

AIRIS II - SYNCHRO. SYNCHROMODAL TRAFFIC & TRANSPORT INFORMATION SERVICES

2018-ES-TM-0025



ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

Validación/calibración del modelo numérico incluyendo los efectos de las mareas astronómica, meteorológica y descargas

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

Control de firmas / Signature Control

Realizado Written	Aprobado Approved
	Jesús García Lafuente Javier Delgado Cabello
Javier Delgado Cabello - Universidad de Málaga (UMA)	Jesús García Lafuente - Universidad de Málaga (UMA)
21/10/2020	21/10/2020

Aprobación del documento / Document Approval

Pedro Sebastian Vila Aguiló	Rodrigo García Orera
Quality Leader (QL)	Action Coordination Leader (ACL)
SENER Ingeniería y Sistemas	Autoridad Portuaria de Sevilla
Fecha y Firma dd/mm/yyyy	Fecha y Firma dd/mm/yyyy

No precisa firma si está aprobado electrónicamente mediante ruta / Signature not needed if electronically approved by route

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

Información del Documento Document Information	
Realización del Documento	UMA
Código Documento	D0210057-UMA-NT-0001
Revisión	0
Nombre del documento	ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

“La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.”

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

INDICE / TABLE OF CONTENTS

1	REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LA BATIMETRÍA DEL DOMINIO	6
2	CALIBRACIÓN/ VALIDACIÓN DEL MODELO CON EL NUEVO MALLADO	8
2.1	Calibración/validación de la marea astronómica	13
2.2	Calibración/validación de la marea meteorológica.....	15
2.3	Calibración/validación de las descargas de agua dulce	18
2.	CONCLUSIONES DE LA SUBTAREA 3.2.1.....	25
3.	BIBLIOGRAFÍA	26

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

“La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.”

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

Dada esta importancia, se ha realizado una revisión de los elementos del modelo en estos subdominios. No existe información batimétrica detallada de ninguno de estos subsidiarios. A falta de ella, el modelo inicialmente asume una profundidad constante y digitaliza el cauce poniendo un único punto de malla en dirección transversal en el interior del dominio. Con ello se consigue modelar adecuadamente el efecto principal de reservorio que tienen para absorber o devolver volúmenes considerables de agua al estuario durante los ciclos mareales. Éste, que es su papel más importante, está correctamente modelado. Sin embargo, tener un único punto en toda la sección transversal potencia la fricción con los contornos sólidos dando lugar a valores aumentados artificialmente de su efecto, que tienen que ser posteriormente compensados en el proceso de calibración en el propio estuario. Este defecto se solventa fácilmente aumentando el número de nodos de malla en las secciones transversales de los dominios de los subsidiarios. El precio a pagar es un mayor coste computacional, por lo que se ha buscado un equilibrio entre el número de nodos que se añaden y dicho coste. En el caso del Brazo de la Torre, el número nuevo de nodos es 1168 frente a 998 del modelo previo, y lo mismo con los otros dos subsidiarios: El Ribera de Huelva ha pasado de 230 a 943 y el Guadaira de 206 a 1115.

No ha sido la única modificación realizada en el mallado. La batimetría actual disponible del estuario tiene excelente resolución en el canal navegable, pero carece de datos entre el límite de ese canal y la orilla más próxima del estuario en la dirección transversal. Por esa razón, la batimetría actual incorporada en el modelo se ha obtenido interpolando linealmente desde el punto del canal de navegación más próximo a la ribera hasta la propia ribera. A falta de otra información más fiable, se considera esta interpolación produce los mejores resultados. Sin embargo, tiene un problema que tiene que ver con la forma que tenga la ribera. En buena parte del estuario, es aplacerada dejando al descubierto o inundando perfiles tipo playa, pero existen tramos en que la ribera acaba como un corte vertical más tipo canal.

El comportamiento de uno y otro tipo, desde un punto de vista numérico, es diferente, porque la forma aplacerada da lugar a inundación de espacios que están secos en una parte del ciclo mareal y descubre otros que están por debajo del nivel medio en la otra. El perfil tipo canal no produce este efecto. Hay pues una pequeña contribución, similar a un búfer, en las riberas tipo playa. Aunque es de muy segundo orden, puede ser incluida sin demasiado esfuerzo en el modelo mediante una pequeña modificación de la malla del dominio.

La forma de hacerlo ha sido simple. Se ha orlado el mallado existente del estuario con dos líneas de nodos, una en cada ribera hacia tierra, paralelas y próximas al contorno actual y se les ha asignado una cota positiva por encima del nivel medio (el cauce tiene asignado cotas -batimetría- negativa). En los lugares donde el estuario tiene riberas tipo canal, el orlado produce un efecto de pendiente acentuada. En ellos no debería hacerse esta corrección, pero, de nuevo, al no tener información geográfica precisa sobre esos lugares y en la hipótesis de que representan una proporción bastante inferior a los de tipo playa, se ha optado por orlar de forma general porque hacerlo conducirá a una pequeña mejora. El orlado añade 1159 puntos, desplazando 1310 nodos fuera del dominio de la malla anterior, con lo que la malla del modelo ha pasado de tener 10035 nodos a 13062 nodos, incluyendo los introducidos en los cauces de los subsidiarios.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

2 CALIBRACIÓN/ VALIDACIÓN DEL MODELO CON EL NUEVO MALLADO

Con la modificación del mallado del dominio, el modelo debe ser recalibrado para reproducir correctamente la dinámica estuarina. La recalibración afecta básicamente a la magnitud y patrón de los coeficientes de fricción en distintos tramos del río como consecuencia del refinamiento de malla realizado en los subsidiarios y, en menor medida, del orlado del canal principal.

Previo al uso del modelo como una herramienta de predicción del espesor de la lámina de agua tomando en consideración las tres fuentes de variabilidad (objetivo de la Subtarea 3.3 y Actividad 4), las series de nivel y residuo meteorológico calculados han de ser validados con datos registrados en las observaciones. En el caso del Estuario del Guadalquivir, los datos para la validación son de nivel de la superficie en el río y corresponden a diversas estaciones que han sido recogidos por distintos mareógrafos y mantenidos por diversas instituciones: Puertos del Estado (PdE), Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) e Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). Sus ubicaciones, tipo e instituciones responsables se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos disponibles para la validación del nivel de la lámina de agua, incluyendo las instituciones responsables y tipo de mareógrafo proporcionado por las mismas, nombre de las estaciones adscritas, coordenadas geográficas y periodos de disponibilidad de los datos.

Institución y tipo de mareógrafo	Estación	Coordenadas		Periodo de tiempo
		Latitud	Longitud	
PdE Mareógrafo Radar (MIROS)	Bonanza	36° 48 08" N	06° 20 17" W	01/1992 - Actualidad
	Sevilla	37° 19 07" N	06° 00 28" W	01/1992 - 12/2010
	Sevilla2	37° 19 07" N	06° 00 28" W	01/2011 - Actualidad
CHG Mareógrafo Radar	Alcalá del Río	37° 31 05" N	05° 58 34" W	05/1999 - Actualidad
	Isla Cartuja	37° 23 31" N	06° 00 58" W	05/1999 - Actualidad
	Chipiona	36° 44 48" N	06° 25 46" W	09/2014 - 10/2017
IHM Mareógrafos de Sensor de Presión	Torre	36° 54 42" N	06° 16 24" W	05/2016 - 12/2017
	Lebrija	36° 55 19" N	06° 11 34" W	11/2015 - 12/2017
	Señuela	37° 01 43" N	06° 07 52" W	11/2015 - 12/2017
	Caseta	37° 05 47" N	06° 05 02" W	05/2016 - 12/2017
	Isla Mínima	37° 09 02" N	06° 06 08" W	05/2016 - 10/2017
	Riego	37° 13 27" N	06° 03 57" W	05/2016 - 12/2017
Mareógrafo Radar	Gelves	37° 20 23" N	06° 01 23" W	05/2016 - 11/2017

En tanto que los datos de Puertos del Estado y de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, abarcan periodos extensos de tiempo, los recogidos por el Instituto Hidrográfico de la Marina se concentran básicamente en los años 2016 y 2017, excepto el de Chipiona que también tiene datos del 2015. Esto obliga a hacer calibraciones y/o validaciones del modelo en los márgenes temporales del IHM, desestimando periodos más recientes y extensos. Sumado a esta limitación temporal, se ha comprobado que los registros del IHM presentan en, al menos alguna parte de su serie temporal, mediciones nulas (ausencia de datos), que complican su correcta validación con los datos modelados. La Figura 2 muestra la cobertura temporal de las observaciones usadas en este informe.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

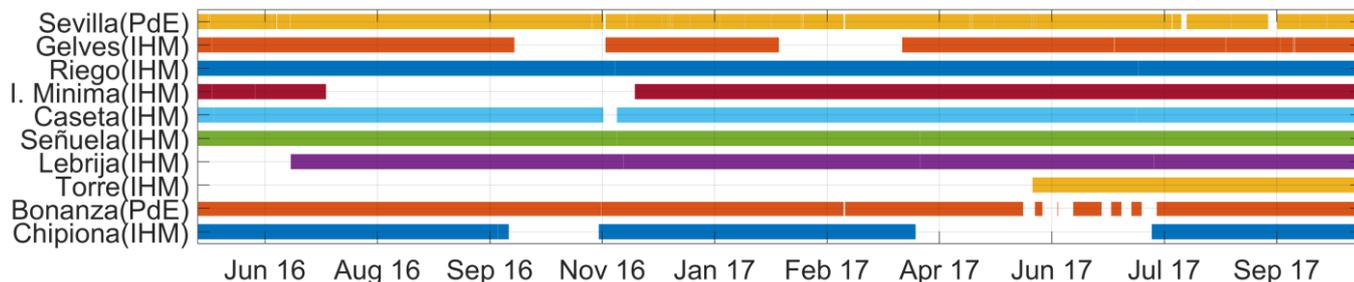


Figura 2. Cobertura temporal de las series de observaciones de las estaciones mareográficas procedentes de PdE, CHG y IHM. La gráfica está acotada entre mayo 2016 y octubre 2017, correspondiente al rango temporal de disponibilidad de datos del IHM, el conjunto de observaciones principalmente usado para las tareas de calibración del modelo.

Lo primero que se observa es la notable fragmentación de las series de datos del IHM. Si bien es cierto que algunas estaciones, como Señuela y Caseta, presentan muy breves o nulas interrupciones, otros registros, como los correspondientes a los mareógrafos de Torre, Isla Mínima o, en menor medida, Chipiona y Gelves, presentan muchos huecos, desde el 20% de datos nulos en Gelves hasta el 72% en Torre. Las series de PdE presentan interrupciones más moderadas.

