

AIRIS II - SYNCHRO. SYNCHROMODAL TRAFFIC & TRANSPORT INFORMATION SERVICES

2018-ES-TM-25



ACTIVIDAD 3. SUBTAREA UMA-3-2.2.

Predicción de espesor de lámina de agua en distintos puntos del estuario y para periodos de tiempo seleccionados

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	D02157-UMA-NT-01
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.

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	INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DE LA TAREA	6
2	ANÁLISIS DEL MELA EN PUNTOS SELECCIONADOS:	7
2.1	Parte 1: Serie completa	10
2.2	Parte 2: Estacionalidad	14
3	CONCLUSIONES DE LA 322	16
4	BIBLIOGRAFÍA	17

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.

1 INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DE LA TAREA

Esta tarea se plantea como colofón de las dos anteriores y como una primera aplicación del modelo calibrado con las mejoras batimétricas explicadas en Subtarea 3.2.1 (ST321 en lo sucesivo; [Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2020b](#)). Se incorporan todos los forzamientos físicos relevantes, astronómico, meteorológico y descargas, haciendo uso de los datos recopilados y analizados en la Subtarea 3.2.0 (ST320 en lo sucesivo; [Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2020a](#)).

Desde el punto de vista de la navegación por el estuario, el mayor interés práctico de esta tarea es la evaluación del Mínimo Espesor de la Lámina de Agua (MELA) y de sus fluctuaciones, puesto que ese espesor determina la posibilidad de tránsito de los buques en cada punto e instante en función de su calado y otras características ([Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2019a](#); [Siport21, 2020](#)). Un estudio preliminar del comportamiento del MELA se hizo en el entregable 2.2 del proyecto (D22, de aquí en adelante, [Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2019a](#)) a partir de una versión previa del modelo durante un periodo de tiempo relativamente corto. Esta subtarea repite el estudio haciendo uso de la nueva versión calibrada para un periodo de hindcast del modelo más extenso (2016-2017 en el nuevo). A partir de las salidas del modelo se puede determinar el MELA para cualquier punto del estuario durante el periodo seleccionado.

El fin último que persigue este informe es cuantificar la importancia relativa que tienen los distintos forzamientos sobre el MELA. Ya se ha comentado la predominancia de la marea astronómica en el espesor de la lámina de agua, lo que se hace extensivo y de forma más concluyente a las corrientes. Es, con diferencia, el forzamiento dominante. Las contribuciones de la marea meteorológica y de las descargas de agua dulce pueden verse como perturbaciones del espesor que origina la astronómica. Tienen el gran inconveniente de no poder ser predichas más allá de un horizonte temporal de muy pocos días y, aun así, la incertidumbre de su predicción es superior a la de la marea astronómica. Por esas razones el análisis de su influencia se hace en términos estadísticos.

De las dos contribuciones, la meteorológica tiende a dominar sobre la producida por las descargas, en parte porque su influencia está siempre presente en tanto que la de las descargas tiene una naturaleza esporádica y bastante puntual en el tiempo. Una diferencia destacable y con consecuencias que existe entre ambas es que la marea meteorológica puede ser positiva (aumenta el MELA) o negativa (lo disminuye), en tanto que las descargas sólo pueden aumentarlo. Desde un punto de vista práctico, la navegación por el estuario, que está determinada por el MELA, se ve favorecida por estas últimas, si bien es cierto que también aumentan la velocidad de la corriente de vaciante (hacia el océano) y pueden bloquear la de creciente (hacia el interior), lo que tiene incidencias en la navegación en según qué circunstancias.

En la primera parte del informe se hace un estudio estadístico del comportamiento del MELA basado en la serie global de 2 años simulada en el conjunto de puntos seleccionado, valorando el grado de afección que producen la marea meteorológica y las descargas al MELA puramente astronómico que se tendría en ausencia de ellas, y cuál de ellas domina en la modificación observada. La segunda parte hace un estudio similar pero desglosado por estaciones para dibujar un patrón de las épocas del año en que estas perturbaciones deben ser tenidas más presentes. La tercera y última parte contiene las conclusiones del informe.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

