zona 2). Estas zonas, aunque baldías, seguramente sean propiedad privada, por lo que las posibilidades de una acción futura podrían verse menguadas. Por último, están las marismas de Trebujena (Figura A1.2, zona 3). Esta ubicación es la que tiene mayor potencial para considerar diversas morfologías de llanura (varios tamaños y conexiones, entre otros aspectos) y se encuentra a la misma altura que la llanura de Veta La Palma, por lo que se pueden esperar resultados similares. Además, como se comenta en la sección “Proyectos presentes y para el futuro próximo”, es una marisma que se pretende restaurar y en la que ya se ha puesto a prueba un proyecto piloto. Idealmente, las zonas 1-3 podrían ser conectadas formando un gran llano mareal con varias conexiones al estuario. Sin embargo, existen varios caños que abastecieron

los ahora abandonados esteros y que separan las tres zonas, e incluso cada zona por separado. En un futuro, estos caños pueden ir a favor (porque se creen canales de intercambio) o en detrimento (porque se creen separaciones dentro de la llanura que dificulte el intercambio, creando salinas naturales).

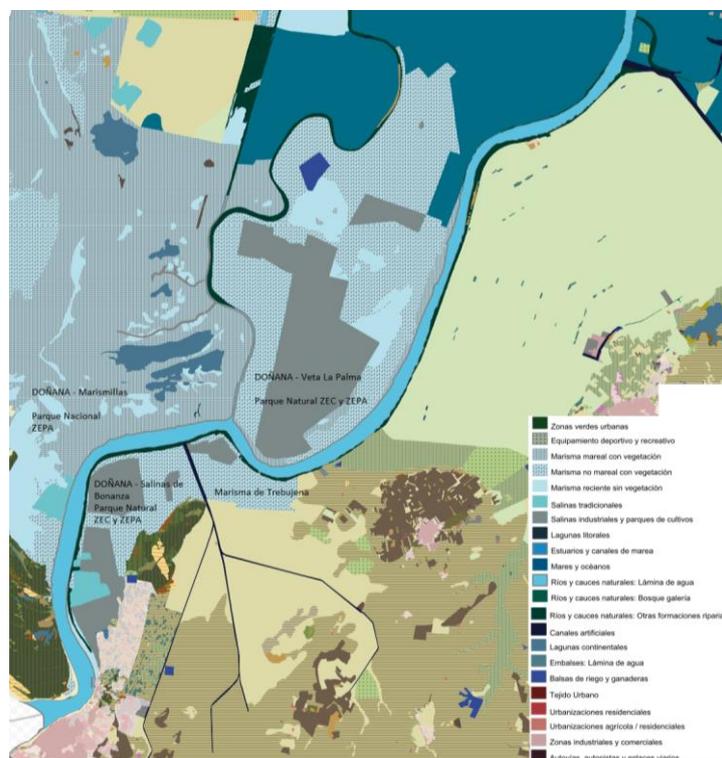


Figura A1.1 – Mapa de usos y coberturas vegetales del suelo del Bajo Guadalquivir en el año 2007 (Junta de Andalucía, 2007). También se nombran sobre el mapa las principales zonas y sus figuras jurídicas de protección como espacios naturales.



Figura A1.2 – Posibles zonas de recuperación de llanuras mareales en función de los usos del suelo y las protecciones jurídicas de parques naturales.

En la Tabla A1.1 se recopila el área máxima de las potenciales ubicaciones para las llanuras mareales mostradas en la Figura A1.2. Se muestra que los valores varían entre un mínimo de

430 ha y un máximo de 2600 ha, a lo que se suma la diferente morfología de cada zona, por lo que elaborar un método que considere diferentes capacidades escalables estaría limitado a ese valor mínimo de 430 ha. Una solución podría ser tratar cada zona independientemente, partiendo de la capacidad máxima y rebajando a $\frac{2}{3}$ y $\frac{1}{3}$ de la capacidad total.

Tabla A1.1 – Áreas máximas de las potenciales ubicaciones para llanuras mareales mostradas en la Figura A1.2 y área inundable de la llanura de Veta La Palma del Capítulo 5 del Informe 2.

Zona	1	2	3	4	5	Veta La Palma
Área (ha)	430	525	1900	2600	1000	2000

También se ha obtenido la anchura de la celda del mallado en el estuario que haría de conexión entre este y la llanura mareal (Tabla A1.2). Esta se corresponde con la longitud de la celda colindante con las diferentes zonas para la llanura y puede ser dividida entre dos (tres) si el dominio de la llanura aumenta al doble (triple) su resolución, como se describió en el Capítulo 5 del Informe 2. En la Figura A1.3 se muestra el mallado del cauce principal junto a las diferentes zonas de llanuras. Las diferencias de tamaño entre celdas se recogen en la Tabla A1.2. Estas son debidas a que el mallado tiene resolución variable en función de su cercanía con los tributarios y meandros. Por último, se añade una tabla (Tabla A1.3) de la anchura aproximada de los principales subsidiarios, de su desembocadura en el estuario y del cauce principal, para tener una idea de las unidades y poder compararlas con la anchura de la boca de la llanura.

Tabla A1.2 – Anchura de celda del estuario para la conexión entre el estuario y la llanura mareal. Se añade la llanura de Veta La Palma del Capítulo 5 del Informe 2.

Zona	1	2	3	4	5	Veta La Palma
Anchura (m)	239	203-210	260-287	230-282	75-152	224

Tabla A1.3 – Anchura aproximada de los cauces de los principales subsidiarios y de su desembocadura en el estuario. Se añade una última columna de la anchura del cauce principal en la desembocadura y en una sección a la altura de la estación de Lebrija.

Zona	Brazo Torre	Guadaira	Isleta	Esclusa	Gergal	Cauce Sec. Torre
Anchura cauce (m)	70	220	55	213	40	650
Anchura en la desembocadura (m)	204	390	290	340	112	5000

Observando las Tablas A1.2 y A1.3, se obtiene que la anchura media de la celda del estuario que conectaría este con la llanura es de 215 m. Esta podría reducirse a $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}$ o $\frac{1}{3}$, dependiendo de la resolución de la llanura. Son valores equiparables a la anchura de los diferentes subsidiarios, que dan cierto margen para crear bocas más o menos estrechas. Sin embargo, esta anchura es mucho mayor en comparación con la anchura de los canales gestionados por compuertas, que sería más realista, como se mostrará en la próxima sección.

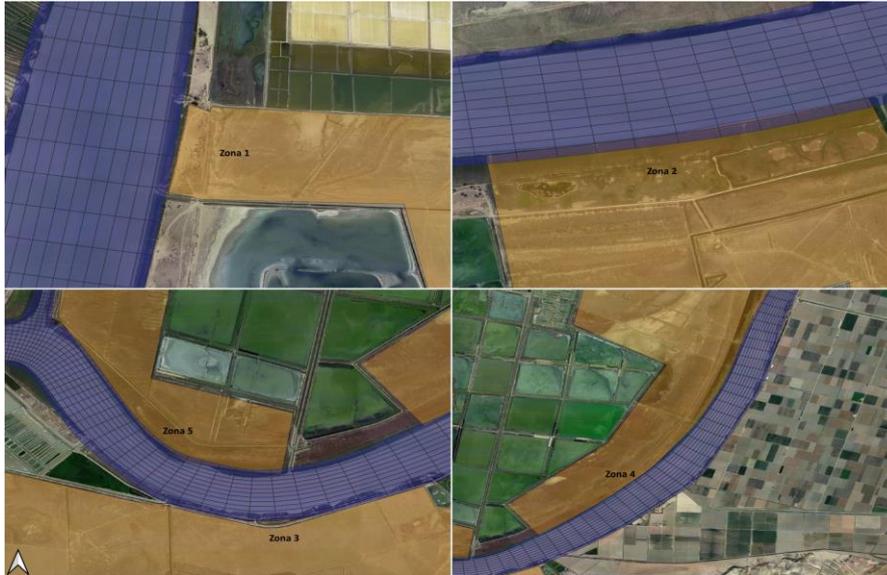


Figura A1.3 – Detalle de la unión entre las posibles zonas de ubicación de la llanura mareal y el mallado del estuario principal de las que se extraen los datos de la Tabla A1.2.

Proyectos pasados

Se ha encontrado un primer proyecto de restauración de 52 ha de llanuras mareales en las orillas de la parte baja del Estuario del Guadalquivir, empezado en el año 2000 y monitoreado hasta 2005 (Gallego-Fernández y Novo, 2007). En este, se realizó una restauración de toda la orilla izquierda (aguas abajo) y algunas zonas de las orillas cercanas a la desembocadura del Brazo de la Torre y Veta La Palma, sumando un total de 52 ha restauradas (Figura A1.4) (Tierra y Mar & Espacio Protegido Canal Sur, 2021).

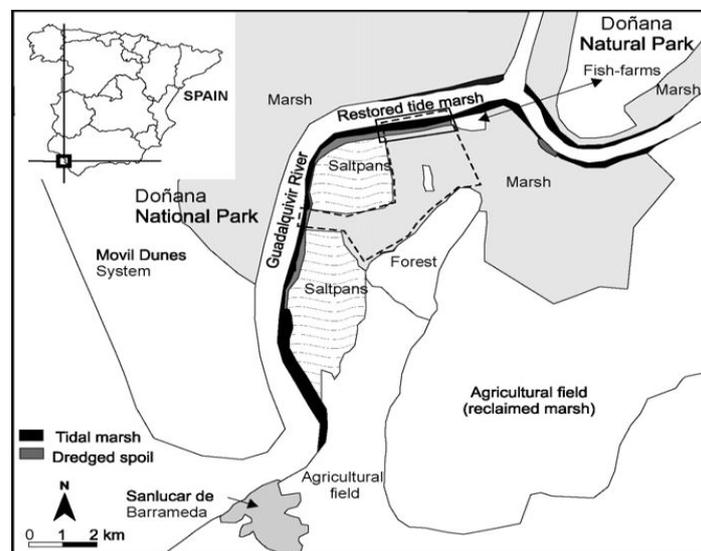


Figura A1.4 – Llanuras mareales restauradas en las orillas del estuario de Guadalquivir en el periodo 2000-2005 con una extensión total de 52 ha (Gallego-Fernández y Novo, 2007).

Este proyecto quedó plasmado en un artículo donde se muestra el diseño de las nuevas marismas y los pasos seguidos para su restauración (Gallego-Fernández y Novo, 2007). Es de especial interés la forma en la que se conectan las marismas al estuario, que se ha hecho a través de una serie de canales; y la profundidad media de las marismas, que se han diseñado con

meandros e islas (Figura A1.5). La anchura de los canales varía desde los 3 hasta los 11 m y su longitud desde los 300 hasta los 2060 m. En mareas vivas se inunda el 90 % de la marisma, mientras que en mareas muertas se inunda el 10 %, siendo el porcentaje anual de entrada de mareas mayor al 67 %. Se reportó una velocidad del flujo en los diques de 0.5-1 m/s, con un máximo de 1.13 m/s. También hay alguna información sobre la morfología y sedimentación de los canales, destacando que todos los canales (con profundidad inicial de 1.1 m) se hicieron más someros salvo en las zonas cercanas al estuario donde había gran turbulencia.

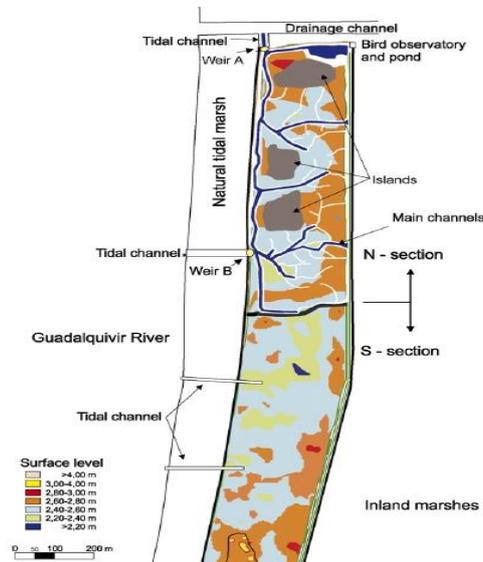


Figura A1.5 – Diseño de la restauración de llanuras mareales realizadas en el 2000 (Gallego-Fernández y Novo, 2007).