Teniendo en cuenta la cobertura temporal de los registros reflejada en la Tabla 1 y Figura 2, el periodo de simulación escogido para la validación del modelo abarca un lapso de tiempo común a todas las observaciones, desde mayo de 2016 hasta octubre de 2017. El modelo se ha forzado en el contorno abierto con una señal mixta de nivel del mar, suma de la contribución astronómica y meteorológica. Por otro lado, con el fin de aislar el efecto de ambas contribuciones, las descargas de agua dulce no se han tenido en cuenta. En su lugar, se ha definido un régimen hidrológico constante en la presa de Alcalá del Río de 50m³/s. El nivel simulado, por tanto, reproduce el efecto conjunto de los forzamientos astronómicos y meteorológicos. El proceso de validación prevé aislar estas dos contribuciones tanto en los datos simulados como en las observaciones. Esta separación se realiza en tres fases: a) se realiza un análisis armónico de las series, obteniendo las constantes armónicas correspondientes (Pawlowicz et al., 2002), b) con éstas se reconstruye la predicción astronómica de la serie original y c) se resta la serie reconstruida a la original. Finalmente, a ambas series se les aplica un filtrado paso-bajo (Godin, 1972) con el objetivo de eliminar las oscilaciones residuales a escala mareal. El resultado de este proceso, es conocido como residuo meteorológico (explicado en detalle en el ST320). El mismo proceso es repetido en las series observadas, y los dos pares de series aisladas (predicción armónica y residuo) son comparadas mediante herramientas estadísticas.

En tanto que las salidas del modelo no presentan dificultades a la hora de realizar el análisis armónico, para el cálculo de la predicción astronómica a partir de las observaciones, es crucial verificar tanto la extensión como sobre todo la continuidad de las series (ver Figura 2). A pesar de su marcada fragmentación, en todas las estaciones se ha logrado identificar un periodo continuado de al menos 6 meses, que ha permitido separar correctamente las contribuciones de las especies diurnas, semidiurnas y de corto periodo, y las posibles modulaciones mutuas.

Previo al proceso de validación, se ha considerado oportuno realizar un análisis detallado de la calidad de los registros observados, tratándose éstos de forma conjunta o individual dependiendo de la atención que las estaciones requieran. Se describen a continuación brevemente los datos empleados en el proceso de calibración/validación.

Chipiona (IHM)

La serie temporal de la estación de IHM - Chipiona, ubicada en las inmediaciones de la desembocadura del Estuario, abarca desde septiembre de 2014 hasta octubre de 2017, siendo la estación de IHM con el periodo de disponibilidad de datos más extenso. La Figura 3 muestra el registro del nivel del mar observado frente a la serie

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

simulada por el modelo (forzado con marea meteorológica y astronómica), extraído en el nodo del mallado más cercano a la estación mareográfica.

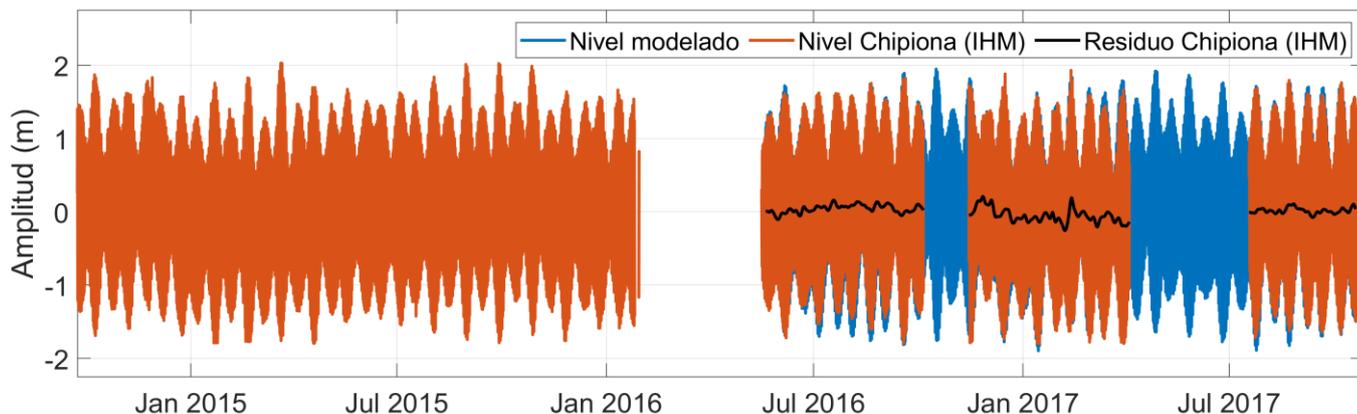


Figura 3. Serie de nivel del mar medido en el mareógrafo de Chipiona (línea naranja) y simulado (línea azul) en el periodo de tiempo septiembre 2014 - octubre 2017. También se muestra el residuo meteorológico de las observaciones (línea negra), calculado siguiendo el proceso detallado anteriormente.

Tras un primer periodo de algo más de un año de datos continuos, en febrero de 2016 se observa una interrupción de 4 meses. Sucesivamente, a partir de mayo 2016, el registro continúa durante el periodo escogido para calibración/validación con otras lagunas de distinta duración. Se ha hecho uso del primer tramo de la serie desde octubre de 2014 a enero de 2016 para la determinación de las constantes armónicas con las que calcular posteriormente el residuo en el periodo seleccionado. La validación se ha llevado a cabo en distintos intervalos dentro de dicho periodo (ver Sección 2.2).

Torre (IHM)

La serie temporal de la estación de IHM - Torre, ubicada en la bifurcación del Brazo de la Torre, presenta un intervalo de cobertura limitado a mayo de 2017 - diciembre de 2017. La Figura 4 muestra el registro de nivel del mar del mareógrafo de Torre y la serie simulada en el punto del mallado más cercano.

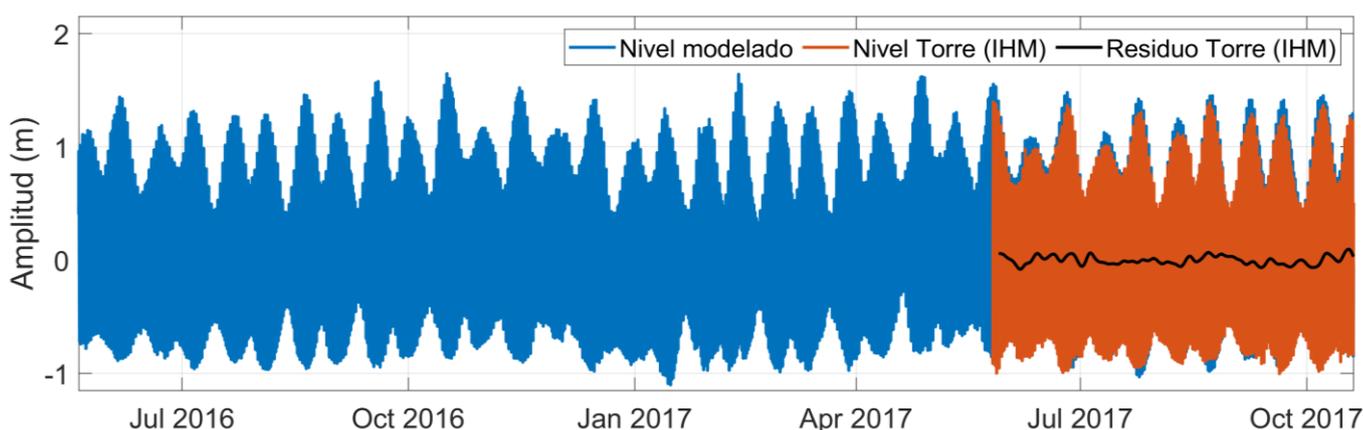


Figura 4. Como en Figura 3 para la estación de Torre - IHM.

La Figura 4 refleja la escasa disponibilidad de observaciones en el periodo de simulación (menos del 30%). A pesar de esto, en este tramo la serie no presenta discontinuidades y tiene una extensión suficiente (más de 6 meses) para realizar el análisis armónico. Aun así, hay que tener en cuenta que la significancia estadística de la validación efectuada en este periodo es inferior a la obtenida en el resto de las estaciones de procedencia IHM.

Isla Mínima

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

La serie temporal de la estación de IHM - Isla Mínima, ubicada en la parte intermedia del estuario, correspondiente al periodo de abril de 2016 a diciembre de 2017, requiere particular atención. La Figura 5 muestra las dos series observada y simulada para esta estación.

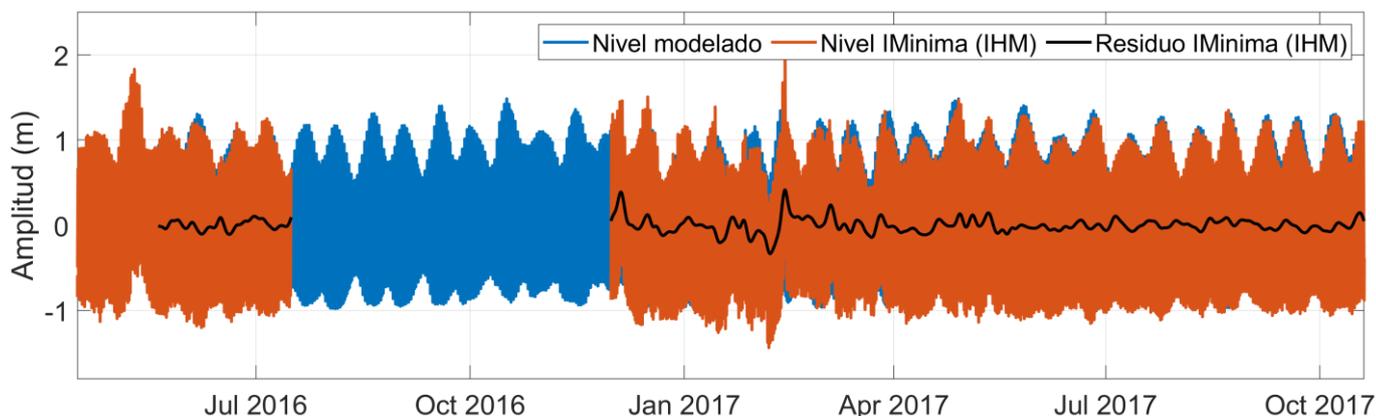


Figura 5. Como en Figura 3 para la estación de Isla Mínima - IHM.

La serie proporciona datos durante los primeros 3 meses de medición (de abril a julio de 2016). Sucesivamente presenta un hueco de 4 meses que inhabilita el uso de ese primer periodo válido para la ejecución del análisis armónico. Las observaciones retoman su continuidad a partir de diciembre de 2016 hasta el final de la serie temporal del mareógrafo, sin que se registren datos nulos. No obstante, de diciembre 2016 a abril 2017 se observa una tendencia negativa que se superpone a la aparentemente correcta oscilación mareal del registro, posiblemente debida a alguna deriva del sensor de presión. A partir de abril de 2017, esta tendencia es corregida, y la serie temporal adquiere de nuevo valores normales.

Con el objetivo de evitar que esta porción de datos proporcionara un sesgo sistemático en la validación, se ha corregido la deriva aplicando una regresión lineal al subconjunto de la serie y se ha restablecido su tendencia esperada. La Figura 6 muestra una ampliación del periodo afectado para una mejor visualización de la deriva presentada por los datos brutos (panel de la izquierda), y su posterior corrección (panel de la derecha).