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

2 ANÁLISIS DEL MELA EN PUNTOS SELECCIONADOS:

Actualmente, se disponen de dos bases de datos proporcionadas por la Autoridad Portuaria de Sevilla (APS), a partir de las cuales se pueden identificar las zonas del estuario más críticas en la navegación y, por tanto, de especial interés en el análisis estadístico del MELA. Por un lado, en el D22 ([Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2019a](#)), se seleccionaron 12 localidades a partir de un registro histórico de eventos de encallamiento y/o contacto de buques con el fondo como posibles zonas de riesgo en la navegación, y se analizó el espesor de la lámina de agua (ELA, de aquí en adelante) en dichos puntos, con el fin de justificar de la forma más fiable posible la ocurrencia de los sucesos. Por otro lado, la APS se interesó recientemente en el cálculo de los tiempos de traspaso entre distintas localidades del estuario, para lo cual facilitaron 10 estaciones identificadas por puntos kilométricos (PKs) desde Chipiona (PK-88) hasta la Esclusa (PK-0) ([Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2019b](#)).

En sintonía con el D22 y la Nota Técnica, ambos desarrollados en el marco de la Actividad 2 del proyecto AIRIS-II Synchro, los puntos para el análisis estadístico del presente informe se escogen en un primer momento en las mismas localidades que en ambos entregables, obteniendo un total de 16 estaciones, con 6 estaciones solapadas (PK-Salinas, PK-Puntalete, PK-Gola, PK- Canal Nuevo, PK-Olivillos y PK-Esclusa). Sin embargo, la cercanía entre ciertas estaciones (PK-Yeso y PK-Gola, entre otros) y el bajo número de incidencias reportadas en algunas de ellas, plantea la posibilidad de reducir el total de las localidades en el análisis estadístico. La Figura 1 muestra la posición de estas a lo largo del cauce.

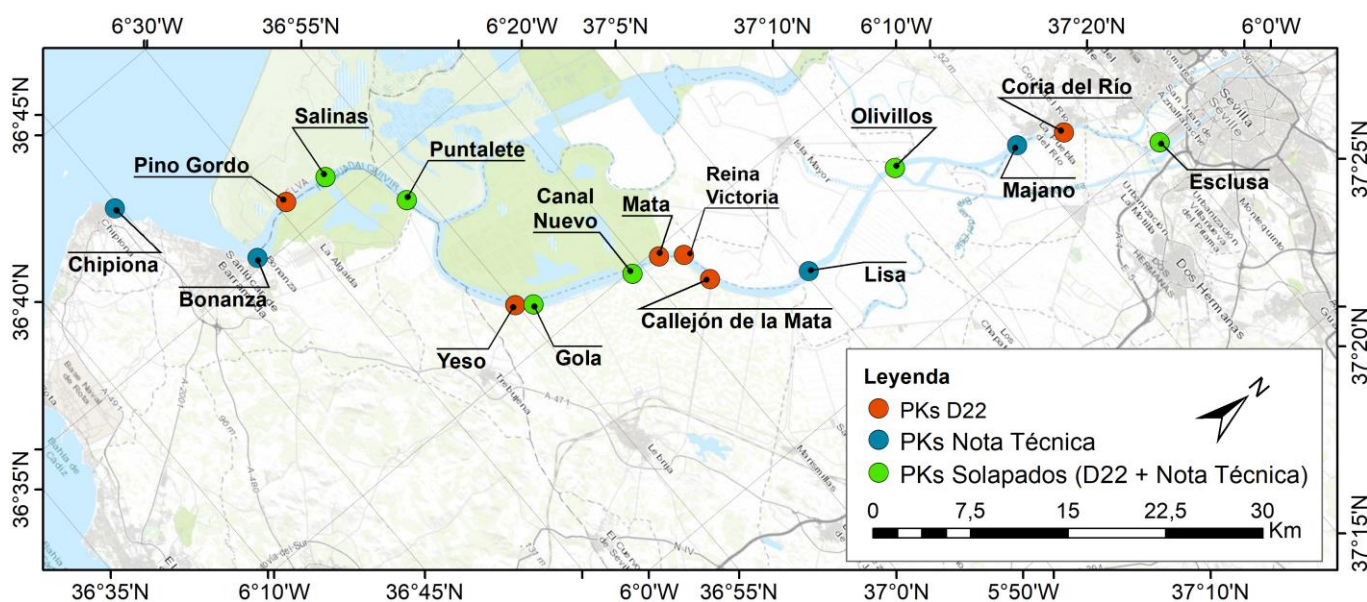


Figura 1. Mapa de los PKs considerados en el D22 (símbolo naranja, [Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2019a](#)) y la Nota Técnica de los Traspasos (símbolo azul, [Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2019b](#)). Las estaciones repetidas en ambos entregables (D22 y Nota Técnica) se marcan con símbolos en verde.