Recientemente, en 2011, la Piscícola de Trebujena (Pistrasa) llevó a cabo la restauración de las marismas del codo de la Esparraguera (Tierra y Mar & Espacio Protegido Canal Sur, 2016), como se ve en la Figura A1.6. Esta restauración no aporta mucho más a nivel técnico que la realizada en el 2000. Sin embargo, una declaración ambiental de junio del 2020 proporciona valiosa información sobre el funcionamiento de la piscifactoría: tomas de agua, vertidos, etc. (Bustillos Martínez, Romero García y Abellán Gamero, 2020), información que se tendrá en cuenta en otros objetivos del proyecto.



Figura A1.6 – Restauración de las marismas del codo de la Esparraguera realizada en 2011, antes a la izquierda y después a la derecha.

Por último, está el proyecto de WWF con Coca-Cola “Misión Posible: Desafío Guadalquivir”, en el que se han recuperado 6 ha de marismas de la zona de Trebujena, próxima al embarcadero (Figura A1.7), en los años 2019-2020 (WWF y Coca-Cola, 2021). Fue un proceso de restauración monitoreado que incluyó un año de obras para la adecuación de tierras,

creación de islas artificiales e instalación de caminos y puntos de observación. Para su llenado se empleó el agua procedente de la precipitación y de la subida de la marea. El llenado se realizó a través de canales y compuertas. A nivel ecológico, el proyecto se centró en la restauración del ecosistema, aprovechando la cercanía de una pequeña finca de producción salina para abastecer su demanda de agua a través de canales y compuertas. Al ser una marisma controlada por compuertas, no se puede considerar como llano mareal. Sin embargo, da una idea de cómo se plantean las restauraciones futuras, ya que el proyecto se desarrolló con la idea de ser escalado, como se mostrará en la siguiente sección.



Figura A1.7 – Marisma de 6 ha en la zona de Trebujena restaurada en 2019-2020. Está conectada al estuario por canales y compuertas, al igual que la explotación salina con la que colinda.

Proyectos presentes y para el futuro próximo

Actualmente hay dos proyectos antagónicos concentrados en las marismas de Trebujena (Figura A1.2, zona 3). Por una parte, hay un terreno en el cual se pretende construir una urbanización con campo de golf, que quedaría inutilizable como llano mareal (Ecologistas en Acción, 2020c), mientras que por otra parte está el proyecto recuperación de marismas escalando la marisma restaurada en 2020. En la Figura A1.8 se observan ambas zonas: en amarillo se muestra la zona de recuperación de la marisma de Trebujena, y en rojo se delimita la zona en la que se pretende construir la urbanización (F.J.F, 2020). Actualmente no se tiene información actualizada sobre el estado de ambos proyectos.

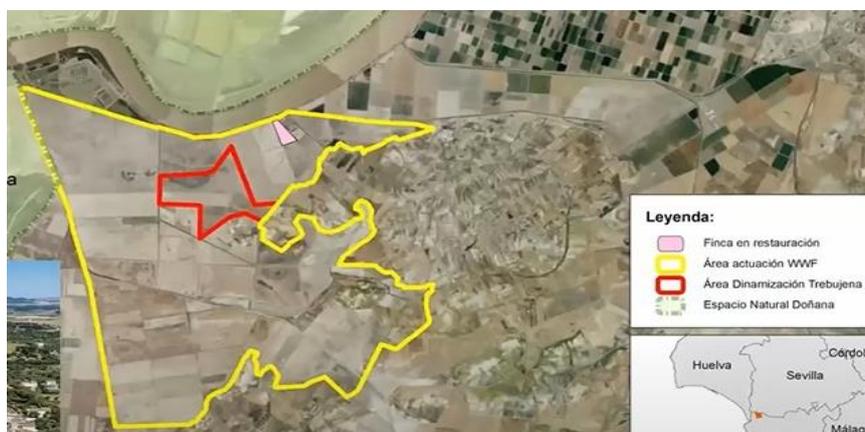


Figura A1.8 – Potencial área de actuación para proyectos de restauración (WWF, 2021). En rosa las 6 ha que ya han sido restauradas. En amarillo la Marisma de Trebujena y en rojo la potencial ubicación de una urbanización con campo de golf.

Se ha prestado un especial interés al proyecto de recuperación de la Marisma de Trebujena, cuya fase de puesta en valor comenzó en octubre de 2021 (Europa Press, 2021). El diseño de la recuperación de la marisma ya ha sido planeado, tal y como se indica en la siguiente declaración “El diseño del humedal se ha realizado para que pueda inundarse de manera sectorial, regulado por compuertas, y para que pueda recibir tanto agua dulce procedente de las precipitaciones que recibe la marisma en invierno (aprovechando las canalizaciones realizadas en los años 50), como agua salobre procedente del mismo cauce del río Guadalquivir” (Europa Press, 2021). En la Figura A1.9 y Figura A1.10 se recogen dos mapas que contienen el diseño de la zona más inmediata a recuperar. Se puede observar que las marismas van a estar gestionadas antrópicamente por canales y compuertas, siguiendo los pasos del proyecto anterior (WWF y Coca-Cola, 2021) y que estarán divididas en sectores. Esto significa que las probabilidades de instaurar una llanura mareal propiamente dicha en la zona 3 son muy bajas.

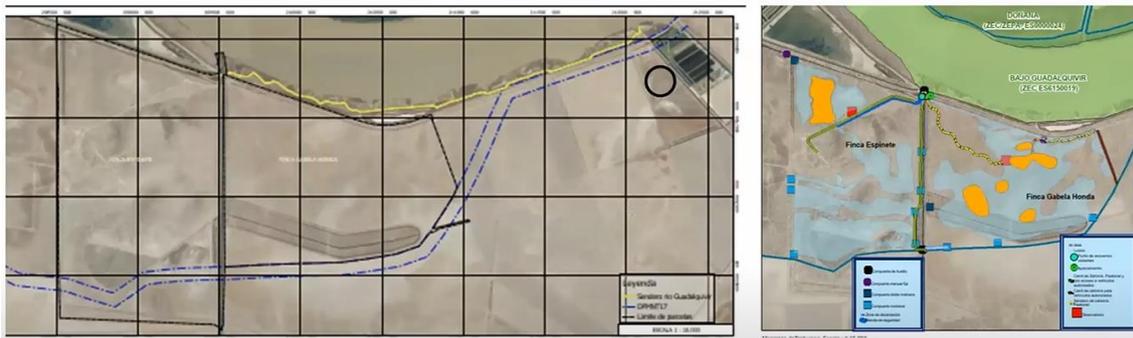


Figura A1.9 – Zoom al área de actuación para la recuperación de Marismas de Trebujena (WWF, 2021). El círculo negro indica la posición de la zona de 6 ha restaurada.



Figura A1.10 – Cartel informativo sobre el proyecto para la puesta en valor y la recuperación de humedales y el paisaje agrario del Bajo Guadalquivir. En uno de los paneles se observa el diseño de las primeras marismas (Ayuntamiento de Trebujena, 2021).

Conclusiones

A continuación, se enumeran una serie de comentarios y conclusiones sobre la ubicación y forma de las llanuras mareales y su conexión con el estuario:

- A priori hay 5 zonas potenciales para instaurar llanuras mareales, teniendo en cuenta los usos del suelo y las restricciones jurídicas de parques naturales.

- Las zonas que se encuentran en la margen izquierda (yendo aguas abajo) están separadas por una serie de canales y caminos, entre sí y por sí solas. Esto dificulta su potencial condición de llanura mareal propiamente dicha.
- Parece que algunas zonas que se encuentran en la margen derecha, rodeando Veta La Palma, están separadas del estuario por un gran desnivel en la orilla.
- La superficie de las potenciales llanuras mareales varía entre un mínimo de 430 ha y un máximo de 2600 ha, a lo que se suma la diferente morfología de cada zona, por lo que elaborar un método realista en el que tengamos diferentes capacidades escalables quedaría limitado a ese valor mínimo. Una solución podría ser tratar cada zona independientemente, partiendo de la capacidad máxima y rebajando a $\frac{2}{3}$ y $\frac{1}{3}$ de la capacidad total.
- La anchura media de la celda del estuario que conectaría a este con la llanura es de 215 m. Esta podría reducirse a $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}$ o $\frac{1}{3}$, dependiendo de la resolución de la llanura. Es un valor equiparable a la anchura de los diferentes subsidiarios, que da cierto margen para crear bocas más o menos estrechas. Sin embargo, esta anchura es mucho mayor que la de los canales gestionados por compuertas (3-11 m), que es algo más realista en base a pasados y futuros proyectos.
- Los futuros proyectos apuntan hacia una reconstrucción y gestión de marismas utilizando canales y compuertas y no llanuras mareales propiamente dichas. Además, la reconstrucción conlleva muchos elementos morfológicos (islas, diques, sectores, etc.) que harían compleja una simulación más realista.
- En base a captar con precisión y (realismo) la anchura de la conexión estuario-llanura y algunas irregularidades de las futuras marismas, se utilizará en las llanuras un mallado con mayor resolución que la del estuario, como se hizo en el estudio preliminar recogido en el Capítulo 5 del Informe 2.

Referencias

- Ayuntamiento de Trebujena (2021). Trebujena recuperará sus humedales gracias a una inversión de 1,6 millones de euros [online]. Available at: <https://www.trebujena.es/noticias/26-medio-ambiente/478-trebujena-recuperara-sus-humedales-gracias-a-una-inversion-de-1-6-millones-de-euros>
- Bustillos Martínez, P., Romero García, R., Abellán Gamero, A. (2020). Declaración Ambiental – Año 2019, Pistresa (Piscícola de Trebujena S.A.). Junta de Andalucía. pp. 110.
- Cruz, C. (2020). Trabajadores de las salinas, “al límite” por impagos. *Andalucía información*. Available at: <https://andaluciainformacion.es/sanlucar/878124/trabajadores-de-las-salinas-al-limite-por-impagos/>
- Ecologistas en Acción (2020c). Las marismas de Trebujena están en riesgo de urbanización - Ecologistas en Acción. [online] Available at: <https://www.ecologistasenaccion.org/153438/video-las-marismas-de-trebujena-estan-en-riesgo-de-urbanizacion/>
- Europa Press. (2021). La Junta inicia en octubre la puesta en valor de los humedales del Bajo Guadalquivir en Trebujena. *Gente en Cádiz* [online]. Available at: <http://www.gentedigital.es/cadiz/noticia/3192867/la-junta-inicia-en-octubre-la-puesta-en-valor-de-los-humedales-del-bajo-guadalquivir-en-trebujena/>
- F.J.F (2020). El Ayuntamiento de Trebujena defiende su gestión sobre el proyecto del campo del golf. *Diario de Cádiz* [online]. Available at: https://www.diariodecadiz.es/costa-noroeste/el-ayuntamiento-de-trebujena-defiende-su-gestion-proyecto-campo-golf_0_1504649951.html

- Gallego-Fernández, J., Novo, F. (2007). High-Intensity Versus Low-Intensity Restoration Alternatives of a Tidal Marsh in Guadalquivir Estuary, SW Spain. *Ecological Engineering*. 30. 112-121. doi: 10.1016/j.ecoleng.2006.11.005.
- Junta de Andalucía (2007). Usos y coberturas vegetales en Andalucía (Última actualización en 2007) [online]. Available at: https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page-%C3%ADndice/-/asset_publisher/zX2ouZa4r1Rf/content/distribuci-c3-b3n-de-los-usos-y-coberturas-vegetales-en-andaluc-c3-ada/20151
- Tierra y Mar & Espacio Protegido Canal Sur (2016). Piscifactoría PISTRESA en Trebujena [Vídeo]. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=srqp7qeQW6s>
- Tierra y Mar & Espacio Protegido Canal Sur (2021). Proyecto para recuperar la antigua marisma de la margen izquierda del Guadalquivir [Vídeo]. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=dmgwlvaJfFE&ab_channel=TierraYMar%26EspacioProtegidoCanalSur
- World Wildlife Fund (WWF), Coca-Cola Foundation (2021). Misión Posible: Desafío Guadalquivir. Coca-Cola España [online]. Available at: <https://www.cocacolaespana.es/sostenibilidad/medioambiente/agua/desafio-guadalquivir>
- World Wildlife Fund (WWF) (2021). Seminario Online - El Estuario del Guadalquivir hoy: Estudios actuales y novedades científicas. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=K-gIFOj8bbs>



PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN DE LA NAVEGACIÓN EN LA EUROVÍA E.60.02 GUADALQUIVIR
WORKING WITH NATURE

***“Realización de estudios hidrodinámicos y ambientales
en el marco del proyecto de Optimización de la
Navegación en la Eurovía E.60.02 GUADALQUIVIR.
Periodo 2021-2023”***

*Contrato firmado entre la Autoridad Portuaria de Sevilla y el
Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga,
noviembre 2021*

INFORME Nº 4, DICIEMBRE 2022 (versión preliminar)
Grupo Oceanografía Física, Universidad de Málaga (GOFIMA)



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



**Funded by
the European Union**

DISCLAIMER: The contents of this publication are the sole responsibility of GOFIMA and do not necessarily reflect the opinion of the European Union.