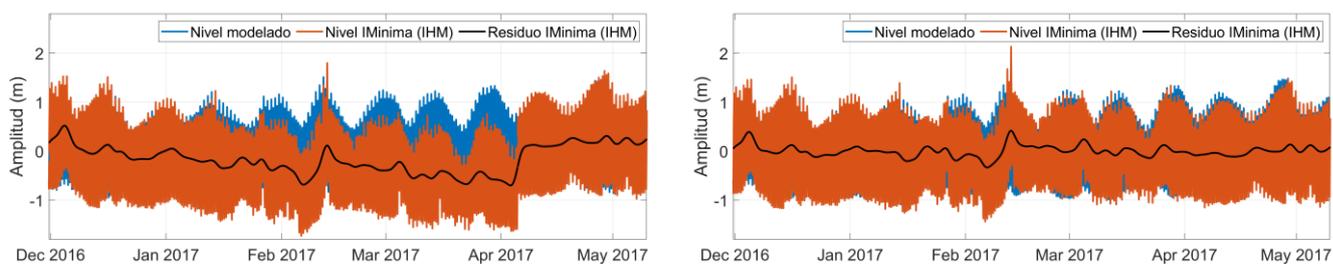


Figura 6. Serie de nivel del mar observada y simulada antes (panel izquierdo) y después (panel derecho) del procesado descrito en el párrafo anterior.

Gelves

El mareógrafo de Gelves, cuyo registro abarca de mayo de 2016 a octubre de 2017, es la única estación IHM que presenta un sensor de tipo radar. Estos instrumentos suelen usar intervalos de muestreo muy cortos, siendo más sensibles a oscilaciones de altas frecuencias, tanto naturales (e.g.: el oleaje), como de origen antrópica (tráfico marítimo, acción humana, etc.). La serie presenta un nivel de ruido mayor que las demás estaciones analizadas, siendo la naturaleza del sensor una de las posibles causas (Figura 7).

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

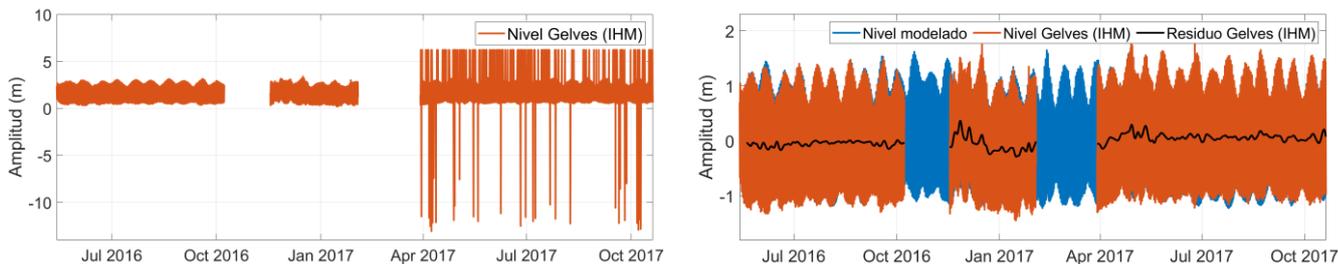


Figura 7. Serie de nivel del mar observada y simulada antes (panel izquierdo) y después (panel derecho) de la limpieza del registro del mareógrafo.

La serie de Gelves presenta un periodo estable y continuo de 6 meses al comienzo del periodo analizado. Desde octubre 2016 hasta abril 2017 se observan dos interrupciones de unos dos meses escasos cada una. Sucesivamente, a partir de abril de 2017, el registro presenta una serie de picos aislados (en muchos casos registros individuales - *spikes*), posiblemente debidos a fallos en la electrónica del sistema, que llegan a enmascarar completamente la señal mareal (panel izquierdo en la Figura 7). El procesado en este caso ha sido la eliminación directa de estos *spikes* y la reconstrucción de la serie mediante interpolación local cúbica (panel derecho de la Figura 7).

Lebrija (IHM), Señuela (IHM), Caseta (IHM), Riego (IHM)

Las estaciones mareográficas de Lebrija y Señuela (ambas correspondientes a las series temporales del noviembre de 2015 a diciembre de 2017) y Caseta y Riego (ambas correspondientes al periodo de abril de 2016 a diciembre de 2017), ubicadas en la parte intermedia del Estuario desde el canal posterior de la bifurcación del Brazo de la Torre, hasta el tramo posterior a la bifurcación del Brazo de Guadaira, representan las cuatro estaciones del IHM con mayor estabilidad y continuidad en sus series temporales de nivel. La Figura 8 muestra las series del modelo frente a los registros de los mareógrafos en las estaciones mencionadas.

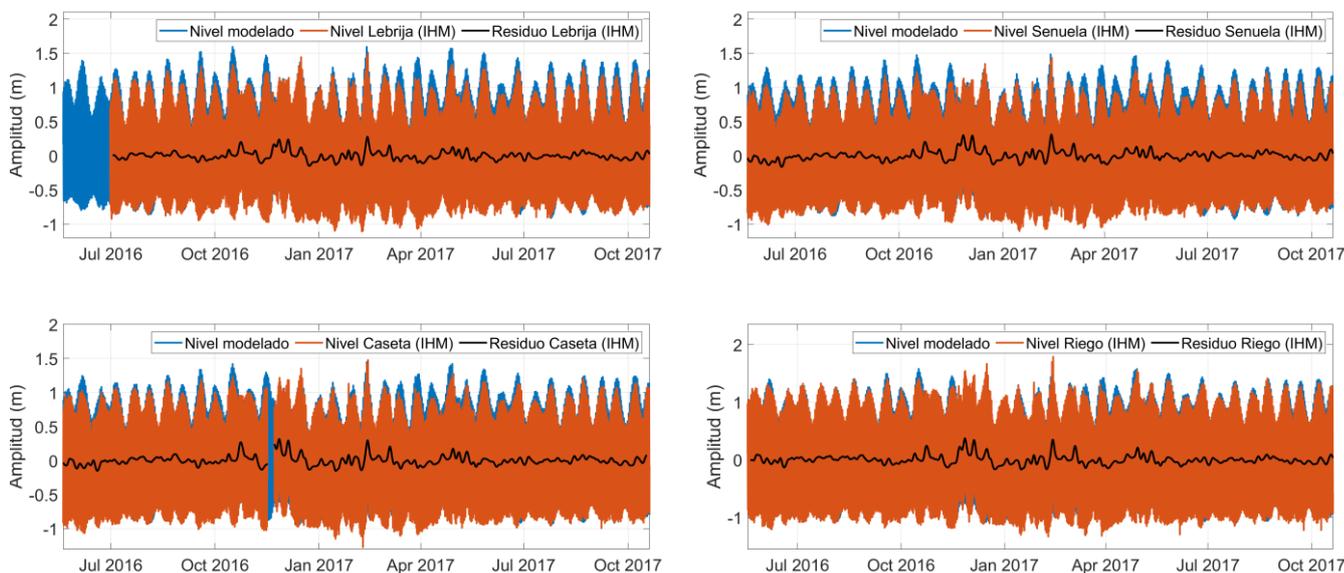


Figura 8. Como en Figura 3 para las estaciones de Lebrija (panel superior izquierdo), Señuela (panel superior derecho), Caseta (panel inferior izquierdo) y Riego (panel inferior derecho).

Los registros de estas estaciones no han precisado ningún tipo de tratamiento previo y se han empleado tal cual para las tareas de validación del modelo.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

Bonanza (PdE - REDMAR) y Sevilla (PdE - REDMAR)

Como ya se ha descrito en anteriores ocasiones, la Autoridad Portuaria de Sevilla, en colaboración con la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR), mantiene dos mareógrafos a lo largo del Estuario del Guadalquivir: Bonanza, en las inmediaciones de la desembocadura, y Sevilla, en el entorno de la Antecclusa. Ambas estaciones, actualmente en funcionamiento, fueron instaladas en 1992, siendo Sevilla sustituida por Sevilla2 en 2011. Esta amplia disposición de las series temporales, hacen de ellas referencias clave a la hora de la calibración y/o validación de un modelo numérico implementado en el cauce. Si bien es cierto que esta mayor extensión de los datos condiciona un cálculo de las constituyentes armónicas más significativo, la predicción astronómica se ha computado en el periodo de la simulación, para hacer de esta una estadística lo más comparable posible a los resultados del modelo. La Figura 9 muestra las series de nivel del mar medidas por ambos mareógrafos y calculadas por el modelo en los nodos más cercanos a ambas estaciones.

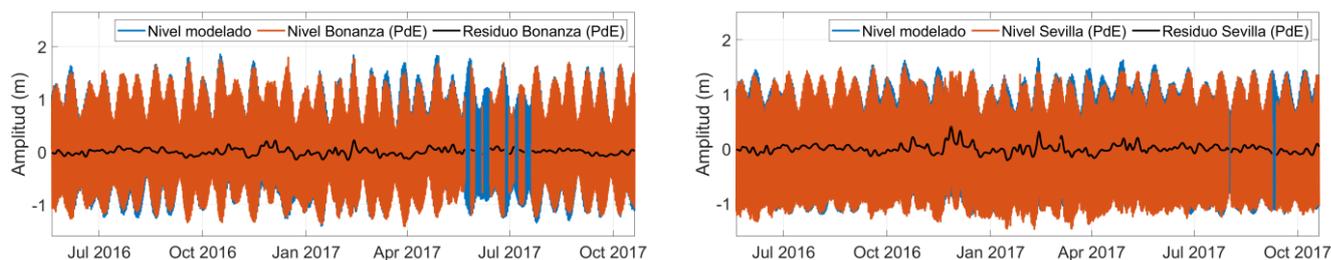


Figura 9. Como en Figura 3 para las estaciones de Bonanza (panel izquierdo) y Sevilla (panel derecho).

Las dos estaciones REDMAR muestran una elevada continuidad de las series de nivel, con huecos mucho menos significativos que las demás estaciones del IHM. Única incongruencia destacable es el periodo abril-2017 - agosto-2017 en Bonanza, que presenta una serie de breves discontinuidades. Para limitar la incertidumbre en el cálculo de las constituyentes armónicas en Bonanza, se ha considerado el periodo sometido al análisis armónico hasta abril de 2017. Con la predicción astronómica de Sevilla, en cambio, se ha empleado la serie temporal completa, interpolando la serie de nivel en los breves saltos que se observan en torno a agosto y septiembre de 2017.

2.1 Calibración/validación de la marea astronómica

La marea astronómica es el proceso dominante en todo el estuario y por ella se comienza. La Figura 10 muestra los valores de amplitud y fase de las constituyentes más importantes de cada especie, con su intervalo de error, evaluadas de las salidas proporcionadas por el modelo calibrado, y las constantes armónicas deducidas del conjunto de datos empleados para calibración. El intervalo temporal que se ha utilizado para la ejecución del análisis armónico, corresponde al periodo de la simulación (mayo 2016 - octubre 2017).