Dada la reciente aportación de la APS para la realización de la Nota Técnica, se asume que los puntos recogidos en ésta resultan prioritarios con respecto a los contemplados en el D22, algunos de los cuales presentan una única incidencia (Pino Gordo, Canal Nuevo, Coria del Río y Mata, entre otros) y, por tanto, un bajo nivel de significatividad con respecto a otras estaciones, como Puntalete y Esclusa, sí contempladas por ambos entregables (Figura 1). Por ello, con el fin de proporcionar un estudio estadístico basado en los datos más recientes posibles, se ha recurrido a las estaciones recogidas en la Nota Técnica de los Traspasos. Nombradas desde la desembocadura en dirección a la cabecera, éstas son: Chipiona, Bonanza, Salinas, Puntalete, Gola, Canal Nuevo, Lisa, Olivillos, Majano y Esclusa.

Para llevar a cabo el análisis estadístico, se han ejecutado 3 simulaciones del modelo hidrodinámico del río Guadalquivir durante un periodo de 2 años (desde el 1 enero de 2016 hasta el 1 de enero de 2018) y se han extraído

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

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

las series temporales de nivel del mar en los 10 puntos seleccionados para el estudio, con una resolución de escritura de las salidas de 5 minutos. La simulación más realista contempla el efecto conjunto de todas las contribuciones, incluyendo los forzamientos astronómico y meteorológico en el contorno abierto y las descargas registradas por la CHG en los nodos del dominio más cercanos a las fuentes de entrada y salida de agua dulce de las que se disponen (ver detalle sobre las presas disponibles en el ST321). La segunda simulación considera una única influencia del forzamiento astronómico, desestimando el efecto de las descargas y la marea meteorológica. La tercera y última simulación añade a la segunda el efecto del residuo meteorológico, omitiendo las descargas.

En total se han extraído 30 (3 simulaciones $\times$ 10 PKs) series temporales del nivel del río. Para cada una de ellas se ha calculado la envolvente negativa de la serie, y se ha así identificado la mínima anomalía (máxima anomalía negativa) denominada CELA (Contribución al Espesor de la Lámina de Agua). Sumando en cada localidad la batimetría proporcionada por la APS a estas anomalías, se obtiene el mínimo espesor de la lámina de agua (MELA). En la Figura 2 se muestra los tres cálculos del CELA realizados sobre las series del nivel del mar simuladas en el PK de Esclusa.