Índice

1. Introducción	2
2. Implementación del esquema definitivo de uso de agua de riego	4
2.1. Protocolos de riego facilitados por la Federación de Arroceros de Sevilla para la margen derecha del Guadalquivir.	4
2.2. Nuevo sistema de recirculación de agua de riego implementado en el estuario del Guadalquivir	6
2.2.1. Ciclo anual	6
2.2.2. Validación durante la fase segunda, temporada de regadío de arrozales.....	8
2.3. Conclusiones y comentarios sobre actuaciones futuras	10
3. Completamiento de los casos de estudio de la dispersión de contaminantes	12
3.1. Evaluación de los enclaves de vertido.....	12
3.2. Planteamiento de los experimentos	14
4. Diseño de los protocolos de acceso a los datos remotos del sistema operacional	15
4.1 Residuo meteorológico	15
4.1.1 El algoritmo	16
4.2. Resto de forzamientos	18
Bibliografía	19

1. Introducción

Según lo establecido en los acuerdos tomados entre la Autoridad Portuaria de Sevilla (APS) y el Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, las tareas previstas para final de año 2022, a desglosarse en el 4º informe de diciembre del mismo año, son:

- Implementación del esquema definitivo de uso de agua de riego
- Completamiento de los casos de estudio de la dispersión de contaminantes
- Diseño de los protocolos de acceso a los datos remotos del sistema operacional

Los primeros dos puntos completarían tareas empezadas en fases anteriores del proyecto, que se van a finalizar en ésta.

El modelo de uso de agua de riego implementado hasta la fecha en el modelo hidrodinámico del Guadalquivir es una aproximación del complejo esquema de aprovechamiento que se emplea en el río, en el cual se prevé cierto caudal de extracción de agua en determinados puntos y cierto porcentaje de restitución de agua al estuario con un contenido de sal incrementado. En este informe se presenta una versión más elaborada del esquema, que permite incrementar la fiabilidad del modelo en la reconstrucción del campo de salinidad a lo largo del estuario.

El estudio de escenarios de derrame de contaminantes se llevó a cabo en el anterior informe, presentando una serie de casos ficticios dirigidos a demostrar la capacidad del modelo de reconstruir los patrones de dispersión del trazador determinados por la dinámica mareal del estuario. En este informe se ejecutan escenarios específicos definidos en términos de ubicación de puntos de derrame establecidos conjuntamente con la APS y de distintas condiciones hidrodinámicas relacionadas con la fase e intensidad mareal.

El diseño de los protocolos de descarga de datos y generación de las condiciones de contorno es de crucial importancia para el funcionamiento correcto y rutinario de un sistema operacional. En el caso concreto del estuario del Guadalquivir, claramente dominado por las mareas, se juega con la ventaja de que, al ser éste un fenómeno determinista, su forzamiento no depende de la disponibilidad de datos generados por otros modelos, si no de predictores concretos (constantes armónicas) que ya están incorporados en el modelo. Sin embargo, la versión del sistema operacional a implantar, que contempla otros procesos secundarios, sí requiere de datos provenientes de otros modelos, los cuales han de ser descargados en tiempo real para incorporarlos como forzamientos. En este informe se revisan los fundamentos del diseño de estos protocolos operacionales y se concreta el desarrollo completo de uno de los forzamientos previstos: el residuo meteorológico procedente del modelo NIVMAR.

2. Implementación del esquema definitivo de uso de agua de riego

En este capítulo se presenta una mejora del esquema de aprovechamiento del agua de riego en el Guadalquivir implementado en el modelo. Dicho esquema permite una mejor comprensión del comportamiento del tapón salino y aumenta la confianza en las proyecciones futuras de la gestión del agua en el río. En concreto, se ha dado un salto cuantitativo del esquema toma-retorno único esbozado en informes previos a un esquema multi-retorno. Esta mejora ha sido posible gracias a la nueva información aportada por la Federación de Arroceros de la Margen Derecha del Guadalquivir en reunión mantenida con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) a finales del mes de junio de 2022 en las dependencias de la APS. En el presente capítulo se presenta detalladamente la nueva información, su implementación en el modelo y los nuevos resultados obtenidos a partir de ésta.

2.1. Protocolos de riego facilitados por la Federación de Arroceros de Sevilla para la margen derecha del Guadalquivir

La Figura 2.1 muestra un mapa que recopila información sobre el sistema de circulación de agua de la zona arrocera para la margen derecha del Guadalquivir. En dicho mapa se indican los principales puntos de toma de agua para regadío, su circulación a través de la red de canales de cada finca y los desagües en otros canales, afluentes y en el propio Guadalquivir tras su recorrido por los arrozales. Aunque el sentido de circulación del agua en esta compleja red de canales es igualmente complejo, el mapa sí da una idea bastante aproximada del sistema de desagües: cada toma abastece a una o varias fincas de arroz y, dependiendo de la extensión de éstas, recircula el agua en una o varias ubicaciones, destacando como principales el Brazo de los Jerónimos, el Brazo de la Torre y el propio Guadalquivir (véase la Figura 2.2).

En la margen izquierda del Guadalquivir no se dispone de información sobre el sistema de circulación de agua; sin embargo, se ha aplicado un razonamiento similar siguiendo —vía imágenes de satélite— la red de canales desde la ubicación de las tomas de agua recogidos en el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), perteneciente a la CHG, hasta la desembocadura del canal. De esta forma, se ha podido concluir que la principal zona de desagüe para la margen izquierda es el Brazo del Este, el cual desemboca a su vez en el estuario.

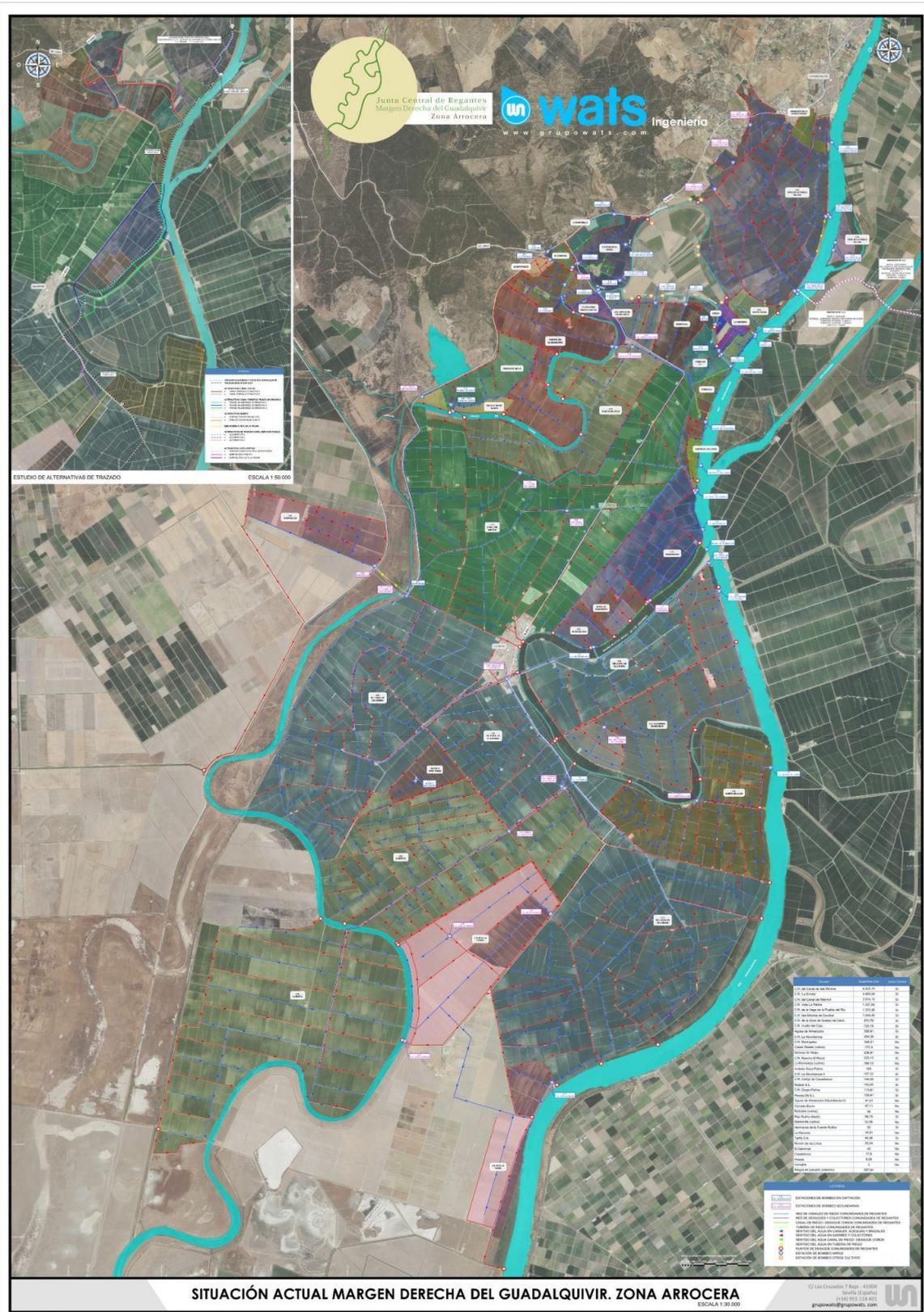


Figura 2.1. Mapa proporcionado por la Federación de Arroceros de la Margen Derecha del Guadalquivir, que recopila información sobre el complejo sistema de circulación de agua a través de las diferentes fincas.

2.2. Nuevo sistema de recirculación de agua de riego implementado en el estuario del Guadalquivir

En informes previos se estimaba una devolución del 75 % del volumen de agua extraída en las tomas al que se aplicaba una corrección artificial de salinidad de +1.5 PSU debida a la evaporación y eventual aportación del lavado del terreno (Figura 3.3, Informe 2). Dichas devoluciones se definieron en nodos del dominio ubicados aguas abajo de las tomas de agua oficiales. En el presente informe, se mantiene el mismo esquema conceptual y se modifican las ubicaciones de las recirculaciones de agua, que son actualizadas en base a los nuevos datos facilitados por la Federación de Arroceros de la Margen Derecha del Guadalquivir.