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

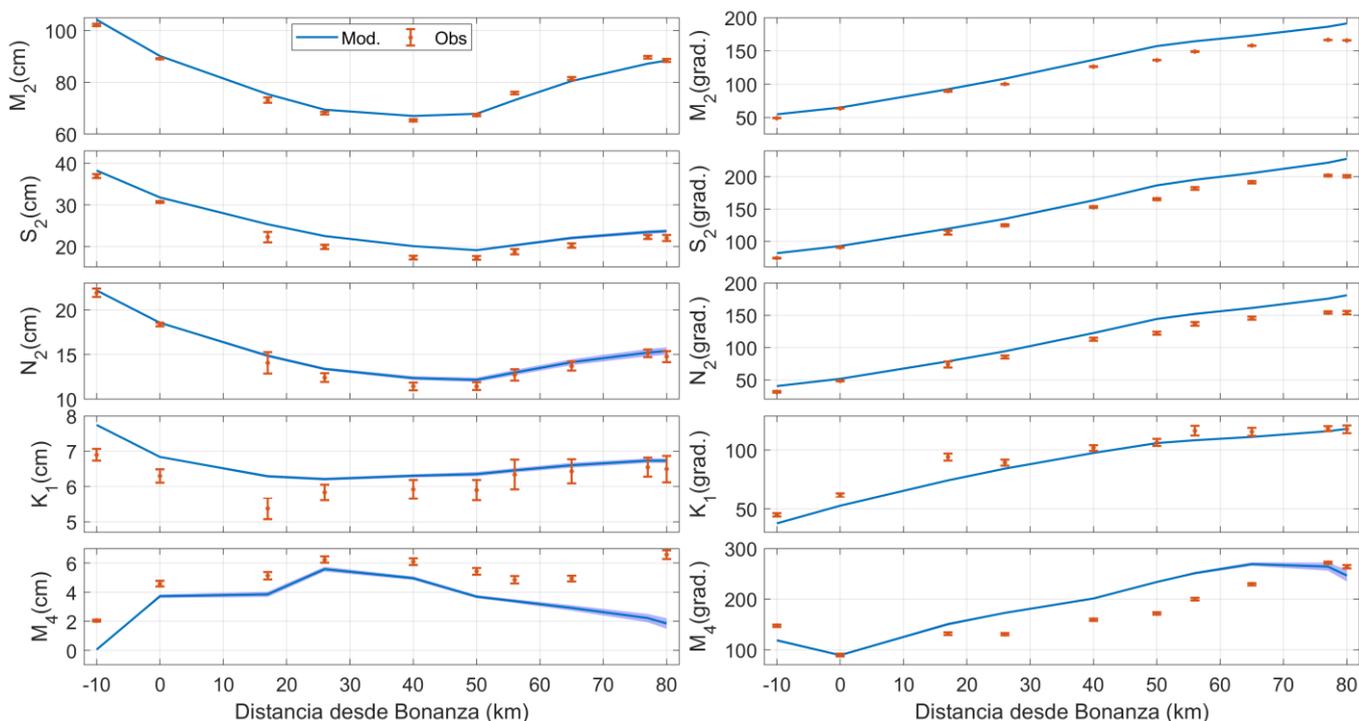


Figura 10. Constantes armónicas (amplitud en la columna izquierda y fase en la columna derecha) de las constituyentes principales calculadas en las observaciones (puntos naranjas) y en el modelo (línea azul). Los intervalos de confianza se representan como barras verticales en las observaciones y áreas sombreadas en el modelo.

La Figura 10 muestra, como es esperable, una mayor predominancia de la marea semidiurna, con una clara preponderancia de la constituyente lunar M_2 , la cual presenta una amplitud de ~ 1 m y explica, por sí sola, el $\sim 78\%$ de la varianza total. El perfil de amplitud de esta constituyente ilustra un patrón de variación en forma de “U” muy bien ajustado a las observaciones, con valores mínimos en la parte central del estuario y rangos mareales máximos en la cabecera y la desembocadura, tendencia que resulta esperable en relación con lo descrito en [Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga \(2019\)](#). Las diferencias medias no superan el 3%, unos 2 cm en términos absolutos. Las otras dos constituyentes semidiurnas, la componente solar principal S_2 y la componente lunar elíptica N_2 , que junto con la M_2 explican el 93 % de la varianza total (resultados muy coherentes con los citados en la literatura, [Ruiz et al., 2010](#)), presentan errores promedios ligeramente más elevados, en torno al 10% (notar los intervalos de confianza notablemente más elevados de las observaciones para la constituyente N_2). El patrón de las fases que se obtienen en estas constituyentes confirman la naturaleza progresiva de la onda de marea en dirección a la cabecera, siendo muy coherentes con las observaciones, y presentando el mejor ajuste en los primeros 40 km del estuario.

La constituyente diurna K_1 presenta una amplitud promedia entre 6 y 7 cm, considerablemente más baja que la obtenida en las componentes semidiurnas, y presenta una incertidumbre generalmente mucho mayor que las otras constituyentes. El ajuste de las constantes armónicas calculadas con los datos modelados es algo peor para esta constituyente, aunque el patrón de variación tanto de amplitud como de fase a lo largo del cauce se reproduce de forma muy satisfactoria.

Las constantes armónicas de la M_4 presentan amplitudes menores y fases mayores para el modelo, reflejando la propagación de una onda más pequeña y más lenta respecto a las observaciones. Hay que considerar que esta constituyente no está forzada en el contorno abierto del modelo, sino que es generada como resultado de la interacción no lineal entre las otras constituyentes. Además, las amplitudes son muy pequeñas (entre los 4 y 5 cm) y la varianza explicada por esta constituyente es de solo el 0.1%.

CONFIDENCIAL

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

2.2 Calibración/validación de la marea meteorológica

Tras la marea astronómica, la meteorológica es el siguiente fenómeno energético en la dinámica del estuario. Como se comentó en ST320, esta marea tiene dos contribuciones, una que se propaga a través de su desembocadura, de origen oceánico y forzada principalmente por el campo de presión atmosférica de macroescala que prevalece en el Golfo de Cádiz y Atlántico Nororiental próximo (las dimensiones del estuario son insuficientes para tener marea meteorológica propia causada por la presión) y por el de viento de macroescala en menor medida. La segunda contribución, de carácter local, es debida a la cizalla del viento (*wind-stress*) actuando sobre la superficie libre del río.

La primera de ellas se incorpora al modelo siguiendo el mismo procedimiento que la marea astronómica, es decir, prescribiéndose la oscilación de la superficie libre causada por la marea meteorológica oceánica en el contorno abierto. La segunda contribución se hace siguiendo el procedimiento estándar de transferencia de momento a través de la superficie originado por el *wind-stress*.

El modelo barotrópico NIVMAR (ver más detalles sobre él en ST320) proporciona la marea meteorológica oceánica en ese contorno abierto. La Figura 2 del ST320 muestra la estrecha relación entre la marea meteorológica y la presión atmosférica, confirmando ésta como la principal causante de aquélla. Por ello, la calibración/validación del modelo para la contribución meteorológica ha hecho uso de los datos proporcionados por el modelo NIVMAR.

Las estadísticas empleadas para comparar las series de residuos observados y simulados son el coeficiente de correlación de Pearson (ρ de aquí en adelante) y el error cuadrático medio. Las series observadas son las pre-procesadas según detallado en los párrafos anteriores. Los huecos en las observaciones de nivel descritos anteriormente, en algunos casos breves (e.g.: estaciones de Señuela - Figura 2 y Riego - Figura 8) y en otros más largos, como en los casos de Torre (Figura 4), Isla Mínima (Figura 5) y, en menor medida, Chipiona (Figura 3), obligan a calcular ρ en periodos discontinuos, lo que reduce la significatividad de los índices de correlación y aumenta el error cuadrático medio. Por ello, con el fin de proporcionar estimas más fiables, se han escogido subperiodos de la serie completa en los que se observa la mayor continuidad de las mediciones. La Tabla 2 refleja los índices obtenidos para cada periodo y subperiodo de tiempo en todas las estaciones analizadas.

Tabla 2. Las dos primeras columnas indican el RMS para las series observadas y modeladas (serie completa). Las siguientes columnas presentan el índice de correlación de Pearson (ρ) y el error cuadrático medio (RMSE) calculados entre las series observadas y la modelada en los nodos más cercanos a las estaciones mareográficas de procedencia IHM (superíndice ¹) y PdE (superíndice ²). Ambas estadísticas se calculan tanto para el periodo completo de tiempo (mayo 2016 - octubre 2017 - 518 días) como para los subperiodos de cada estación, escogidos individualmente según la mayor cobertura de datos válidos. En cada estación se especifica la porción de serie escogida, en días y porcentaje.

	RMS (cm)		Serie completa		Subperiodo		
	Mod.	Obs.	ρ	RMSE (cm)	Periodo - días (%)	ρ	RMSE (cm)
Chipiona ¹	4.7	8.3	0.74	5.6	140 (27%)	0.84	5.3
Bonanza ²	4.7	6.1	0.78	3.9	367 (71%)	0.80	4.1
Torre ¹	4.6	3.7	0.50	3.2	146 (28%)	0.49	3.2
Lebrija ¹	4.5	6.2	0.77	4.0	478 (92%)	0.77	4.0
Señuela ¹	4.5	6.9	0.67	5.1	518 (100%)	0.67	5.1
Caseta ¹	4.5	7.0	0.70	5.0	333 (64%)	0.71	5.2
I. Mínima ¹	4.5	8.4	0.58	6.8	290 (56%)	0.69	4.4
Riego ¹	4.5	7.8	0.71	5.5	518 (100%)	0.72	5.7
Gelves ¹	4.4	10.2	0.72	7.2	204 (39%)	0.68	4.8
Sevilla ²	4.4	8.0	0.70	5.7	437 (84%)	0.71	5.9

Las series de residuo meteorológicos presentan típicamente un promedio nulo, o aproximadamente nulo, y cierta amplitud dependiente de la distancia de la fuente de forzamiento (el océano abierto). En estos casos, el RMS de estas señales es un buen indicador de su amplitud, y puede servir como ulterior herramienta de

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

comparación entre datos observados y modelados. Como es esperable, el modelo presenta valores de RMS de las series generalmente menores que las observaciones, reflejo del suavizado impuesto por las propias limitaciones numéricas y, en parte, por la falta del forzamiento impuesto por las descargas. La Tabla 2 muestra unas subestimaciones promedias del 30% del modelo con respecto a las observaciones.

En general las correlaciones son muy elevadas. Con la excepción de la estación de Torre e Isla Mínima, los valores se sitúan todos por encima de 0.70, reflejando una muy buena performance del modelo en la reproducción del efecto de la marea meteorológica.

En la práctica totalidad de los casos, la selección del subperiodo de máxima validez de las observaciones mejora las estimas de correlación. Hace excepción (mínima) la estación de Gelves que pasa de una correlación de 0.72 en la serie completa a 0.68 en el subperiodo. Muy posiblemente la comparación sufre la presencia de ruido residual, aun después de haber sido sometida la serie al procesado de limpieza de los *spikes* mencionado anteriormente. Cuanto más larga la serie, mayor es el efecto de cancelación mutua del ruido, y por tanto la selección de un periodo más corto, en este caso empeora la performance del modelo. Es claramente un caso aislado, reflejo de datos más ruidosos.

Los índices máximos para los subperiodos de tiempo (alrededor de 0.8) se alcanzan en las estaciones de Chipiona (IHM) y Bonanza (PdE), considerando subperiodos del 27% y 71% de la serie respectivamente. Como se ha mencionado anteriormente, las largas interrupciones que se observan en Chipiona (Figura 3) perjudican el cálculo de la correlación en la serie completa, y plantean la necesidad de correlacionar las dos series en cada subperiodo de tiempo individualmente. La Figura 11 muestra la serie del residuo meteorológico registrado en Chipiona frente al residuo meteorológico calculado por el modelo en el nodo más cercano a la estación.