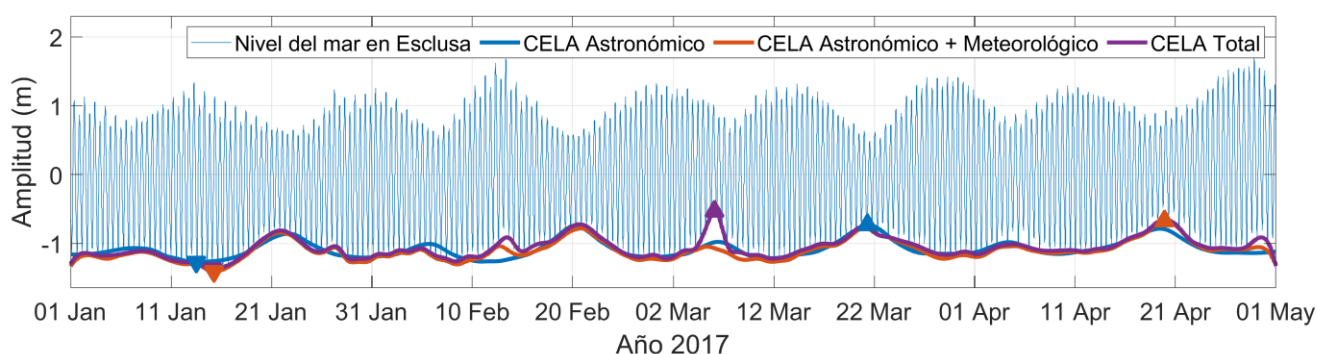


Figura 2. Envolventes negativas (CELAs) calculadas a partir de las series temporales del nivel del mar en Esclusa extraídas de las tres simulaciones realizadas, las cuales contemplan: 1) Todos los forzamientos (CELA Total, representada como una línea morada gruesa), 2) Únicamente el forzamiento astronómico (CELA Astronómico, representada como una línea azul gruesa) y 3) Efecto conjunto de la marea astronómica y meteorológica (CELA Astronómico + Meteorológico, representada como una línea naranja gruesa). Para una correcta visualización de la gráfica se representa únicamente, con una línea azul delgada, la serie temporal del nivel del mar simulado con todos los forzamientos en el periodo 01/01/2016 - 01/05/2016. Los triángulos orientados hacia arriba (abajo) muestran los instantes de tiempo donde los CELAs correspondientes a su color son más positivos (negativos).

La Figura 2 anticipa los patrones que adquieren los distintos CELA en función de la naturaleza de la fuente de variabilidad. En el caso de la existencia de una única influencia de la marea astronómica es razonable afirmar que el CELA ocurre siempre en el caso de las bajamares (línea azul gruesa en la Figura 2), cuando el nivel del mar alcanza su mínimo espesor. La modulación quincenal (marea viva-marea muerta), actúa intensificando esta fase, acentuando el CELA en el caso de las mareas vivas (bajamares más bajas) y atenuándolo en el de las muertas. El mínimo (máximo) valor de esta envolvente se corresponde, por tanto, con la altura de la máxima (mínima) bajamar acaecida por causas puramente astronómicas.

Las contribuciones de la marea meteorológica y las descargas (línea naranja y morada en la Figura 2, respectivamente), en cambio, tienden a seguir un patrón más esporádico y menos predecible en el tiempo. La alta variabilidad de la marea meteorológica que se observa especialmente en los meses de invierno, hace que el CELA Astronómico y Meteorológico en el periodo representado tienda a adoptar valores que, casi en la totalidad del periodo, se encuentran por debajo del CELA puramente astronómico. En cuanto a la seguridad de la navegación, el CELA Astronómico + Meteorológico requiere especial atención en las situaciones en las que ambos forzamientos actúan en el mismo sentido de reducción del CELA: por ejemplo la concomitancia de una sobrepresión atmosférica con una bajamar en marea viva, que provocarían mínimos valores del MELA.

Las descargas de agua dulce, por el contrario, tienden a contrarrestar este efecto, desplazando el MELA puntualmente hacia valores positivos. Como se cita en el [ST321](#), las descargas de agua dulce constituyen una serie con un caudal mínimo relativamente constante y esporádicos pulsos con valores varios órdenes de magnitud

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

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

mayores. Por esta razón, la diferencias entre el CELA Total y el Astronómico + Meteorológico observadas en la Figura 2, no tienden a superar los ~3 cm en promedio. Sólo en casos excepcionales, como los que se observan en torno al 13 de febrero, 29 de abril y, de forma más pronunciada, 6 de marzo, entre otros, el CELA Total muestra diferencias significativamente positivas con respecto a la contribución sin descargas, registrando una diferencia máxima de ~50 cm en torno al 6 de marzo a las 03:00, lo que sugiere una clara influencia de la presa de Alcalá del Río sobre el PK de La Esclusa. Como es lógico, un caudal del río nulo anula las diferencias entre ambas series de CELA. Por este motivo, el mínimo valor del CELA Total coincide con el valor del CELA Astronómico + Meteorológico (ver nivel en torno al 15 de marzo a las 07:00, Figura 2).