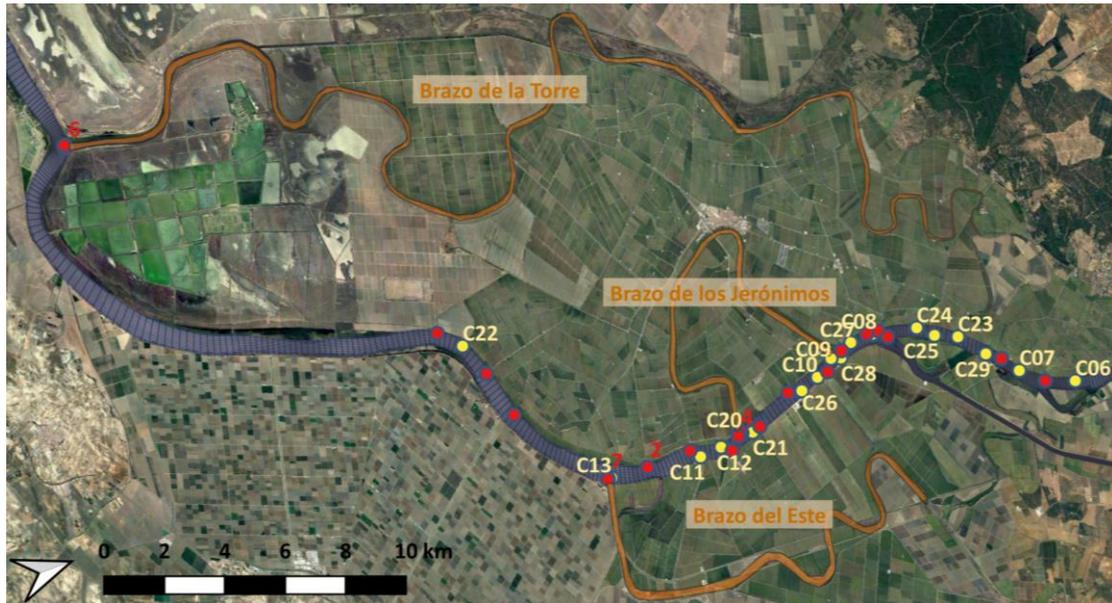


Figura 2.2. Puntos de extracción de agua recogidos en el SAIH en la zona arrocera (etiquetados en amarillo claro) y puntos de recirculación (en rojo, con un número que indica la cantidad de extracciones que hay en una misma ubicación cuando ésta es mayor que uno) modelados a partir del sistema de circulación facilitado por la Federación de Arroceros de la Margen Derecha. Se indican también los tres brazos principales en los que desaguan parte de las tomas.

La Figura 2.2 muestra los puntos de extracción de agua recogidos en el SAIH y los puntos de recirculación ajustados en el modelo. Puesto que para cada toma existen varios puntos de devolución, cuyos caudales son desconocidos, se ha modelado agrupando los desagües cuya ubicación era próxima (algunos del propio Guadalquivir) y cuando desembocaban en un mismo afluente (Brazo de la Torre, Brazo de los Jerónimos y Brazo del Este), dividiendo el caudal recirculado entre esas ubicaciones. De esta forma, se ha pasado de un esquema toma-retorno único a un esquema multi-retorno en el que se han simplificado 40 desagües extraídos del mapa de la Figura 2.1, a los 18 mostrados en la Figura 2.2.

2.2.1. Ciclo anual

La Figura 2.3 compara la salinidad anual modelada según la antigua y la nueva configuración de uso de agua en las 3 estaciones en las que se disponen observaciones: Isla Mínima, Queipo (6 meses, ya que a partir del 24 de junio deja de proporcionar datos) y Veta La Palma. Pueden distinguirse tres fases durante el periodo representado:

En la primera, desde el inicio hasta mayo de 2021, las observaciones muestran que la salinidad se mantiene en niveles bajos hasta que concluye la fase. Durante ella no existen tomas de aguas documentadas (línea marrón en el panel superior) y se ve que el modelo subestima muy ligeramente la salinidad observada en las tres estaciones.

La segunda fase comenzaría en mayo coincidiendo con el inicio de las tomas de agua para los arrozales y acabaría en octubre de 2021 con la finalización de las mismas (ver también Figura 2.4). Dentro de esa fase podríamos distinguir dos sub-fases, la primera de mayo a septiembre durante la cual tanto las observaciones como los datos modelados muestran un incremento de la salinidad y un buen acuerdo entre ellos. El incremento es algo mayor en el modelo, lo que hace que los datos modelados al final de la sub-fase están por encima de las observaciones. La segunda sub-fase, de septiembre a noviembre, es la más conflictiva en cuanto a comparación entre ambos conjuntos de datos, ya que el modelo predice un incremento más acentuado de la salinidad que durante la sub-fase 1, en tanto que la tendencia desaparece en las observaciones. La razón de la discrepancia parece radicar en los tamaños relativos de los datos proporcionados de caudal en la presa de Alcalá y los caudales tomados para los arrozales (líneas azul y marrón en el panel superior de la Figura 2.3). Una inspección visual indica que durante la primera sub-fase ambos caudales siguen patrones similares, pero con mayores valores del primero (descargas en la presa), excepto tal vez unos pocos días en agosto, cuando las salinidades observadas tienden a incrementarse de modo similar a como lo hacen las modeladas. Sin embargo, durante la sub-fase segunda la norma es que las tomas superan sistemáticamente los aportes en la presa, lo que lógicamente produciría un fuerte aumento de salinidad en el estuario al estar retirándose **un flujo neto de aguas menos salinas por las tomas arroceras**. Ese aumento es por tanto esperable y es lo que justamente indica el modelo. Sin embargo, las observaciones no muestran tendencia alguna sino una estabilización, que es físicamente incompatible con esa extracción neta de agua. Por esta razón se tienen ciertas dudas sobre la exactitud de los caudales proporcionados por la Confederación Hidrográfica durante esta segunda sub-fase, pensándose que los indicados para las tomas de los arrozales están sobreestimados.

La tercera fase comenzaría tras la conclusión del periodo de extracción de caudal para los arrozales (octubre-noviembre) y se extendería hasta el final del periodo representado, enero de 2022. Lógicamente, la diferencia entre salinidades observadas y modeladas se mantiene en el valor al que se llegó al final de la fase 2 pero, sin embargo, los patrones de ambos tipos de medidas son coherentes, presentando una estabilización alrededor de los valores con los que se finaliza la fase 2. El modelo reproduce correctamente el patrón observado. Poco antes de finalizar esta tercera fase se da una notable avenida de agua dulce en la presa de Alcalá (aproximadamente $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) que hace que tanto las observaciones como el modelo retornen a valores de salinidad similares a los observados durante los mismos meses del año anterior. De nuevo, el modelo capta correctamente el evento.

Bajo la nueva configuración multi-toma, el modelo mantiene un patrón similar al de toma única elaborada en el informe anterior, pero tanto la amplitud de la salinidad como los valores promedios se reducen en la nueva configuración, aproximándose más a las observaciones mejorando el diagnóstico de la salinidad y, por tanto, la performance del modelo. Es interesante notar que en la temporada de regadío de los arrozales que se extiende fundamentalmente durante la primera parte de la fase 2, la concordancia entre modelo y observaciones es muy buena y de ello se habla en el siguiente apartado.

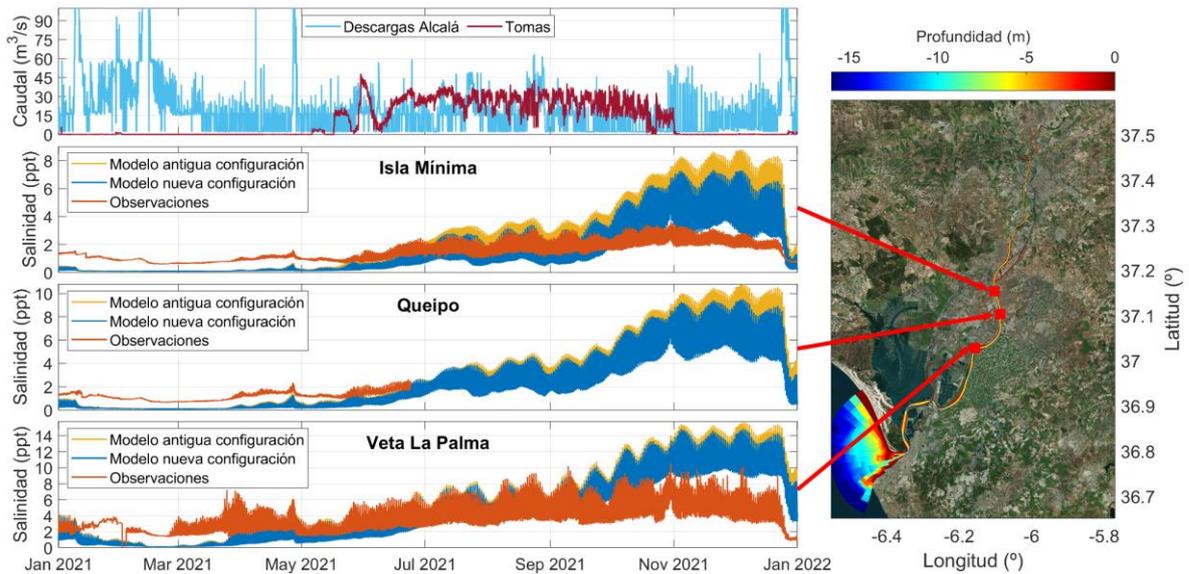


Figura 2.3. Salinidad en las estaciones de Isla Mínima, Queipo y Veta La Palma para el año 2021 modeladas según la antigua (amarillo) y la nueva (azul) configuración multi-toma y retorno de aguas junto con las observaciones (naranja). Para la estación de Queipo los datos disponibles cesan el 24/06/2021. El panel de la derecha muestra un mapa que ubica las estaciones en el estuario y el dominio del modelo. El panel superior presenta los caudales de descargas en Alcalá del Río y los extraídos para regadío de los arrozales. El eje de ordenadas se ha truncado en $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para no perder resolución de escala; dicho valor es sobrepasado en 4 ocasiones durante el año 2021.

2.2.2. Validación durante la fase segunda, temporada de regadío de arrozales.

La Figura 2.4 muestra una comparación de la salinidad modelada con la antigua y la nueva configuración de uso de agua y la salinidad observada en las estaciones de Isla Mínima y Veta la Palma durante la fase 2 de regadío de los arrozales (mayo - noviembre de 2021). No se muestra la estación de Queipo debido a la escasa disponibilidad de datos para el periodo de interés. La comparación entre la salinidad modelada con la antigua y la nueva configuración evidencia una mejora sustancial: el valor promedio y la amplitud de la salinidad se reduce, aproximándose más a la salinidad observada. Como ya se ha indicado, al comienzo del periodo de regadío, la salinidad modelada es ligeramente menor que la observada, consecuencia del arrastre de la cuña salina hacia la desembocadura producida por la descarga mantenida durante ese breve periodo y, al final del periodo, la salinidad es sobreestimada por el modelo. La explicación dada para esta sobreestimación es un posible desajuste entre los caudales proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y los reales, explicación que será ratificada o descartada en futuros estudios controlando la calidad y fiabilidad de datos recabados en el futuro. En cambio, en la fase 2 y más concretamente en la primera sub-fase de ella (mediados de junio - mediados septiembre), la concordancia entre observaciones y modelo es satisfactoria, reproduciendo con claridad la disminución de la salinidad asociada a las descargas ocurridas a finales de julio y de agosto.