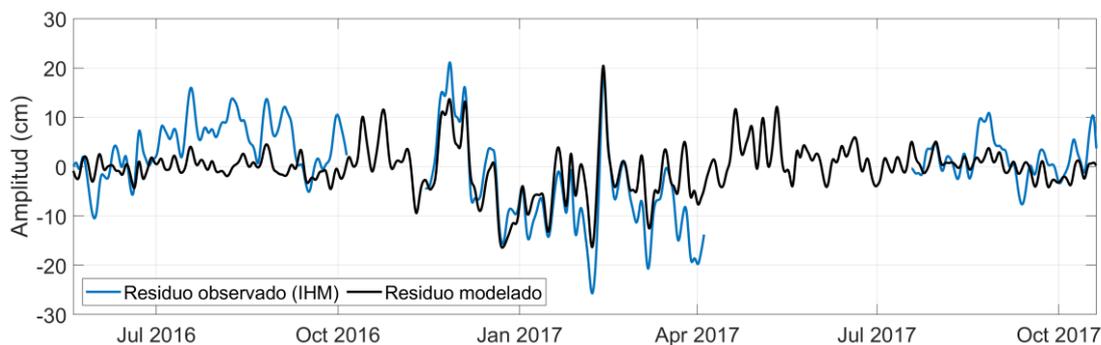


Figura 11. Serie del residuo del nivel del mar medido por el mareógrafo de IHM - Chipiona (azul) frente a la serie de residuo modelada (negro) en el periodo mayo 2016 - octubre 2017 en el nodo del dominio más cercano a la estación.

El periodo válido más largo en el caso de Chipiona es el central, del 14 de noviembre de 2016 al 4 de abril de 2017, cubriendo un 27% de la serie completa (Figura 11). El coeficiente de correlación mejora de 0.74 a 0.84.

La Estación de Torre únicamente muestra datos válidos en los últimos meses de la serie (Figura 4), concretamente, del 26 de mayo de 2017 al 20 de octubre de 2017, lo cual supone un 28% del periodo de la simulación. Por tanto, el índice de correlación entre la serie completa y la subserie de tiempo no varía. Este resultado es el que también se observa en la estación de Lebrija (Figura 8), cuyo periodo de datos se concentra en una serie seguida del 30 de junio de 2016 al 20 de octubre de 2017 y, por ello, el índice de correlación de ambas pruebas no varía.

Teniendo en cuenta la deriva observada en la estación de Isla Mínima (Figura 5 y Figura 6), la correlación se ha llevado a cabo con dos subperiodos de prueba. La primera de ellas considera únicamente el periodo de tiempo estable posterior a la tendencia, del 4 de marzo de 2017 al 20 de octubre de 2017 (234 días), el cual da como resultado una correlación de 0.64, resultado que mejora considerablemente en comparación con el residuo calculado con la serie completa sin procesar (0.53). La segunda, contempla también el periodo de deriva corregido

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

abarcando del 1 de enero de 2017 al 20 de octubre de 2017 (290 días). Esta ampliación de la serie de tiempo mejora ulteriormente el índice de correlación a 0.66 y reduce el error cuadrático medio.

Debido al salto temporal observado en el mareógrafo de Caseta (Figura 8), la serie temporal de esta estación se contempla al 64%, desde el 22 de noviembre de 2016 al 19 de octubre de 2017. Esto mejora mínimamente el índice de correlación de 0.70 a 0.71. Por otro lado, las estaciones de Señuela y Riego, por su continuidad y ausencia de huecos temporales apreciables, se han considerado al 100%, obteniendo un índice de correlación de 0.67 y 0.71 respectivamente. La Figura 12 muestra las series del residuo calculadas en las estaciones de Señuela y Riego en el intervalo temporal de la simulación.

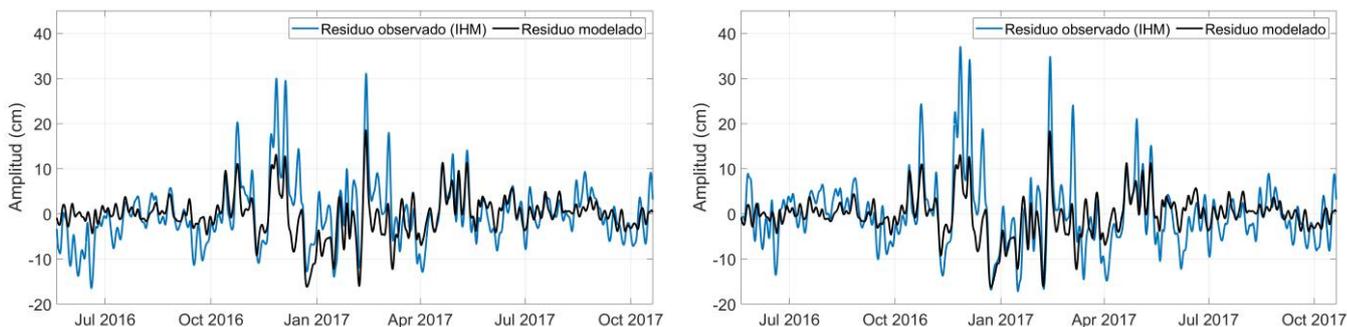


Figura 12. Como en Figura 11 para las estaciones de Señuela (panel izquierdo) y Riego (panel derecho).

Lo primero que se observa en la Figura 12 es la mayor variabilidad del residuo observado por el mareógrafo con respecto al modelado. De ambas, llama la atención la mayor variabilidad que se observa en la estación de Riego con respecto a la de Señuela, resultado esperable teniendo en cuenta la mayor cercanía de la estación de Riego a la Antecclusa y, por tanto, la mayor influencia de las descargas de agua dulce procedentes de la presa de Alcalá del Río. Esto hace que el error cuadrático medio en Riego sea ligeramente superior al de Señuela (5.7 y 5.1 cm, respectivamente).

Del mismo modo que Bonanza, Sevilla refleja un índice de correlación relativamente elevado, pero sin cambios significativos entre el periodo completo y el subperiodo escogido, debido a la mayor estabilidad en la serie temporal del mareógrafo de Sevilla con respecto al de Bonanza, especialmente en la época de la simulación (ver Figura 9). La Figura 13 muestra la validación de ambas estaciones.

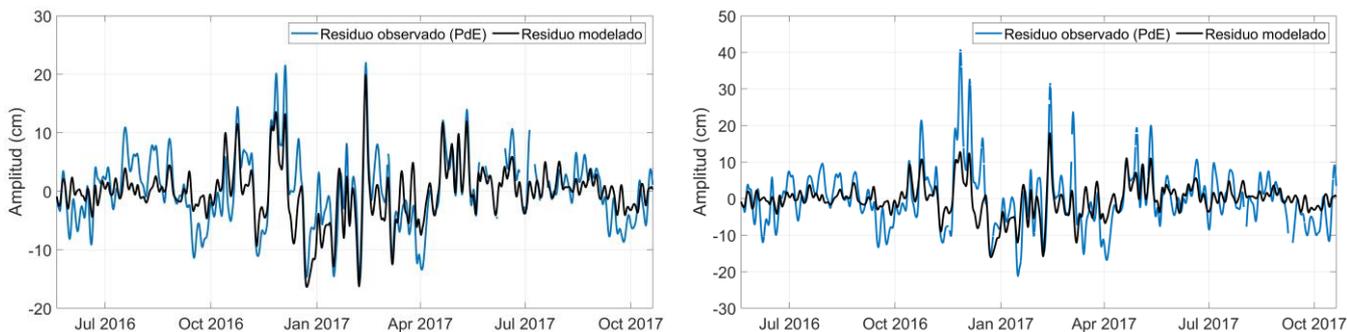


Figura 13. Como en Figura 11 para las estaciones de Bonanza (panel izquierdo) y Sevilla (panel derecho).

La comparación de las series reflejadas en la Figura 13 muestra generalmente una mayor discrepancia entre observaciones y el residuo modelado en Sevilla (desviación estándar de 8 cm y 4.4 cm respectivamente) con respecto a Bonanza (desviación estándar de 6.1 cm y 4.7 cm respectivamente), lo que también se refleja en el error cuadrático medio (5.85 cm en Sevilla frente a 4.05 cm en Bonanza). En ambos casos, las mayores fluctuaciones se observan en los datos observados, lo que se asocia a una subestimación de los residuos modelados, diferencia que resulta esperable en relación con lo descrito en el ST320. La disminución de la propagación de la

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

marea en dirección a la Antescclusa y la mayor influencia de otros factores no atmosféricos que pueden variar el nivel, como las descargas de agua dulce, justificarían este peor rendimiento del modelo en Sevilla.

2.3 Calibración/validación de las descargas de agua dulce

En este último proceso de validación, el modelo se ha forzado con todas las contribuciones, astronómica, meteorológica y descargas y las salidas producidas se han procesado adecuadamente para extraer la parte que interesa, que ahora es la debida a las descargas. Es una tarea sencilla porque las dos primeras, calculadas y analizadas en el apartado anterior, se eliminan inmediatamente mediante simple sustracción. La mayor parte de las descargas de agua dulce tienen lugar en la presa de Alcalá del Río, aunque también pueden provenir de otros subsidiarios como el Ribera de Huelva (Gergal, de aquí en adelante), represado unas decenas de kilómetros aguas arriba de la confluencia con el Guadalquivir, o el Brazo de la Torre (Aznalcázar, de aquí en adelante), en situación parecida.

Para proceder a la validación se ha recopilado información sobre las descargas de agua dulce. La Tabla 3 muestra las estaciones de la CHG de las que se dispone series de caudal y algunas estadísticas utilizadas para describir su distribución.

Tabla 3. Datos de las cuencas vertientes de la CHG disponibles, incluyendo el nombre de las estaciones, las coordenadas geográficas, el periodo de disponibilidad de los datos. Para el caudal se indica el valor medio (μ) y desviación típica (std), y el percentil 95 (P95) y rango intercuartílico (IQR) de los aportes (columna 5).

Presas (CHG)	Coordenadas		Periodo de tiempo	μ	std	Me	IQR	Máx.
	Latitud	Longitud						
Alcalá del Río	37° 31 05" N	05° 58 34" W	12/1995 - Actualidad	480.6	9631.6	32.8	38.5	278975
Gergal	37° 34 01" N	06° 02 56" W	09/2009 - Actualidad	6.1	26	0.6	2.9	829.9
Guadaira	37° 21 40" N	05° 54 15" W	12/2006 - Actualidad	1.3	8.1	0.4	0.7	270.2
Aznalcázar	37° 18 10" N	06° 15 35" W	12/2006 - Actualidad	3.8	13.9	0.2	1.1	178.5
Isla Mínima	37° 09 10" N	06° 06 12" W	06/1999 - Actualidad	3.9	7.9	0	1.8	43.6
Isleta	37° 14 09" N	06° 03 54" W	12/2006 - Actualidad	0.4	0.8	0	0	16.2
Moriscos	37° 13 03" N	06° 04 31" W	12/2006 - Actualidad	0.3	0.5	0	0.3	2.4
Mármol	37° 10 13" N	06° 06 25" W	12/2006 - Actualidad	2.1	3.9	0	2.2	70.3
Queipo	37° 06 08" N	06° 05 14" W	12/2006 - Actualidad	2.1	4.6	1.8	1.8	33.4
Ermita	37° 05 55" N	06° 08 59" W	06/2017 - Actualidad	2.6	5.6	0	0.6	20

A priori, el promedio aritmético y la desviación típica deben ser suficiente para describir la distribución de una serie simétrica, informando sobre su centralidad y dispersión. Sin embargo, estas series presentan típicamente valores de regímenes hídricos mínimos durante la mayor parte del tiempo, y eventos aislados de caudales mucho más elevados más o menos concentrados en las estaciones más lluviosas, determinando distribuciones muy asimétricas. De ahí que, además de las métricas clásicas se proporcionen otras más apropiadas para una caracterización estadística más precisa.