Desde un punto de vista práctico, la variable más condicionante en el Guadalquivir es el MELA alcanzado en cada punto e instante, puesto que este espesor es el que determina la viabilidad de navegación por un determinado punto a una determinada hora ([Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2019a](#)). Las envolventes obtenidas a partir de las tres simulaciones, añadidas a la profundidad de cada PK, permiten calcular este en un periodo de simulación determinado, razón por la que el análisis estadístico de este informe se hace en términos de MELA. Del mismo modo que con las CELA, se han considerado 3 posibles MELA: aquel que contempla todos los forzamientos (MELA Total, de aquí en adelante), el que únicamente considera la contribución puramente astronómica (MELA Astronómico) y el que contempla el efecto conjunto de las contribuciones astronómica y meteorológica (MELA Astronómico + Meteorológico). La Figura 3 muestra la evolución temporal de los 3 MELA en los PK de Esclusa y Bonanza en el mismo periodo que la Figura 2.

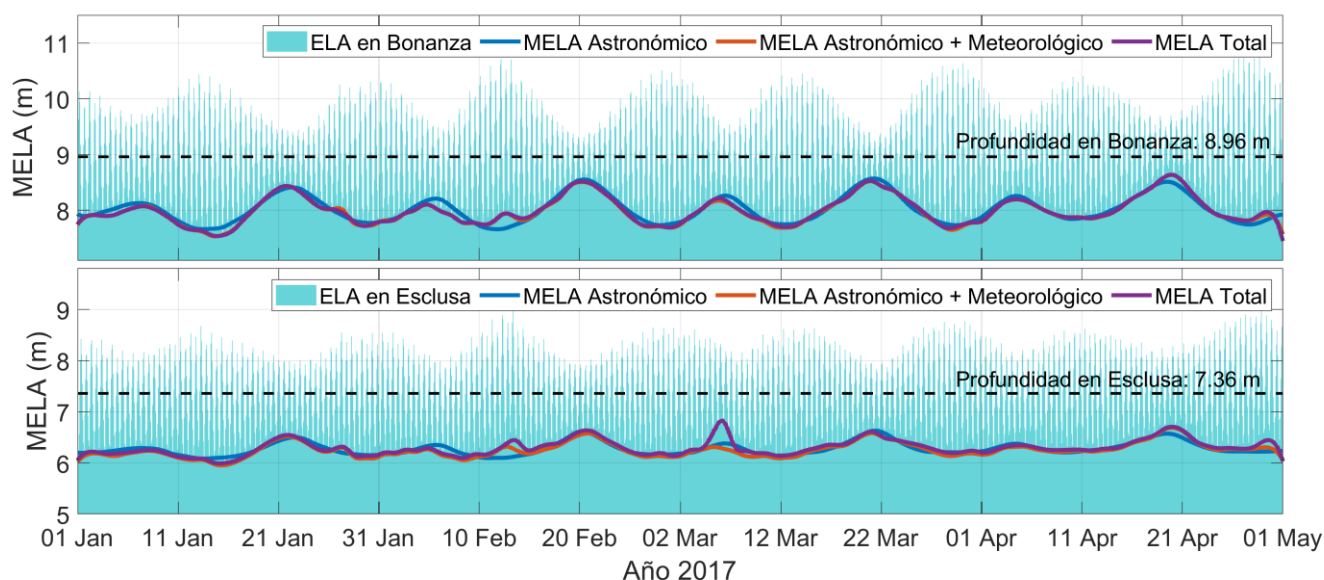


Figura 3. Series temporales del MELA Astronómico (línea gruesa azul), Astronómico + Meteorológico (línea gruesa naranja) y Total (línea gruesa morada), calculados añadiendo el fondo a los CELA correspondientes representados en la Figura 2, en los PK de Bonanza (panel superior) y Esclusa (panel inferior). Las profundidades correspondientes a los PKs representados se muestran con líneas discontinuas. Para una correcta visualización de la gráfica se representa únicamente, en azul turquesa, la serie temporal del nivel del mar astronómico en ambos PK en el periodo 01/01/2016 - 01/05/2016.