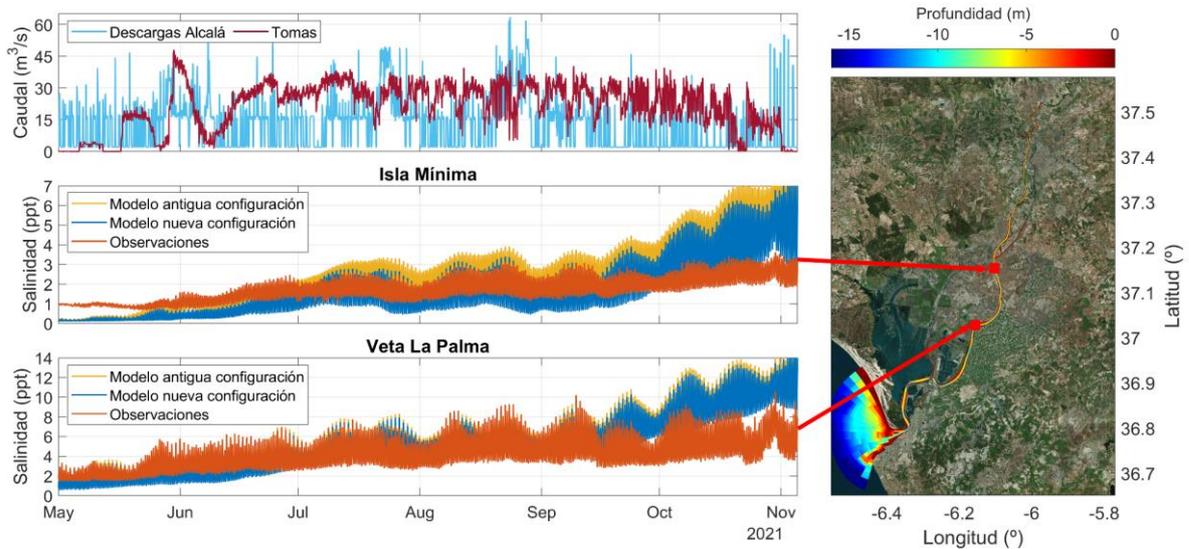


Figura 2.4. Salinidad en las estaciones de Isla Mínima y Veta La Palma para la temporada del arroz del 2021 modeladas según el antiguo (amarillo oscuro) y el nuevo (azul) esquema de usos de agua y las observaciones (naranja) obtenida a partir de la conductividad y temperatura proporcionados por el SAIH. Se indican las descargas de agua dulce en la presa de Alcalá del Río y la suma de las extracciones para regadío de los arrozales en el panel superior.

La Figura 2.5 amplía los resultados mostrados en la Figura 2.4 para un periodo de cinco semanas en mitad de la temporada de regadío. Puede apreciarse cómo el modelo en la nueva configuración multi-toma ajusta mejor a las observaciones, particularmente en Isla Mínima. Las oscilaciones locales de salinidad producidas por ambos modelos y las de las observaciones están totalmente en fase, mostrando un acuerdo muy satisfactorio. Las amplitudes mantienen diferencias en cuanto a tamaño, siendo ligeramente mayores las producidas por el nuevo modelo en Isla Mínima y un poco menores en Veta La Palma. es menor.

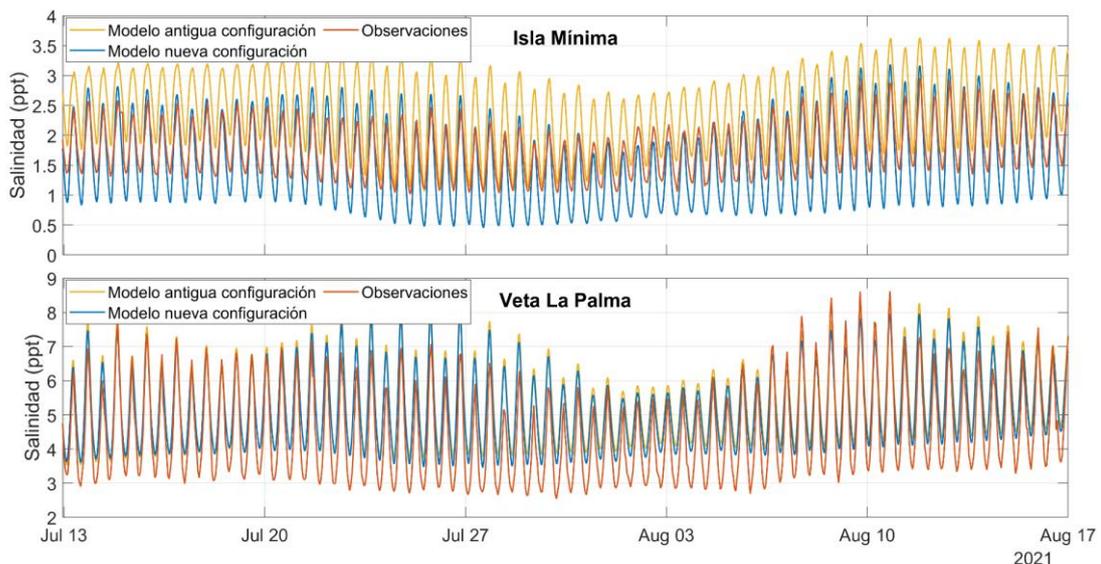


Figura 2.5. Salinidad en las estaciones de Isla Mínima y Veta La Palma modelada según el nuevo (azul) y el antiguo (amarillo) esquema de usos de agua y salinidad obtenida a partir de las observaciones facilitadas por el SAIH (naranja) para el periodo 13/07-17/08 del 2021.

2.3. Conclusiones y comentarios sobre acciones futuras

El nuevo esquema multi-toma de captación / retorno de agua para regadío implementado en el modelo en sustitución del antiguo esquema de toma-retorno único ha producido un avance satisfactorio en la convergencia de los patrones de salinidad locales producidos por el modelo hacia las observaciones, mejorando la validación de la salinidad. A este respecto se deben diferenciar las escalas temporales. A escala mareal el acuerdo es muy satisfactorio (Figura 2.5) y la mejora que produce el esquema multi-toma es notoria. A escala anual se observa una discrepancia importante, que se comenta más adelante, y que se achaca a una deficiente alimentación del modelo con datos de dudosa fiabilidad. Independientemente de lo anterior, el ciclo anual de salinidad observado difiere del modelado en que, al principio de año, el modelo la subestima y al final del verano la sobreestima. En todo caso, estas diferencias son de muy reducido tamaño y concluir que el nuevo esquema reproduce la compleja dinámica salina en el periodo de regadío de forma satisfactoria

La notable discrepancia que muestran los datos modelados frente a los observados entre septiembre y noviembre, cuando aquéllos exhiben una acentuada tendencia a aumentar en tanto que las observaciones reflejan una estabilización, es achacable a un desajuste entre los caudales de extracción para regadío proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y los reales. La estabilización de las observaciones en ese periodo apunta a que el caudal descargado en la presa de Alcalá del Río supera las extracciones, con lo que el tapón salino queda también estabilizado, en tanto que los datos proporcionados (y que alimentan el modelo) indican que las extracciones de agua en las tomas superan el caudal descargado en la presa (panel superior de la Figura 2.3). En estas condiciones, por las tomas, además de la descarga de la presa, se está retirando también agua menos salina del propio estuario, lo que permite avanzar el tapón salino aguas arriba. Este avance sería el responsable de la tendencia a aumentar la salinidad producida por el modelo durante ese periodo (la segunda sub-fase del periodo de regadío), tendencia que es la respuesta esperable del sistema al desajuste de los caudales que se deduce de los datos.

Esta hipótesis ha de ser confirmada o descartada en el futuro, por lo que se intentará obtener nuevos datos y/o revisar los cálculos de caudales extraídos para comprobar que estos últimos no excedan las descargas o, si lo hacen, sea durante periodos muy breves. Notar que este balance de caudales es un control necesario a realizar y no un artefacto sin fundamento a incorporar al modelo. La política de regadío es descargar los volúmenes de agua dulce que son requeridos por los regantes. Descargas inferiores supondría tomar agua de mayor salinidad de la aconsejada con el consiguiente perjuicio para el cultivo. El hecho de que las observaciones de salinidad no muestren tendencias es indicativo de que se mantiene un balance positivo de agua dulce (descargas > extracciones). Sin embargo, esta circunstancia no es reflejada por los datos facilitados. De ahí la revisión que se propone.

3. Completamiento de los casos de estudio de la dispersión de contaminantes

(NOTA: el estudio está en la fase final de elaboración de resultados y conclusiones y no se presenta en esta versión preliminar del cuarto informe, la cual se entrega con antelación sobre el calendario acordado por razones administrativas. La versión definitiva y completa del cuarto informe será entregada a lo largo del mes de enero de 2023, circunstancia que ha sido acordada y consensuada con la APS).

En este capítulo se amplía y completa el estudio iniciado en el informe anterior sobre la dispersión de contaminantes en el estuario del Guadalquivir. Se realiza en nuevas localidades de especial interés para la APS, con configuraciones más detalladas, incluyendo derrames ficticios de contaminantes en distintas condiciones de marea, duración de vertidos y propiedades del propio contaminante entre otros parámetros. Son cuatro las zonas seleccionadas, las cuales se comentan a continuación.

3.1. Evaluación de las localidades seleccionadas de vertido

La APS ha sugerido cuatro enclaves a lo largo del estuario en los que el riesgo de contaminación por parte del sector portuario, ya sean causados por circunstancias de intenso tráfico marítimo, o por la propia geomorfología del canal de navegación, es particularmente elevado. Esta primera sección se dedica a estudiar las zonas propuestas, comentando en cada caso el riesgo de impacto ambiental de las mismas. La Figura 3.1 muestra la localización de los enclaves propuestos por la APS a lo largo de la vía navegable y en la Figura 3.2 se observan las secciones transversales del estuario en cada uno de esos cuatro enclaves, extraídas de la batimetría del modelo numérico.

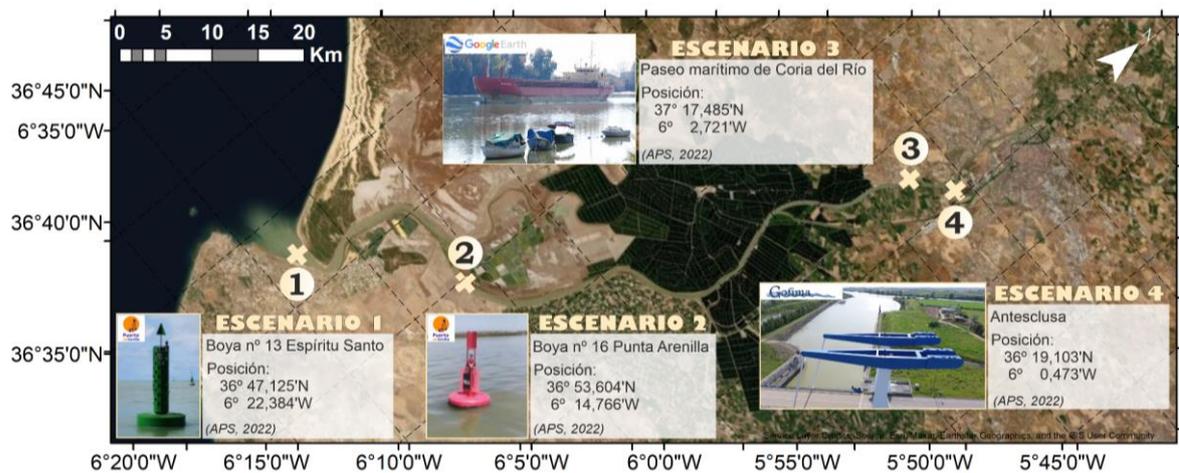


Figura 3.1. Localizaciones de los enclaves de posible vertido propuestos por la APS. Para cada uno se muestra una ficha informativa, incluyendo el nombre identificativo de su ubicación, su longitud y latitud geográficas y una imagen ilustrativa.

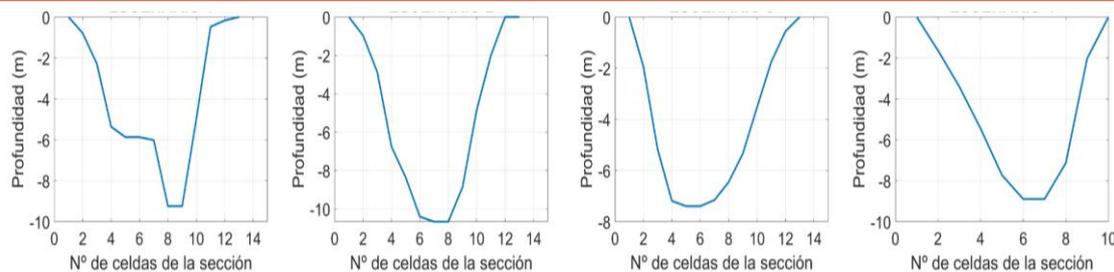


Figura 3.2. Profundidad en función del número de celdas en las cuatro secciones correspondientes a las cuatro zonas de posible vertido. Aparecen ordenadas de izquierda a derecha (1, 2, 3 y 4) y sus anchuras son, respectivamente, 1.4 km, 570 m, 260 m y 150 m.