La Figura 14 muestra la evolución temporal de la serie de caudal de la presa de Alcalá del Río en el periodo diciembre 1995 - octubre 2019.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

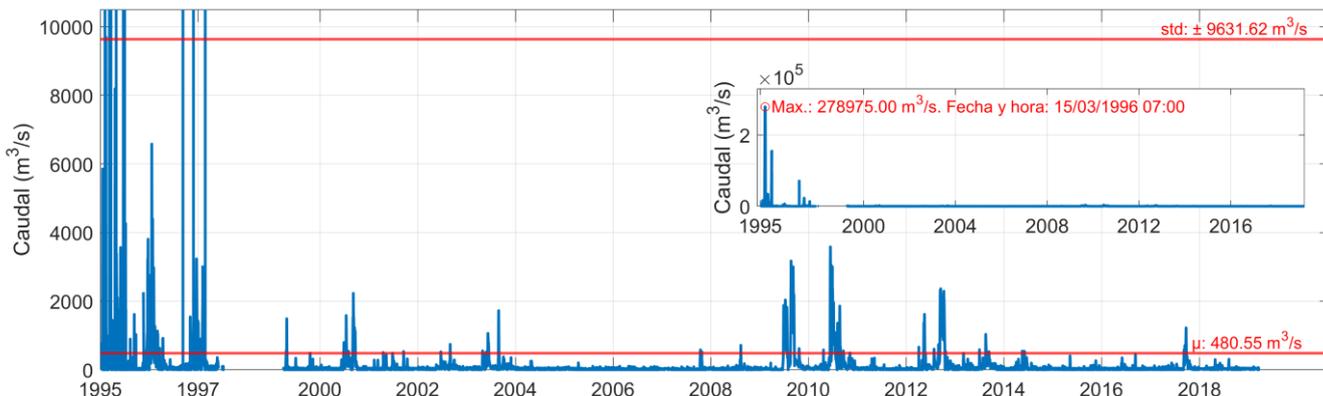


Figura 14. Serie de caudal de la presa de Alcalá del Río en m^3/s en el periodo temporal comprendido entre diciembre de 1995 y octubre de 2019. Las líneas rojas muestran los valores de promedio (μ) y desviación típica (std) del caudal. El eje de las ordenadas se ha recortado para mejorar la visualización de la gráfica. Recuadro: serie completa y su valor máximo absoluto (círculo rojo).

La serie comienza a principios de 1996, con un largo periodo de abundantes descargas, alcanzando un máximo de 2.8×10^5 el 15 de marzo de ese mismo año (ver recuadro en Figura 14). Es evidente que el valor promedio de la serie ($\sim 480 m^3/s$) no es representativo del régimen medio de la presa, y su desviación típica ($\sim 10.000 m^3/s$) dice muy poco sobre su variabilidad temporal: ambos valores son muy sobrestimados respecto a lo observado en la gráfica.

La Figura 15 muestra la función de distribución acumulativa empírica (ECDF) de la misma serie, donde se puede apreciar su marcada asimetría (notar la escala logarítmica de las abscisas).

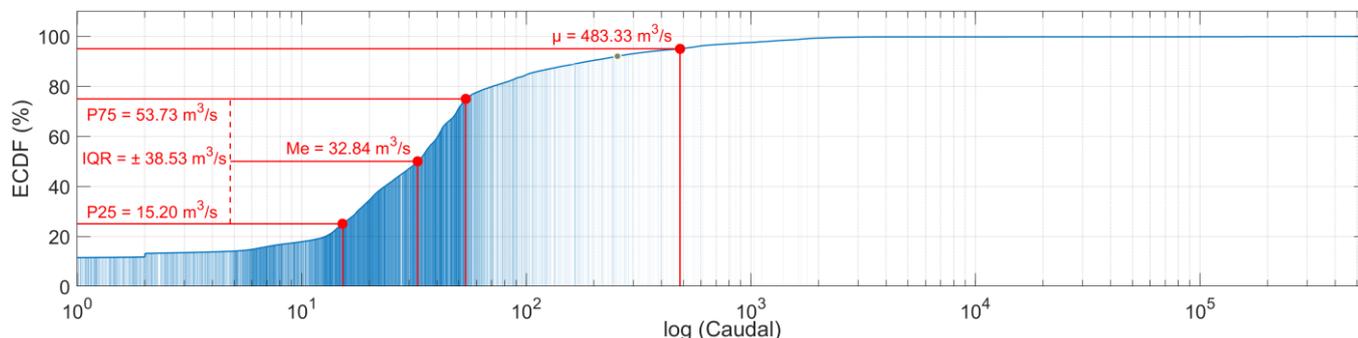


Figura 15. Distribución acumulativa empírica (ECDF) de la serie de caudal de Alcalá del Río. En rojo se muestran las posiciones y valores de los 25 y 75 percentiles, el promedio (μ), la mediana (Me) y el rango intercuartílico IQR.

El valor promedio corresponde aproximadamente al percentil 95 de la distribución, confirmando su marcada sobrestimación como medida de centralidad. En cambio, la mediana (50 percentil: $\sim 33 m^3/s$) y el rango intercuartílico (del percentil 25 al 75: $15 - 54 m^3/s$, aproximadamente) describen satisfactoriamente la distribución real del caudal. El valor del caudal ecológico de la presa, en torno a $50 m^3/s$, corresponde aproximadamente al percentil 71, confirmando que durante casi tres cuartos del tiempo, la presa se encuentra proporcionando un caudal por debajo de este valor.

Esta situación se repite en todas las estaciones contempladas en la Tabla 3, siendo el régimen mediano de Alcalá del Río aproximadamente dos órdenes de magnitud superior al de las presas de Guadaira, Gergal, Aznalcázar y Queipo. Esto confirma que son las descargas de la presa principal las que proporcionan la mayoría de los aportes en el estuario. Es interesante notar como las medianas de las estaciones de Isla Mínima, Isleta, Moriscos, Mármol y Ermita, que corresponden al valor cero, reflejan el hecho de que las esclusas correspondientes permanecen cerradas la mayor parte del tiempo, y se abren solo esporádicamente para paliar excesivas afluencias de agua durante episodios de lluvias, o hacer frente a las operaciones de riego de los arrozales.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

Como se ha hecho hincapié en anteriores ocasiones, y como también se refleja en la Figura 14, las descargas de agua dulce en el río por parte de las presas de la CHG no son aportes de forma constante, sino que son efectuadas de forma variable en el tiempo según se requiera, ya sea por causas meteorológicas puntualmente poco favorables para el espesor de la lámina de agua y, por tanto, para la navegación, por aumentos en los sólidos de suspensión o, más comúnmente, como consecuencia de los periodos de inundación de los arrozales, entre otras condiciones. Esto hace que la tendencia estacional de las descargas no sea fácilmente predecible a corto-medio plazo. La Figura 16 muestra la evolución temporal del caudal de la presa de Alcalá del Río acumulado en trimestres.

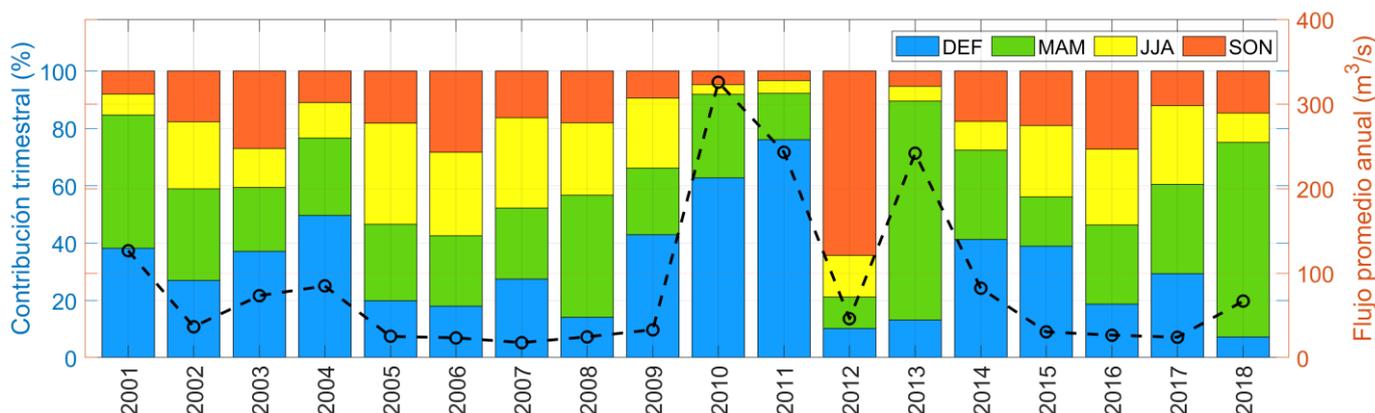


Figura 16. Eje izquierdo (azul): Distribución proporcional anual y su evolución temporal (desde 2001 hasta 2018) del caudal trimestral acumulado en la presa de Alcalá del Río. Se muestran los trimestres Diciembre-Enero-Febrero (DEF) en color azul, Marzo-Abril-Mayo (MAM) en verde, Junio-Julio-Agosto (JJA), en amarillo, y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON) en naranja. Eje derecho (naranja): Caudal promedio (línea discontinua negra).

La Figura 16 refleja la distribución irregular de los aportes de agua dulce a lo largo del año. Generalmente los trimestres que más flujo de agua proporcionan son los de invierno (DEF) y primavera (MAM), con una contribución promedio del 31,5% y 32,3%, respectivamente (total ~64%). Los otros dos trimestres (verano y otoño) contribuyen en promedio en un 18,4% y 17,8%, respectivamente. La razón está en la mayor probabilidad de episodios de lluvia o inundaciones durante los primeros dos trimestres, que causan los aportes de agua dulce más intensos. Durante el resto del año los flujos mayores son episódicos y relacionados prevalentemente con exigencias agrícolas de la cuenca del Río Guadalquivir.