Lo primero que llama la atención de la Figura 3 es la discrepancia espacial que presentan las evoluciones temporales del MELA en los dos PK representados. En ambas estaciones, la contribución mareal hace que el MELA asociado a la marea astronómica (línea azul gruesa en la Figura 3) sea la dominante con respecto a las otras fuentes de variabilidad. Concretamente, el tamaño de las fluctuaciones del MELA Astronómico es de ~1 m en el caso de Bonanza y de ~60 cm en el caso de la Esclusa (panel superior e inferior de la Figura 3, respectivamente), valores que confirman el efecto de la fricción en la progresión de la onda de marea en dirección a la cabecera.

Del mismo modo que el astronómico, el MELA Astronómico + Meteorológico también presenta una amplitud considerablemente mayor en el caso del PK de Bonanza, puesto que es en esa localidad donde la influencia

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

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

atmosférica es mayor (recuérdese que el Guadalquivir, por su carácter estuarino semicerrado, no puede presentar una marea barométrica propia, sino que la contribución atmosférica viene importada por el océano abierto al que está expuesto, ver [ST320](#)).

El MELA que contempla los tres forzamientos es, con diferencia, el que mayor contraste espacial evidencia con respecto a las otras dos variaciones del MELA. Como se mencionó en el [ST321](#), la ubicación del PK de Bonanza en las inmediaciones de la desembocadura, hace que las descargas de agua dulce en esta estación sean casi imperceptibles, razón por la cual la diferencia entre el MELA Astronómico + Meteorológico y el MELA Total en esta estación es prácticamente nula (ver línea morada gruesa en el panel superior de la Figura 3). Por el contrario, la cercanía existente entre el PK de Esclusa y la presa de Alcalá del Río del Río hace que el MELA Total sea, casi en la integridad del periodo representado, ligeramente mayor al MELA que desestima las descargas (ver línea morada gruesa en el panel inferior de la Figura 3).

De manera análoga, es de especial interés recalcar la influencia directa que existe entre el MELA Total y el nivel del mar puramente astronómico, así como la considerable predominancia que tiene esta contribución del ELA con respecto a cualquier otro forzamiento. Como se ha mencionado anteriormente, las condiciones de marea más intensas (mareas vivas) condicionan MELAs más críticos. Partiendo de esta afirmación, es razonable sugerir la posible existencia de una disipación del efecto de las descargas en aquellas condiciones de marea en las que, por cuestiones energéticas, el forzamiento de origen antrópico es incapaz de igualar a la influencia mareal quincenal. Lo que ocurre en torno al 13 de febrero y 6 de marzo de 2017 es un ejemplo ilustrativo de este razonamiento (ver Figura 2 y Figura 3). Ambas fechas se corresponden con instantes de tiempo en los que el CELA Total es superior al CELA Astronómico + Meteorológico, causa directamente asociada a una influencia de las descargas de agua dulce. En un primer momento, se podría esperar que el máximo valor del CELA alcanzado en la segunda fecha (-0.5 m en el Total frente a -0.97 m en el Astronómico y -1.07 m en el Astronómico y Meteorológico, ver Figura 2), condicionara el valor del MELA más positivo de la serie temporal representada en la Figura 3. En cambio, la tercera gráfica permite identificar que el MELA más positivo ocurre en el caso del CELA de la primera fecha (-0.90 m en el Total frente a -1.25 m en el Astronómico y -1.05 m en el Astronómico y Meteorológico, ver Figura 2). Esta diferencia se justifica por la condición mareal en ambos instantes de tiempo. En la Figura 3 se puede comprobar que el índice del valor del CELA del 13 de marzo, tiene lugar en la bajamar de una marea muerta, mientras que el índice del máximo valor del CELA (6 de marzo) tiene lugar en la bajamar de una marea viva, cuando el ELA alcanza su mínimo espesor. La mayor energía del ciclo mareal que se deduce en la segunda fecha con respecto a la primera, sumado a una posible influencia meteorológica positiva en la primera justificaría el hecho de que el máximo valor del MELA se alcance en esta fecha y no en el momento del máximo CELA.

Los análisis descritos hasta ahora han permitido corroborar los distintos comportamientos que adquiere el MELA en función de la localidad del PK, la época del año y el forzamiento implementado en el modelo. A partir de este primer análisis, se plantean dos estudios estadísticos detallados del comportamiento MELA: uno que contemple el periodo completo simulado (01/01/2016 - 01/01/2018) y otro que lo desglose por trimestres, con el fin de estudiar la estacionalidad del MELA. A continuación, se describen, las estadísticas llevadas a cabo en cada apartado.