Enclave 1: Sanlúcar de Barrameda

El primer enclave propuesto por la APS es las inmediaciones de la costa de Sanlúcar de Barrameda y Bonanza, próximo a la desembocadura del estuario. De acuerdo con la caracterización sedimentológica proporcionada en el informe elaborado por Tecnoambiente (2018), la naturaleza del fondo en dicho tramo es de tipo rocoso. Dichas propiedades batimétricas, sumadas al intenso tráfico marítimo que ocurre en ese tramo del río por su proximidad a la entrada en el canal de navegación, hace que deba tenerse presente la probabilidad de incidencias debidas a contactos entre buques, o con el fondo (GOFIMA, 2019). Dichas incidencias, que en casos extremos podrían provocar roturas de casco, conllevarían vertidos accidentales de contaminantes que causarían grave impacto ambiental en el estuario dada la exposición de la zona a la dinámica oceánica.

Enclave 2: ubicación de futuros diques para el uso de la “doble marea”

Una de las medidas propuestas por la APS para optimizar el tránsito de buques en la vía navegable, es el empleo de la *doble marea*, entendida como la doble ocurrencia de pleamares o bajamares durante un ciclo diurno, que permitiría el tránsito de buques de mayor calado hacia el océano desde el Puerto, mejorando el transporte de mercancías por el estuario. Asociada a esta eventual operativa está la instalación de diques de alba, que consisten en estructuras aisladas que sirven para dar apoyo lateral y amarre a los buques en periodos de espera. Dichas construcciones, si bien contribuyen a optimizar el transporte marítimo, conllevan un riesgo añadido asociado a la limitada dimensión del canal de navegación. El segundo enclave propuesto por la APS se ubica en una zona donde está prevista la construcción de dichas estructuras y persigue proporcionar una proyección futura de impacto ambiental en caso de una eventual colisión de barcos y consecuente vertido accidental.

Enclave 3: Coria del Río

El tercer enclave propuesto se ubica en las inmediaciones del paseo marítimo de Coria del Río, unos 70 km aguas arriba de Bonanza. Este tramo del río, que se encuentra próximo a la Antecclusa del Puerto de Sevilla, es especialmente sensible a la ocurrencia de incidencias asociadas a contactos con el fondo como consecuencia de la escasa distancia entre el canal de navegación y el paseo marítimo de la localidad, en la zona urbana. Además de los posibles vertidos accidentales asociados a eventuales incidencias marítimas, la zona de Coria del Río se ha visto ocasionalmente afectada por compuestos hidrocarburos procedentes de las industrias petroleras (Ecologistas en Acción, 2020; R.S., 2022), con lo cual se asume la importancia de llevar

un estudio de dispersión de contaminantes que sirva para hacer evaluaciones de impacto ambiental en dicha zona.

Enclave 4: Antesclusa del Puerto de Sevilla

El cuarto y último enclave propuesto por la APS es la Antesclusa del Puerto de Sevilla, donde ocurren operaciones complejas de tránsito de buques. Esta zona ya fue abordada en el informe anterior (Informe 3) donde se ejecutaron simulaciones con distintas concentraciones de contaminantes (0.1, 0.5, 1, 5, 50, 100 y 1000 kg/m³). Esos resultados previos aconsejan la realización del estudio más exhaustivo llevado a cabo en este nuevo Informe.

3.2. Planteamiento de los experimentos

Los resultados preliminares del Informe 3 muestran cómo el destino del contaminante vertido es sensible a las oscilaciones mareales de la corriente. Por ello, este informe plantea liberaciones ficticias de contaminante en distintas condiciones de marea, no solamente las asociadas al ciclo quincenal (marea viva-muerta), sino también las debidas a la fase mareal (pleamar, bajamar, llenante, vaciante). La Figura 3.3 muestra los diferentes escenarios mareales que se consideran.

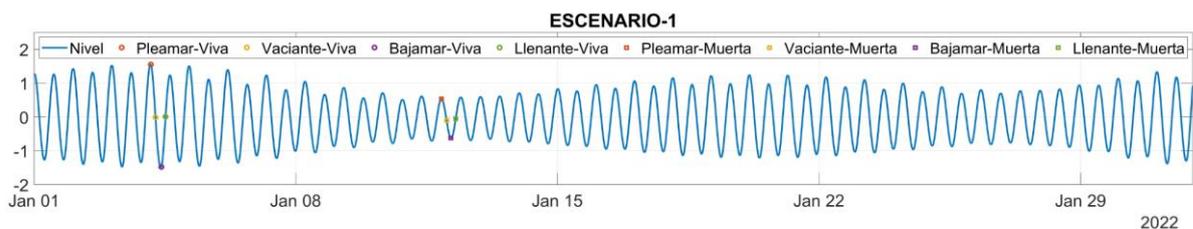


Figura 3.3. Escenarios mareales considerados en este informe. Se han señalado sobre la curva de nivel del mar y se contemplan distintas condiciones de marea asociadas al ciclo quincenal (marea viva-muerta) y a la fase de la misma (llenante, vaciante, pleamar y bajamar).

Además de las condiciones de marea, se han planteado tres escenarios de vertido en función de su duración, con el fin de reproducir distintos contextos de contaminación. Se han clasificado como instantáneo (2 horas de duración), corto (2 días) y prolongado (7 días).

4. Diseño de los protocolos de acceso a los datos remotos del sistema operacional

En un sistema operacional, el modelo hidrodinámico representa el núcleo principal operativo responsable de generar las predicciones de las magnitudes físicas simuladas a partir de condiciones iniciales y de contorno (GOFIMA, Proyecto de optimización de la navegación – Informe 3). Su calibración y validación son aspectos cruciales para que el sistema pueda funcionar correctamente, pero aún más críticos son los aspectos relacionados con la alimentación del modelo en tiempo real, que se ha de mantener y garantizar de forma continuada y automática. Sin ellos todo el sistema operacional se viene abajo y, por muy bien calibrado que esté el modelo, éste no podrá proporcionar ni un solo dato válido. La cadena operacional, es decir, la serie de rutinas, algoritmos y programas que han de ejecutarse automáticamente para garantizar que todos los forzamientos estén disponibles a la hora de ejecutar el modelo, no solamente debe funcionar de forma eficiente, rápida y autónoma, sino debe garantizar la existencia de estos forzamientos incluso en caso de que los modelos padres (los que proporcionan el dato) hayan fallado. En este capítulo, se va a detallar el protocolo de generación del forzamiento *residuo meteorológico*, definido como la diferencia entre el nivel del mar observado (o predicho por modelos) y su reconstrucción armónica (marea astronómica, GOFIMA, Proyecto de optimización de la navegación – Informe 3).

4.1. Residuo meteorológico

En el sistema operacional del Río Guadalquivir, el residuo meteorológico lo proporcionaría el modelo NIVMAR de Puertos del Estado (Álvarez-Fanjul et al., 2001), un modelo hidrodinámico barotrópico (la corriente es integrada verticalmente en toda la columna de agua), que calcula la modulación meteorológica del nivel en todo el dominio espacial (Figura 4.1). De este dominio se extrae el valor calculado en la celda más cercana a la desembocadura, y con éste se construye la serie temporal del forzamiento correspondiente.

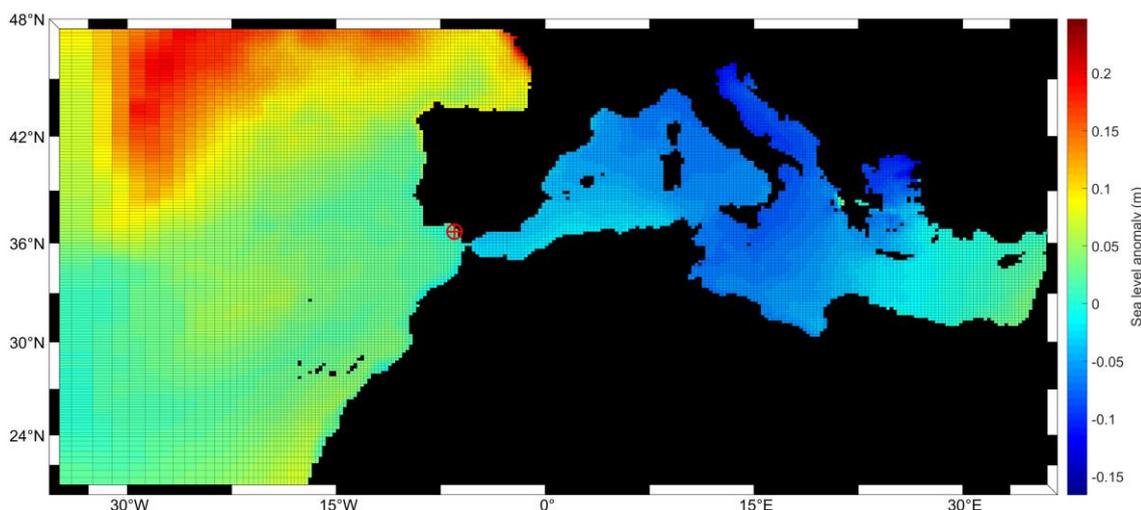


Figura 4.1.– Predicción de la anomalía del nivel del mar proporcionada por el modelo NIVMAR para el día 30 de octubre 2022. El círculo con la cruz roja indica la posición del punto extraído para generar la serie temporal de residuo como forzamiento del modelo del Guadalquivir.

El modelo NIVMAR genera predicciones dos veces al día, según un esquema “leapfrog” retrocediendo 11 horas atrás en el tiempo (hindcast) y simulando 72 horas adelante en el tiempo

(forecast). La ejecución operacional del modelo del Guadalquivir seguirá la misma estructura temporal del NIVMAR, aunque no se descarta modificarlo en función de lo que presenten los modelos que proporcionen los demás forzamientos. Esto prevé que la simulación de las 00h (12h) retroceda 11 horas atrás, hasta las 13h del día anterior (01h del mismo día) y se prolongue 72 horas hacia adelante hasta las 00h (12h) del día +3 (Figura 4.2).

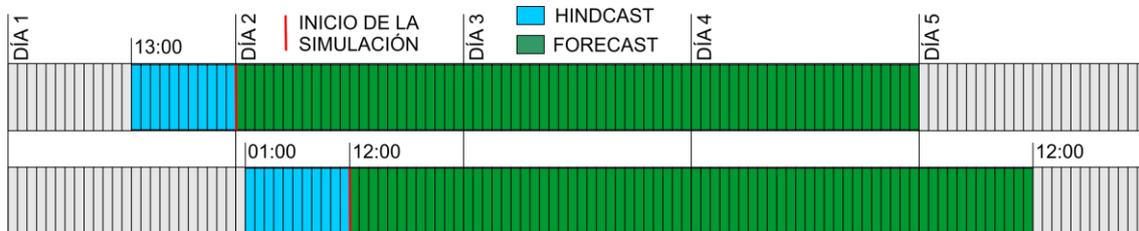


Figura 4.2.– Esquema de distribución temporal de la simulación del modelo NIVMAR.