Esta desigual distribución del caudal trimestral a lo largo del año es tanto más marcada cuanto más elevado es el caudal promedio. Véanse por ejemplo los años 2010, 2011 y 2013, en los que se alcanzan los valores máximos de la serie (caudal promedio >250 m³/s). En esos años la contribución de los dos trimestres DEF y MAM se mantiene alrededor del 90%, con mayor importancia del trimestre DEF en 2010 y 2011 y del MAM en 2013. Son años caracterizados por inundaciones invernales o primaverales muy intensas, durante las cuales la presa ha experimentado caudales muy elevados. En cambio, los años 2005-2007 son ejemplos de caudal promedio muy limitado (~20 m³/s), lo cual refleja una redistribución uniforme de las contribuciones trimestrales.

Del mismo modo que con la calibración/validación astronómica y meteorológica, la implementación en el modelo numérico de los aportes de agua dulce procesados hasta el momento, requiere de un análisis previo de los registros proporcionados en el periodo de simulación, con el fin de facilitar la interpretación del residuo meteorológico. En este caso, el periodo escogido para la simulación forzada con descargas coincide con la de los apartados anteriores, con el mismo fin de validar los resultados obtenidos con las observaciones del IHM. La Figura 17 muestra la evolución temporal de las descargas de agua dulce efectuadas por las presas de la CHG en el periodo de simulación.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

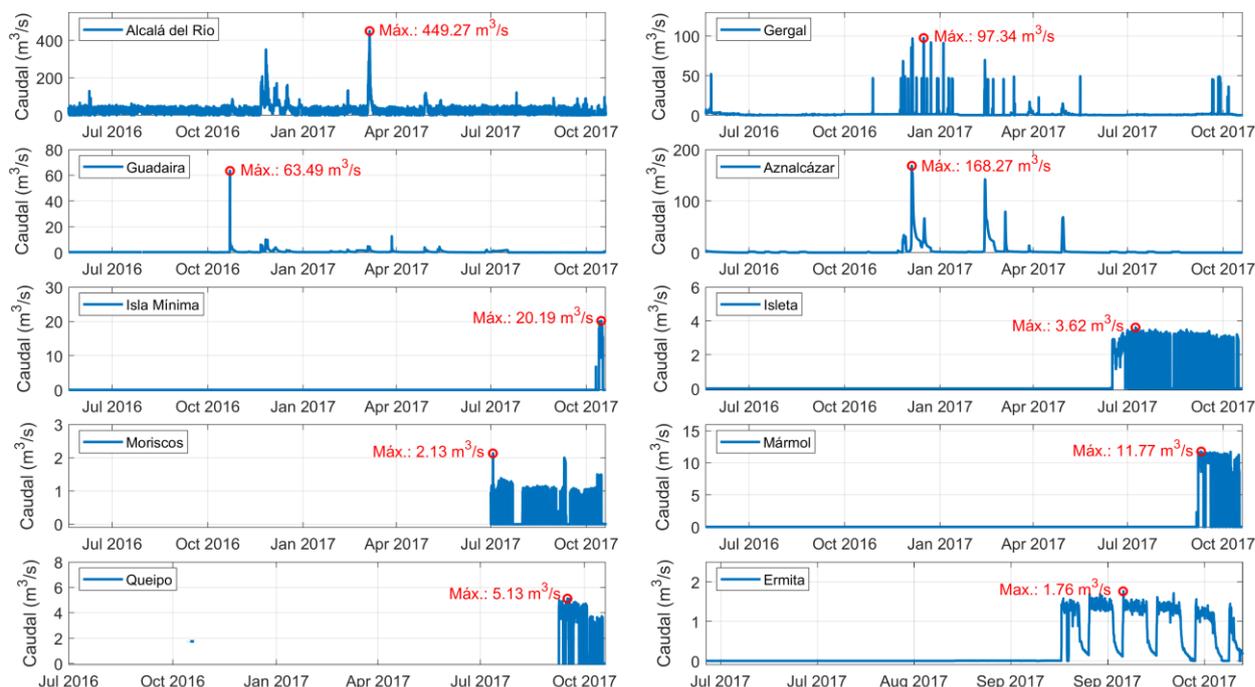


Figura 17. Evolución temporal de los caudales (línea azul) y aporte máximo registrado (rojo) en las 10 cuencas vertientes de la CHG consideradas en la simulación (Alcalá del Río, Gergal, Guadaira, Aznalcázar, Isla Mínima, Isleta, Moriscos, Mármol, Queipo y Ermita). Todas las presas se muestran en el periodo temporal de la simulación excepto Ermita, cuya cobertura temporal únicamente abarca desde junio 2017 hasta octubre 2017.

Como era de esperar, la presa de Alcalá del Río presenta caudales de uno o varios órdenes de magnitud mayores que el resto de las cuencas vertientes. Además de ello, esta presa es la única de las 10 contempladas que mantiene un caudal de agua casi constante en el periodo de la simulación, con una mediana e IQR en el periodo contemplado de $23.3 \pm 29.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y un valor máximo de $449.3 \text{ m}^3/\text{s}$, alcanzado el 06/03/2017 a las 04:00. Las presas de Gergal, Aznalcázar y Guadaira, por su parte, suponen los tres mayores aportes en importancia después de la anterior, con una mediana e IQR de $0.7 \pm 1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.6 \pm 1.4 \text{ m}^3/\text{s}$, y $0.3 \pm 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y aportes máximos de $97.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (alcanzado el 16/12/2016 a las 08:00), $168.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (alcanzado el 04/12/2016 a las 21:00), y $63.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (alcanzado el 22/10/2016 a las 13:00), respectivamente. En el resto de los puntos de control, las distribuciones de los caudales son más esporádicas y el aporte es considerablemente menor. Destacable es la diferente estacionalidad de los picos: la mayor parte de las presas concentran las descargas en invierno y primavera, y la totalidad de ellas presenta picos en torno a octubre 2017. Sin embargo, las presas de Moriscos e Isleta presentan picos relativamente altos en el verano de 2017, índice de un causante distinto del que rige el resto de las presas.

Igual que las usadas en la validación meteorológica, las estadísticas empleadas para comparar las series de residuos observados (IHM y PdE) con los simulados en presencia de descargas de agua dulce son el coeficiente de correlación de Pearson (ρ) y el error cuadrático medio (rmse). La Tabla 4 refleja los índices obtenidos con la simulación forzada con el residuo meteorológico y las descargas presentadas en la Figura 17, comparados con los obtenidos en la simulación forzada únicamente con el residuo meteorológico y el caudal ecológico de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ de la presa de Alcalá del Río, con el fin de analizar la posible mejora en la performance del modelo.

Tabla 4. Índices de correlación de Pearson (ρ) y error cuadrático medio (rmse) obtenidos entre las estaciones mareográficas de procedencia IHM (superíndice ¹) y PdE (superíndice ²) en la simulación forzada únicamente con el residuo meteorológico y régimen hídrico constante (campo "Simulación con caudal ecológico constante") y en la simulación forzada con residuo meteorológico y descargas reales (campo "Simulación con descargas reales"). Ambos coeficientes se han calculado en base a los subperiodos de tiempo escogidos para la Tabla 2, a excepción de Gelves, cuyo índice de correlación se ha calculado en base al periodo completo de tiempo por los motivos expuestos anteriormente.

CONFIDENCIAL

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

	Simulación con caudal ecológico constante		Simulación con descargas reales	
	ρ	RMSE (cm)	ρ	RMSE (cm)
Chipiona ¹	0.84	5.3	0.84 (0%)	5.3 (0%)
Bonanza ²	0.80	4.1	0.80 (+0.9%)	4 (-1.5%)
Torre ¹	0.50	3.2	0.51(+3%)	3.2 (-1%)
Lebrija ¹	0.77	4.0	0.79 (+3.3%)	3.7 (-4.8%)
Señuela ¹	0.67	5.1	0.71 (+6.6%)	4.8 (-5.6%)
Caseta ¹	0.71	5.2	0.78 (+9.3%)	4.6 (-10.6%)
I. Mínima ¹	0.69	4.4	0.71 (+3.4%)	4.4 (-0.8%)
Riego ¹	0.72	5.7	0.82 (+12.9%)	4.8 (-16.3%)
Gelves ¹	0.72	4.8	0.74 (+3.1%)	4.7 (-1.8%)
Sevilla ²	0.71	5.9	0.83 (+16.8%)	4.6 (-20.4%)

En casi la totalidad de las estaciones los índices de correlación obtenidos con la simulación forzada con descargas reales mejoran la estima entre el residuo observado y el residuo modelado. Con la excepción de Chipiona y Bonanza, ubicadas a una distancia considerable de las fuentes de aporte de agua dulce. La mayoría de los valores se sitúan entre 0.70 y 0.80, reflejando muy buenas performances del modelo en la reproducción del efecto conjunto de marea meteorológica y las descargas de agua dulce en el cauce.

El porcentaje de mejora en la estima de los índices, está directamente correlacionado con la ubicación de las presas en el cauce. La cercanía existente entre las presas de Alcalá del Río y Gergal y las estaciones de Sevilla (PdE) y Riego (IHM), a su vez influenciadas por las presas de Guadaira e Isleta, respectivamente, hace que estas estaciones mejoren la estima de su índice en un 16.8% y 12.9% y reduzcan el error cuadrático medio en un 20.4% y 16.3% respectivamente, porcentajes que resultan considerablemente satisfactorios en comparación con los obtenidos con la simulación forzada únicamente con el residuo meteorológico.

Gelves (IHM), ubicada en las inmediaciones de las presas mencionadas, también mejora la estima de su índice y reduce el rmse, aunque solo lo hace en un 3.1% y 1.8%, respetivamente. Conviene recordar que esta estación presenta un ruido residual (Figura 7), que puede ser la causa de esta excepción. En Isla Mínima, la mejora en los porcentajes del índice de correlación y el rmse, tampoco es especialmente significativa (3.4% y 0.8% respectivamente), posiblemente debido al procesado y alteración aplicada en la serie de nivel (Figura 5 y Figura 6). Por otro lado, las estaciones de Caseta (IHM), Señuela (IHM) y Lebrija (IHM), ordenadas por su ubicación desde la parte alta del río en dirección a la desembocadura, son un indicador de la reducción en la mejora del índice de correlación conforme la estación se aleja de la cabecera y, por tanto, de las presas de agua dulce más relevantes. Caseta, que es la más cercana a la cabecera, mejora la estima del índice de correlación y reduce el error en un 9.3% y 10.6% respectivamente, valores que se asemejan a las estimas obtenidas para las estaciones de Sevilla y Riego. Señuela y Lebrija, aunque también mejoran su estima, lo hacen de forma progresivamente más reducida, mejorando el índice en un 6.6% y 3.3% y el rmse en un 5.6% y 4.8% respectivamente. La estación de Torre (IHM), ubicada en el comienzo de la bifurcación del Brazo de la Torre, parece estar poco influenciado por las descargas de Aznalcázar, puesto que el índice de correlación únicamente aumenta en un 3% y el rmse apenas se ve alterado (0.9%).

Cabe destacar que, mientras las estaciones mencionadas hasta ahora, ubicadas desde la cabecera hasta la parte intermedia del estuario correspondientemente, pueden recibir una influencia ocasional de las presas de Alcalá del Río, Gergal y Guadaira, la estación Torre se ubica a una distancia suficientemente elevada de estas, lo que hace que el índice no pueda mejorar más de un cierto porcentaje. Es lo mismo que ocurre en las estaciones de Bonanza (PdE) y Chipiona (IHM), cuya ubicación es tan alejada de las fuentes de descargas, que el índice de correlación y el rmse no se ven alterados. En todo caso, los índices obtenidos en estas dos últimas estaciones son ya de por sí muy elevados, y la ausencia de mejora con las descargas no supone un resultado negativo en la validación del modelo.