2.1 Parte 1: Serie completa

La primera métrica realizada contempla las estadísticas promedio y la desviación estándar calculadas sobre las tres series temporales del MELA, así como la contribución aislada de las fuentes no mareales (residuo meteorológico y descargas). La Tabla 1 muestra los resultados de la métrica.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

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

Tabla 1. Estadísticas del MELA y su desglose por contribuciones (CELA), incluyendo el promedio de ambas (μ MELA (m) | μ CELA (cm)) y la desviación estándar ($\pm$ std (cm)) en los 10PKs proporcionados por la APS. Para cada estación se muestra la contribución promedio en cm de los dos forzamientos no mareales (residuo meteorológico y descargas de agua dulce) de forma aislada.

Estación	Prof. (m)	TOTAL	Contr. Astronómica	Contr. Astronómica + Meteorológica	Contr. μ (cm)	
		μ MELA (m) μ CELA (cm) $\pm$ std (cm)			Meteorológica	Descargas
Chipiona	9.12	7.94 -118 ± 34	7.95 -117 ± 34	7.94 -118 ± 34	-1.19	+0.00
Bonanza	8.96	8.02 -94 ± 22	8.03 -93 ± 22	8.02 -94 ± 22	-1.19	+0.21
Salinas	7.26	6.44 -82 ± 18.31	6.44 -82 ± 18	6.43 -83 ± 18	-1.19	+0.42
Puntalete	6.98	6.20 -78 ± 16	6.20 -78 ± 15	6.19 -79 ± 16	-1.17	+0.54
Gola	7.87	7.18 -69 ± 13	7.18 -69 ± 11	7.16 -71 ± 13	-1.15	+0.82
Canal Nuevo	7.24	6.54 -70 ± 12	6.54 -70 ± 10	6.52 -72 ± 12	-1.15	+1.03
Lisa	7.18	6.41 -77 ± 11	6.40 -78 ± 10	6.39 -79 ± 11	-1.16	+1.51
Olivillos	7.17	6.30 -87 ± 11	6.28 -89 ± 10	6.27 -90 ± 11	-1.17	+1.81
Majano	7.00	6.04 -96 ± 12	6.02 -98 ± 11	6.01 -99 ± 12	-1.17	+2.10
Esclusa	7.36	6.31 -105 ± 13	6.28 -108 ± 11	6.27 -109 ± 13	-1.17	+3.14

Como era de esperar, los valores del CELA y MELA más positivos en promedio se alcanzan, casi en la totalidad de los PK, en la serie del nivel del mar simulado con todos los forzamientos (astronómico, meteorológico y descargas). Este hecho se hace más evidente cuanto más cerca se encuentra la estación de la cabecera y, por tanto, de Alcalá del Río, principal presa reguladora en el cauce. La contribución promedio de las descargas de agua dulce en los PKs confirman este razonamiento, mostrando una contribución gradualmente positiva de forma directamente proporcional a la distancia entre la cabecera y la desembocadura, valores que a su vez se asemejan a la diferencia resultante entre la simulación total y la simulación astronómica + meteorológica.

Por otro lado, la distribución uniformemente negativa de la contribución promedio del residuo meteorológico (media de -1.17 cm en los 10 PKs), hace que los valores del CELA y MELA más negativos se obtengan en la simulación que contempla la marea astronómica y meteorológica, alcanzando el mínimo valor del CELA en Chipiona (-118.48 cm), posiblemente por su localidad y exposición al océano abierto, y el mínimo valor del MELA en Majano (6.01 m), por la escasa profundidad del punto (7.00 m).

Finalmente, la ausencia del forzamiento meteorológico en el CELA Astronómico, hace que la tendencia promedio en los 10 PKs sea ligeramente más positiva con respecto a la estadística obtenida de la simulación con ambos forzamientos, pero la ausencia de descargas de agua dulce que puntualmente puedan aumentar el nivel, hace que la tendencia no supere a la simulación del CELA y MELA Total.