Las salidas del modelo NIVMAR están disponibles en la base de datos pública OpenDAP de Puertos del Estado: <http://opendap.puertos.es/thredds/catalog.html>. En particular, las simulaciones más recientes se archivan en el directorio /HOURLY, donde están guardadas las salidas horarias del mes actual. Los ficheros son del tipo NetCDF, con una codificación de los nombres del tipo RES-YYYYMMDDHH-BYYYYMMDDHH-XC.nc, donde las dos cadenas de caracteres YYYYMMDDHH indican el año, mes, día y hora de la salida simulada y del inicio de la simulación, respectivamente, y el código XC puede tener valores HC por HindCast o FC por ForeCast. Por ejemplo, la salida generada a partir de la ejecución de las 00h del 2 de noviembre de 2022 para las 21h del día anterior se codifica como RES-2022110121-2022110200-HC.nc, en tanto que la salida generada por la misma ejecución para las 07h del día siguiente se codifica como RES-2022110307-2022110200-FC.nc.

4.1.1 El algoritmo

El algoritmo se ha programado en Python, un lenguaje de programación con licencia de código abierto, multiplataforma, ideal para su futura ejecución en las máquinas donde se instale finalmente el sistema operacional del Guadalquivir (APS o Puertos del Estado).

El primer paso del algoritmo de generación del forzamiento del residuo meteorológico consiste en identificar la hora y fecha actual. En base al resultado obtenido, se determina si la simulación más reciente del NIVMAR es la de las 00h o la de las 12h y, con esta información, se establece la lista de ficheros a descargar siguiendo el esquema mencionado antes, interrogando al sistema por el más reciente de ellos. Si el servidor responde positivamente (el fichero existe), se asume que existirán todos los demás elementos de la lista y se arranca un bucle para su descarga desde el servidor OpenDAP de Puertos del Estado. En cada iteración se extrae la información en el punto establecido y se va ensamblando así la serie temporal de residuo meteorológico. A la vez se va escribiendo el fichero con extensión *.bc0* que ha de tener la estructura prevista en el código del modelo Delft3D.

En caso de que los datos del modelo NIVMAR no estén disponibles, se genera una serie ficticia de residuo nulo (ceros) y con ésta se escribe el fichero de forzamiento con la misma cabecera que el caso anterior. Tratándose de anomalías, esta opción no debe afectar significativamente la continuidad de las soluciones del modelo entre simulaciones contiguas en el tiempo. Aun así, los detalles que conciernen al arranque de las simulaciones (condiciones iniciales desde un restart, duración del hindcast, etc.) se evaluarán más detenidamente cuando

se tenga el conjunto completo de forzamientos operacionales. La Figura 4.3 detalla de forma esquemática los pasos a seguir por el algoritmo operacional, descrito anteriormente.

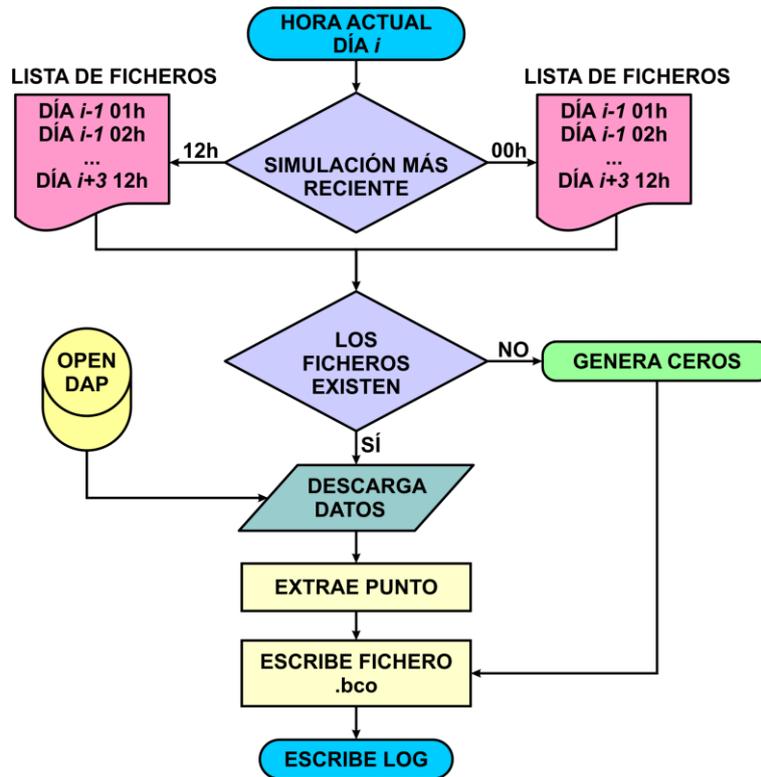


Figura 4.3.- Diagrama de flujo del algoritmo de generación del forzamiento de residuo meteorológico.

A medida que se va ejecutando, el algoritmo genera un registro de operaciones en formato ASCII (extensión *.log*) para informar al gestor del sistema operacional sobre la correcta ejecución de las tareas y los inconvenientes o errores eventualmente ocurridos. Como el programa se va a ejecutar dentro de una lista de rutinas de forma completamente automática, es importante que el registro quede guardado en un fichero y no se muestre solo en la consola del sistema operativo, donde no haya un operador en tiempo real que pueda chequearlo. La Figura 4.4 muestra el registro de operaciones que se escribe en cada ejecución del algoritmo.

```

*****
MODELO OPERACIONAL - RÍO GUADALQUIVIR
(c) Grupo de oceanografía Física - Universidad de Málaga
(c) Autoridad Portuaria de Sevilla
Módulo de carga de datos - modelo NIVMAR residuo meteorológico
(c) Puertos del Estado
*****
Hora actual: 2022-11-03 09:31:03.066102+00:00
La simulación más reciente es la de las 00:00 del día actual
La lista de ficheros para descargar es la siguiente:
RES-2022110213-B2022110300-HC.nc
RES-2022110214-B2022110300-HC.nc
RES-2022110215-B2022110300-HC.nc
....
RES-2022110522-B2022110300-FC.nc
RES-2022110523-B2022110300-FC.nc
RES-2022110600-B2022110300-FC.nc
Los ficheros están presentes en el OpenDap. Se van a cargar.
Leyendo ficheros desde OpenDAP Puertos del Estado...
Leído fichero RES-2022110213-B2022110300-HC.nc | Tiempo: 2022-11-02 13:00:00
Leído fichero RES-2022110214-B2022110300-HC.nc | Tiempo: 2022-11-02 14:00:00
Leído fichero RES-2022110215-B2022110300-HC.nc | Tiempo: 2022-11-02 15:00:00
....
Leído fichero RES-2022110522-B2022110300-FC.nc | Tiempo: 2022-11-05 22:00:00
Leído fichero RES-2022110523-B2022110300-FC.nc | Tiempo: 2022-11-05 23:00:00
Leído fichero RES-2022110600-B2022110300-FC.nc | Tiempo: 2022-11-06 00:00:00
Hecho. El fichero .bco se ha escrito correctamente.
  
```

Figura 4.4 – Registro de operaciones.

De especial interés es la definición de la lista de ficheros y la confirmación de lectura de cada uno de ellos, con la comprobación de coincidencia entre la fecha establecida por el nombre del fichero y la prevista por el programa. En el caso de que los ficheros no estén disponibles en el servidor, y el forzamiento se genere como una lista de ceros, esta comprobación de coincidencia de las fechas no se ejecuta y en su lugar se escribe la línea *“Los ficheros NO están presentes en el OpenDap. Se va a ejecutar el modelo sin residuo.”*, y se genera un fichero de condiciones de contorno con residuo nulo. La ejecución completa del algoritmo se realiza en pocas decenas de segundos.

Resulta especialmente importante establecer un tiempo mínimo de espera entre la hora nominal establecida por la ejecución de la simulación (00h ó 12h) y la hora efectiva en la que ésta se ejecute concretamente. El motivo es el tiempo necesario para que los modelos que generan las simulaciones de las que se extraen las condiciones de contorno puedan terminar de ejecutarlas. En el caso del NIVMAR este tiempo es aproximadamente una hora y media. Por ejemplo, a las 12:50 de un día cualquiera y aunque la hora sea posterior a la simulación más reciente (la de las 12h), las salidas del modelo NIVMAR todavía no estarán disponibles. Hay que esperar al menos hasta las 13:30 para ejecutar el algoritmo de generación del forzamiento de la marea meteorológica. La hora específica se definirá más concretamente cuando se conozcan los tiempos de ejecución de los modelos proveedores del resto de forzamientos.

4.2. Resto de forzamientos

Entre los forzamientos previstos, el siguiente en orden de importancia es el atmosférico aplicado al contorno abierto superficial. Se obtendría del modelo atmosférico HARMONIE de la Agencia Estatal de Meteorología, al que se accedería desde las máquinas de Puertos del Estado. A este propósito, en junio de 2022 se mantuvo una reunión con los técnicos de este organismo para aclarar los requisitos en términos de cobertura espacial, variables y protocolo de acceso a la base de datos. A la fecha de este informe todavía no se ha establecido un protocolo de acceso concreto a los datos, aunque se espera definirlo en el futuro próximo.

En cuanto al resto de forzamientos que no dependen de simulaciones numéricas, todavía no ha sido establecido un criterio común específico de acceso/disponibilidad de la información requerida en la cadena operacional. Un ejemplo son las descargas de agua dulce que tienen lugar en la presa de Alcalá del Río, cuyo caudal es establecido diariamente por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir en función de diversos criterios y circunstancias, como las reservas agua, aguas arriba de la presa, o las peticiones para el riego aguas abajo. Definir una serie de caudales futuros depende de los acuerdos que se establezcan entre la APS y la Confederación Hidrográfica. A la fecha de este informe todavía no se ha establecido un criterio concreto, al respecto.

Bibliografía

Álvarez-Fanjul, E., B. Pérez, I. Rodríguez, 2001. NIVMAR: A storm-surge forecasting system for Spanish waters. *Sci. Mar.*, 60: 145-154.

Ecologistas en Acción (2020). La contaminación por hidrocarburos en Coria del Río no sólo afecta a la salud de las personas - Ecologistas en Acción. [online] Available at: <<https://www.ecologistasenaccion.org/137746/la-contaminacion-por-hidrocarburos-en-coria-del-rio-no-solo-afecta-a-la-salud-de-las-personas/>>

GOFIMA (2019). DELIVERABLE 2.2: Report on the tidal behavior in the Guadalquivir Euroway at selected locations. Deliverable 2.2 del Proyecto AIRIS-II Synchro (Synchromodal traffic & transport information services - 2018-ES-TM-0025-S).

GOFIMA (2022). Proyecto de Optimización de la Navegación en la Eurovía E.60.02 Guadalquivir – Informe 3.

R.S. (2022). Los afectados por la contaminación en Coria trasladan su "desesperación" a la consejera de Salud. *Diario de Sevilla* [online] Available at: <https://www.diariodesevilla.es/provincia/afectados-contaminacion-Coria-desesperacion-Consejeria-Salud_0_1714029797.html/>

Smart Rivers 2019 Conference
September 30 - October 3, 2019
Cité Internationale / Centre de Congrès
Lyon FRANCE /

Ref. author:

R. García – Port Authority of Seville
Avenida de Moliní, 6, 41012 Sevilla (Spain)
rgarcia@apsevilla.com

J. Delgado – Univerty of Malaga
E.T.S.I. de Telecomunicación, Campus de Teatinos, 29071 Málaga (Spain)
jdelgado@uma.es

J. García-Lafuente – Univerty of Malaga
E.T.S.I. de Telecomunicación, Campus de Teatinos, 29071 Málaga (Spain)
glafuente@ctima.uma.es

A. Pulido – Port Authority of Seville
Avenida de Moliní, 6, 41012 Sevilla (Spain)
apulido@apsevilla.com

Keywords:

Modeling tidal propagation, vessel navigation, Guadalquivir Estuary

Title:

Modeling tidal propagation in Guadalquivir Estuary (Spain). Model output application to vessel navigation.

Abstract:

The Port of Seville is an inland port located in the Guadalquivir River in the south of Spain where 92% of the total traffic is a freight-type. This port has been attempting to increase its competitiveness by enhancing its productivity and operate in a more environmentally friendly way. The application developed allows the final users to test different traffic scheduling scenarios in order to assess the effects of tides on navigational patterns. The system is composed of a georeferenced database (Figure 4), a voyage simulator (Figure 5) and data post-processing tools that help to find the suitable departure time (temporary windows). Voyage simulator use a reliable information and forecasts on water levels and currents for an entire route, simplifying output provided by the 3D hydrodynamic model.