En la Figura 18 se muestran las series del residuo calculadas en las estaciones de Caseta y Riego en el intervalo temporal de la simulación.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

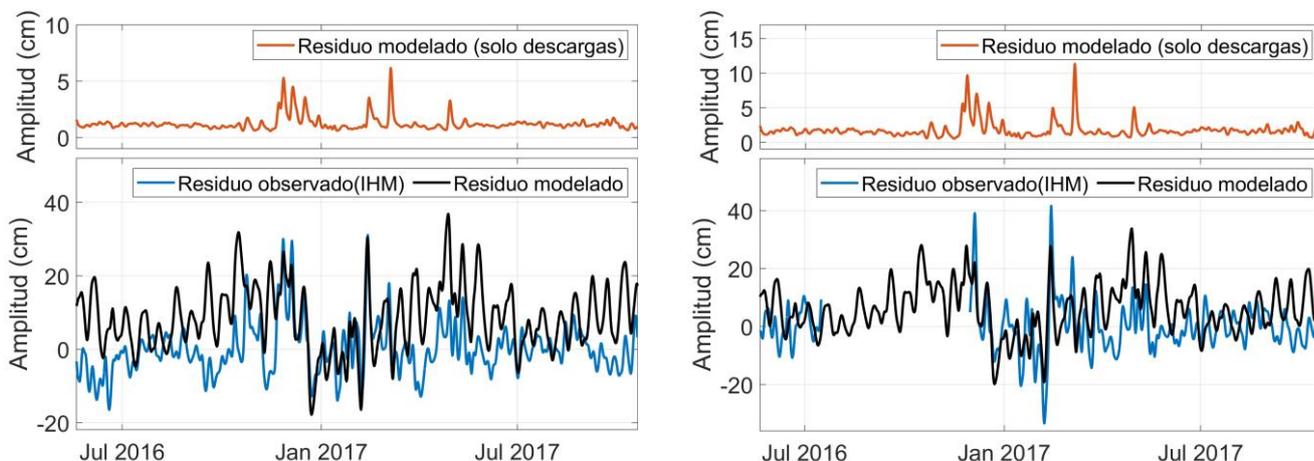


Figura 18. Panel superior: residuo generado por las descargas de agua dulce en los nodos del dominio más cercanos a Caseta (izquierda) y Riego (derecha). Panel inferior: residuo observado (línea azul) frente al modelado (negro) en el periodo mayo 2016 - octubre 2017 en los nodos del dominio más cercanos a Caseta (izquierda) y Riego (derecha).

La Figura 18 muestra una mayor contribución de las descargas de agua dulce en la estación de Riego que en la de Caseta, como prueba de la relación entre la cercanía de la presa y la variación del residuo meteorológico. La gráfica permite comprobar, además, que el residuo generado únicamente a partir de las descargas¹ siempre presenta valores positivos, ya que la contribución del incremento de descarga de agua dulce al nivel del río, es siempre hacia un aumento de la columna de agua.

Como es lógico, la mejora en la estima entre el residuo modelado y el observado, no implica una mejora en la totalidad de la serie. Puesto que las descargas se producen de forma puntual, el residuo también mejora en ese orden, razón por la que la variabilidad de los datos observados sigue siendo ligeramente mayor al de los modelados.

La Figura 19 muestra una última comparación entre residuos modelados y observados en las estaciones de Bonanza y Sevilla, como ejemplos de casos opuestos.

¹ El residuo generado únicamente por las descargas es obtenido como diferencia entre el residuo modelado con el conjunto completo de forzamientos (marea astronómica, meteorológica y descargas) y el obtenido con el modelo forzado sin descargas.

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

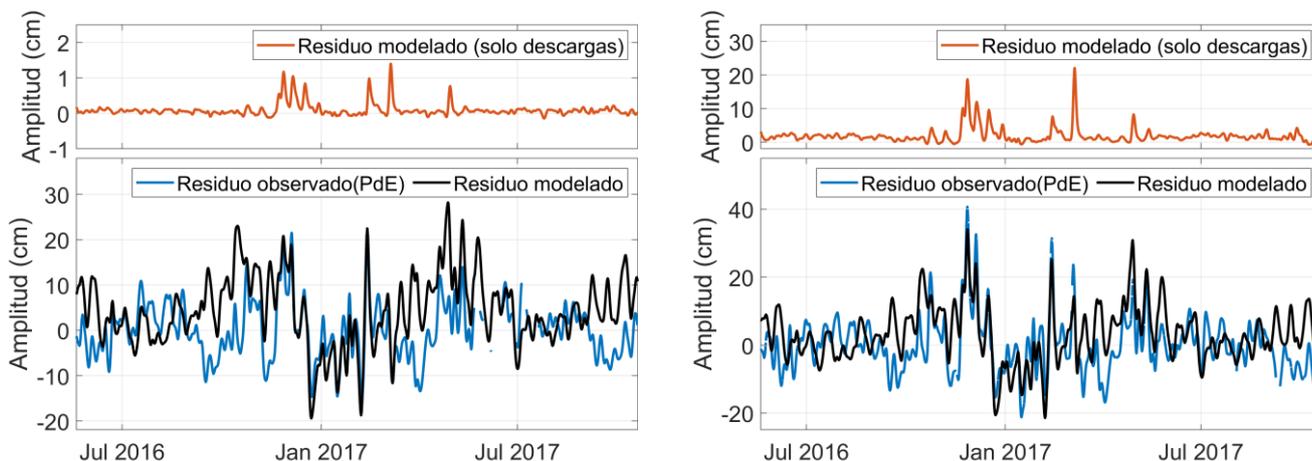


Figura 19. Como en la Figura 18 para las estaciones de Bonanza (izquierda) y Sevilla (derecha).

Como se ha mencionado anteriormente, la ubicación de la estación de Bonanza en las inmediaciones de la desembocadura, hace que las descargas de agua dulce en esta estación sean prácticamente imperceptibles. El panel superior izquierdo de la Figura 19 muestra, sin embargo, que la variación del residuo meteorológico debido al efecto aislado de las descargas en esta estación no es nula. En la gráfica se puede comprobar que, si bien la influencia de los aportes es tan escasa que no permite mejorar la estima en el índice de correlación, la amplitud del residuo debido a estas no siempre es despreciable. Concretamente, el 6 de marzo de 2017 a las 04:20, el residuo debido a las descargas alcanza su máxima amplitud con un valor de 1.2 cm.

Por otro lado, la mayor amplitud del residuo generado únicamente con descargas durante el periodo de simulación es alcanzada en la estación de Sevilla el 6 de marzo de 2017 a las 01:25 (nótese el desfase negativo con respecto a Bonanza), con un valor de 17.95 cm (ver panel derecho Figura 19), el cual es ampliamente comparable con la variación debida a la marea meteorológica. La variabilidad del residuo en esta estación demuestra nuevamente la capacidad de mejora puntual de la serie debido a la dispersión y la esporadicidad de las descargas de agua dulce. Como es esperable, la mejora en la estima entre el residuo modelado y observado se da especialmente en las épocas en las que la aportación estacional de la presa de Alcalá del Río es mayor (ver Figura 16).

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

2. CONCLUSIONES DE LA SUBTAREA 3.2.1

La batimetría del modelo ha sido actualizada y mejorada orlando el mallado con dos líneas paralelas a los bordes del dominio para asignar una cota positiva por encima del nivel medio, e incluyendo un mayor número de nodos en el Brazo de la Torre, Rivera de Huelva y Guadaira. El modelo se ha recalibrado en base ésta para reproducir correctamente la dinámica estuarina, considerando para ello la marea astronómica.

El uso del modelo como una herramienta de predicción (objetivo de las próximas tareas), requiere validar éste con los datos recogidos en observaciones. Las mejores observaciones disponibles en un periodo reciente son las procedentes del Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), por lo que se ha escogido un periodo de tiempo común a las observaciones, desde mayo de 2016 hasta octubre de 2017. Después de analizar la calidad y continuidad de los registros medidos, se han validado los 3 *output* (astronómico, meteorológico y descargas) extraídos del modelo.

La marea astronómica ha sido satisfactoriamente validada en base a las constituyentes más relevantes en las que se descompone la señal de marea a lo largo del estuario. El acorde de los datos simulados con las observaciones es generalmente muy bueno siendo especialmente satisfactorio para las constituyentes semidiurnas.

Por otro lado, los residuos meteorológicos obtenidos con el modelo, extraídos restando la predicción armónica a la simulación forzada con marea astronómica y meteorológica, se han comparado con el residuo observado, extraído de la misma forma. Para evaluar la correlación entre ambas, se ha calculado el índice de correlación y el error cuadrático medio (rmse) en dos franjas de tiempo (serie de tiempo completa y subperiodos de tiempo, elegidos según la continuidad de la serie) y se ha comprobado que el modelo reproduce muy satisfactoriamente el efecto de la marea meteorológica en el cauce.

Para la validación de las descargas de agua dulce se ha seguido el mismo proceso. Después de procesar la calidad de los registros proporcionados por la CHG, haciendo hincapié en la presa de Alcalá del Río por ser la principal presa reguladora del cauce, se ha extraído el residuo modelado y se ha comparado con las observaciones empleando la misma métrica estadística. Los índices de correlación obtenidos en este caso mejoran en la mayoría de las estaciones, a excepción de las más alejadas de las fuentes de aporte de agua dulce.

Tras haber verificado en este informe que el modelo reproduce satisfactoriamente el efecto conjunto de los tres forzamientos, estudiados de forma conjunta y aislada, se puede considerar que sus soluciones son válidas para su aplicación y uso como herramienta de predicción para el resto del proyecto.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

AIRIS II - SYNCHRO ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.1.

3. BIBLIOGRAFÍA

Confederación Hidrológica del Guadalquivir (CHG). (1995). Plan Hidrológico del Guadalquivir . 1994-1995.

Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga. (2019). ‘Actividad 2- Informe sobre el comportamiento mareal en la Eurovía del Guadalquivir en localidades seleccionadas’. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchro.

Godin, G. (1972) The analysis of tides . University of Toronto Press, Toronto, Canadá, 264 pp.

Pawlowicz, R., Beardsley, B. y Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE . Comput. Geosc., 28, 929-937.

Ruiz, J., Polo, M.J., Bramato, S., Díez-Minguito, M. y Losada, M.A. (2010) ‘Propuesta metodológica para diagnosticar y pronosticar las consecuencias de las actuaciones humanas en el Estuario del Guadalquivir - Aportes desde las cuencas vertientes’. Autoridad Portuaria de Sevilla y Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Sistema Portus, Puertos del Estado, <https://www.portus.puertos.es>

Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca del Guadalquivir (S.A.I.H). (2020) Caudal Suministrado a Zonas Regables (<https://www.chguadalquivir.es/saih/ZonasRegables.aspx>). Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

“La presente publicación sólo refleja las opiniones del autor. La Comisión Europea no es responsable de ningún uso que pudiera hacerse de la información que contiene.”