This tool can also be used to display currents or include them as a parameter that modify the real speed of the ship.

A 3D hydrodynamic model has been developed to study the tidal regime, water circulation, temperature and salinity distributions, flooding areas and sediment dynamics in the estuary.

The SHYFEM hydrodynamical model was developed at ISMAR-CNR (Marine Science Institute) in Venice, Italy (Umgiesser and Bergamasco, 1993, 1995). This model has been applied successfully in Venice lagoon tidal elevation, circulation and water exchange (Umgiesser, 2000; Melaku Canu et al., 2003; Umgiesser et al., 2004), salinity intrusion (Zemlis et al 2013) and sediment dynamics (Umgiesser et al., 2006, Coraci et al., 2007; Moliraroli et al 2007).

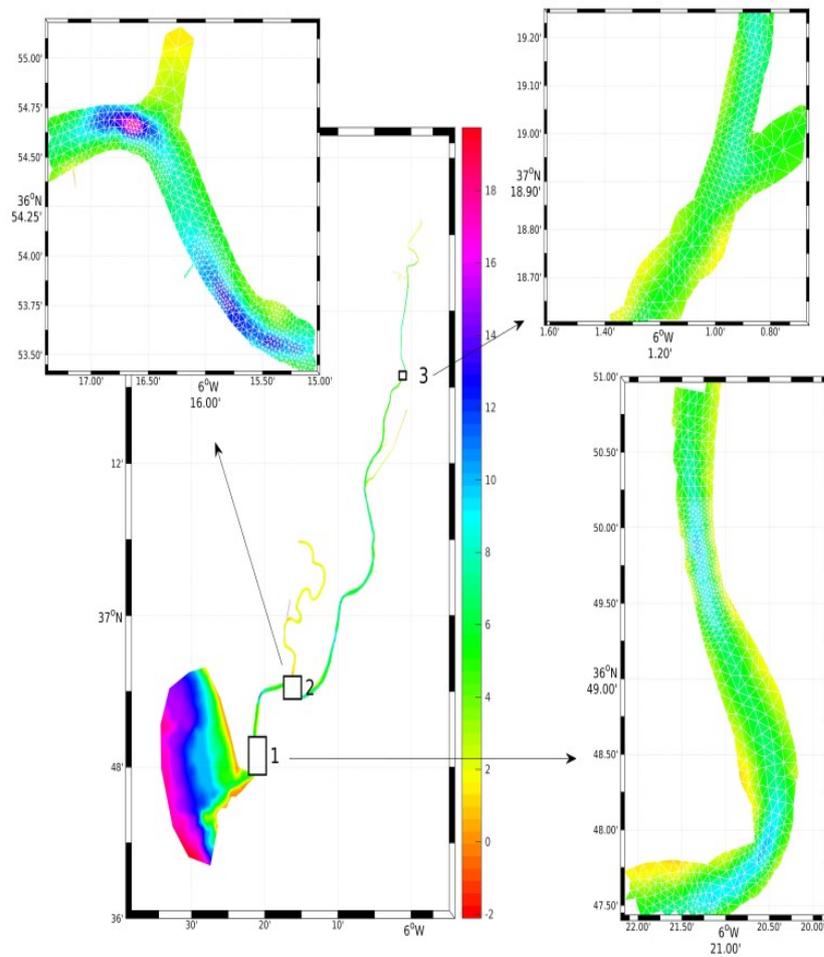


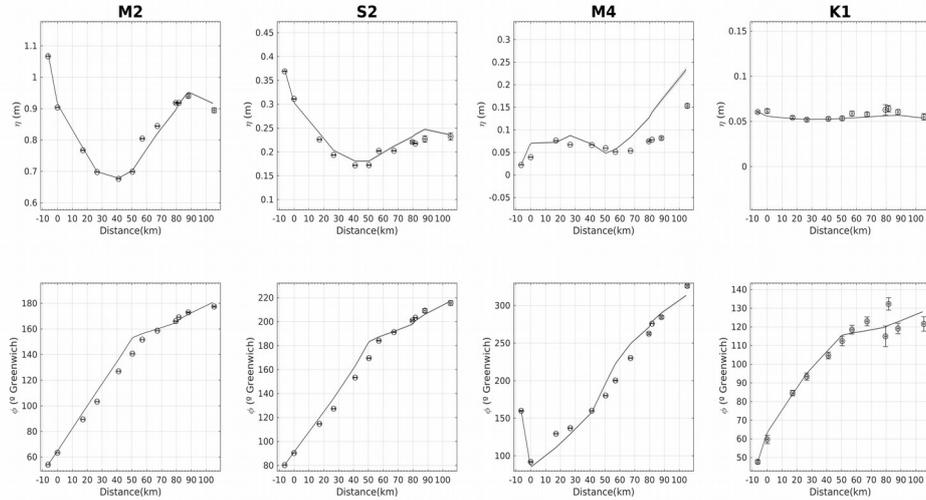
Figure 1. Bathymetry of the study area and the high resolution finite element mesh used for the Guadalquivir estuary model, which used 7000 nodes in 9 vertical layers based on Z vertical coordinate.

The finite element method is used and an effective semi-implicit time resolution algorithm is applied, which makes the model suitable especially for the coastal and estuaries zones applications, for more details, refer to Umgiesser et al. (2004). The model is freely available on the SHYFEM web page: <http://www.ismar.cnr.it/shyfem>. The model is forced by the oceanic tide at the mouth and freshwater discharges controlled by an upstream dam at the head. The meteorological forcing has been also applied.

Physical parameter	Numerical value
Time step	300 s
Grid mesh	Unstructured 7010 nodes
Vertical coordinate	9 Z levels
Horizontal eddy viscosity	0.3 Smagorinsky
Vertical eddy viscosity	Derived from GOTM
Drag coefficient	39 to 100 Strickler coefficient
Salinity	24 psu
Temperature	20 C°

Table 1. Parameters used in the barotropic model calculations.

The computational grid (Figure 1) was extended over the entire estuary. The grid has 48456 triangular elements with more than 7000 nodes. Mesh resolution varies from 200 metres near the coasts to less than 20m in the estuary to reproduce correctly the baroclinic circulation. The basin is vertically splitted into 9 Z-



levels.

Figure 2. A comparison of modelled (black line) and real values (dots) of tidal amplitude and phases of several tidal constituents and the distances (km) from the estuary mouth.

For the validation processes, the Root Mean Squared Error and the Index of Agreement were calculated. The observed water elevation time series have been separated into their several tidal constituents using the harmonic tidal analysis Matlab toolbox T_tide of Pawlowicz et al. (2002). The model (Figure 2) has been satisfactorily validated and predicts tidal oscillations with high accuracy (less than 4 cm in amplitude and 20 min in phase everywhere in the estuary). The barotropic model is fully operational.

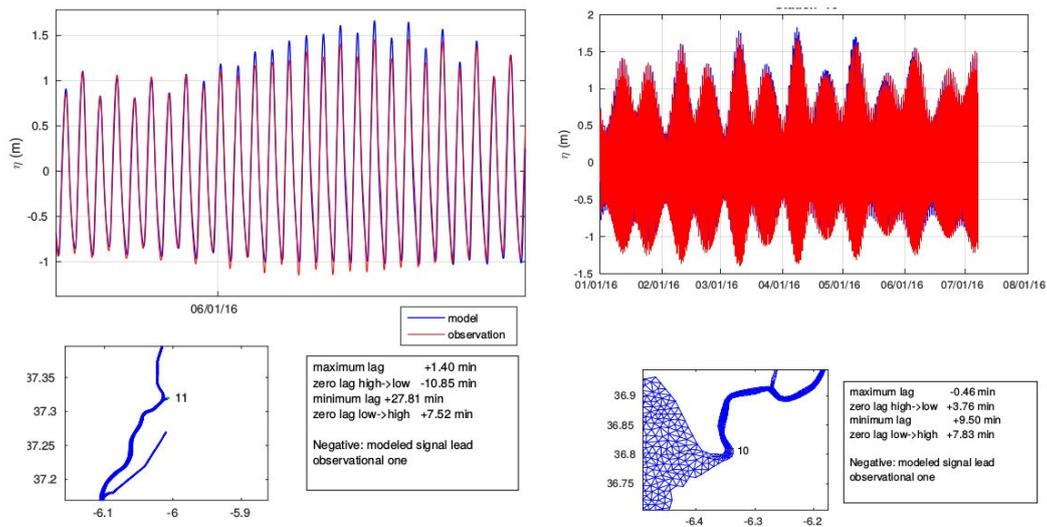


Figure 3. Observed water levels at the lock, entrance of Seville port (red line in upper left panel) and Bonanza, entrance of Guadalquivir estuary (red line in upper right panel). (blue) Water level hindcast from Guadalquivir barotropic model. Panels below put the location of this time series in the model mesh map and gives detail about observation-model differences.

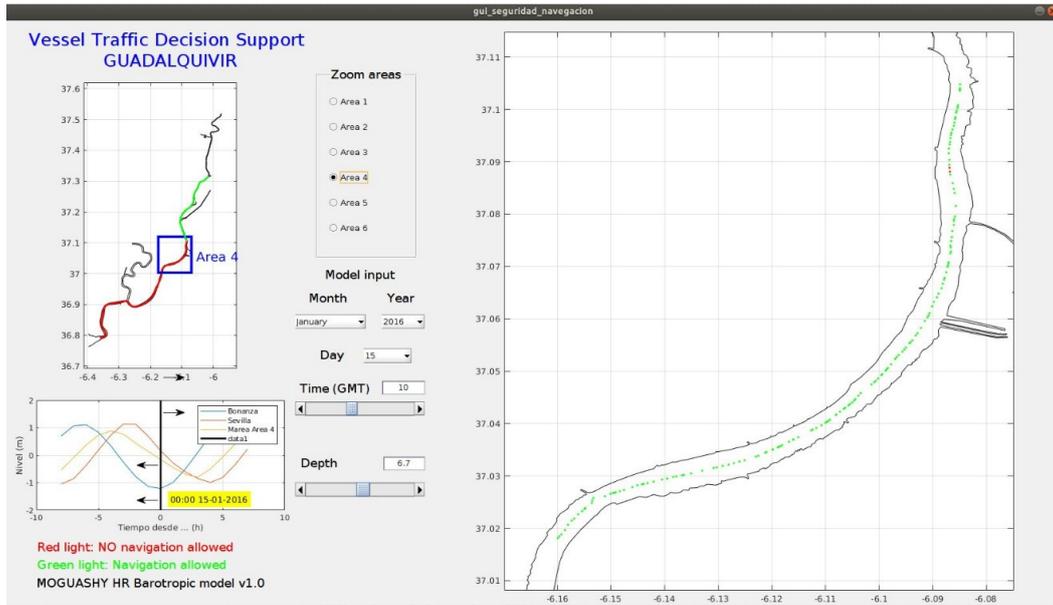


Figure 4. Snapshot of the georeferenced thickness of the water layer database written in matlab. Basically this program stress if there is more depth than a threshold in a specific moment of time in the estuary or not. The panel on the left summarizes the situation in an entire area (selectable by the user), while the panel on the right represents the situation in more spatial detail. A binary color code labels with red/green locations with less/more depth than the specified by the user. Water levels at the lock, Bonanza and selected area is also displayed.



Figure 5. Snapshot of the voyage simulator, written in matlab, that use the spatio-temporal tidal information modelled in the estuary particularly the instantaneous thickness of the water layer. Upper panel present the longitudinal position of a vessel that travel at constant speed, described by a fixed observer over land, from Seville to the Gulf of Cadiz. Lower panel stress the thickness of the instantaneous water layer that the ship would find during navigation through the estuary. The ship modeled sails at a constant speed or making stops during certain periods of time in order to allow certain sections with little depths to get more water thickness due to the tide.