Obsérvese que la diferencia obtenida entre el MELA Astronómico y el MELA Astronómico + Meteorológico se asemeja considerablemente a la contribución promedio del residuo obtenido en cada PK. Dado que la diferencia entre los MELA de las dos simulaciones es generalmente menor (no supera los ~ 1.2 cm) que la diferencia entre los MELA de los propios PKs de una misma serie, los mínimos valores del CELA y MELA coinciden, en este caso, con los obtenidos en el CELA Astronómico + Meteorológico, es decir, en Chipiona (-117.36 cm, 1.12 cm más que la simulación con marea meteorológica) y Majano (6.02 m, 1 cm más que la simulación con marea meteorológica), respectivamente.

Desde un punto de vista de la seguridad de la navegación, el parámetro más crítico y de especial interés en el análisis estadístico del MELA es la ocurrencia de posibles eventos extremos que ocasionen valores del espesor de

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

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

la lámina de agua mínimos y máximos. Por ello, las siguientes dos Tablas (Tabla 2 y Tabla 3) reflejan los mínimos y máximos valores respectivamente del MELA y el CELA calculados en las tres simulaciones.

Dada la prioridad del análisis del MELA Total con respecto al resto de simulaciones, a causa de que ésta es la única que contempla todas las posibles variaciones del ELA en su conjunto, las Tabla 2 y Tabla 3 tienen como objetivo principal la localización del valor extremo y su justificación en esta serie del MELA, omitiendo en un principio el mínimo o máximo valor ocurrido en ausencia de algún forzamiento Secundariamente, ambas tablas contemplan los valores mínimos y máximos ocurridos en los MELA Astronómico y/o MELA Astronómico + Meteorológico, para su correcta interpretación y comparación con el MELA Total.

Tabla 2. Mínimos valores del MELA (m) calculados en las series del nivel del mar extraídas de las tres simulaciones realizadas (MELA Total, MELA Astronómico y MELA Astronómico + Meteorológica) y su desglose por contribuciones (CELA (cm)) en los 10 PKs. Para cada valor del MELA Total se muestran los niveles del mar desglosados que han tenido lugar en el momento del valor extremo de dicho MELA: nivel Astronómico + Meteorológico (representado como A+M), nivel astronómico (representado como A), nivel del residuo meteorológico (representado como M) y nivel de las descargas de agua dulce (representado como D), representados con un signo positivo o negativo indicando el aumento o disminución del MELA con respecto al MELA Total respectivamente. En los dos últimos niveles se muestra, entre paréntesis, la contribución porcentual que suponen el residuo meteorológico y las descargas de agua dulce de forma aislada.

Estación	Prof. (m)	TOTAL	MELA Astronómica	MELA Astronómico + Meteorológico	Contr. en la fecha y hora del mínimo MELA Total (cm)			
		Mín. MELA (m) Mín. CELA (cm) Fecha y hora (dd/mm/yyyy HH:MM)			A+M	A	M (%)	D (%)
Chipiona	9.12	7.16 -196 10/03/2016 06:00	7.23 -189 10/03/2016 03:35	7.16 -196 10/03/2016 06:05	-196.04	-188.63	-7.41 (3.93%)	+0.00 (0.0%)
Bonanza	8.96	7.54 -142 14/01/2017 21:00	7.61 -135 25/07/2017 04:10	7.53 -143 14/01/2017 16:25	-142.60	-128.51	-14.09 (11%)	+0.33 (0.23%)
Salinas	7.26	6.02 -124 15/01/2017 06:05	6.11 -115 25/07/2017 08:50	6.02 -124 15/01/2017 02:45	-123.98	-110.07	-13.91 (12.6%)	+0.08 (0.07%)
Puntalete	6.98	5.83 -115 15/01/2017 04:25	5.91 -107 25/07/2017 09:00	5.82 -116 15/01/2017 02:30	-116.25	-101.12	-15.13 (15%)	+1.24 (1.06%)
Gola	7.87	6.86 -101 15/01/2017 11:10	6.96 -91 25/07/2017 20:35	6.85 -102 15/01/2017 09:40	-102.29	-87.20	-15.09 (17.3%)	+1.35 (1.32%)
Canal Nuevo	7.24	6.23 -101 15/01/2017 08:45	6.33 -91 24/07/2017 15:55	6.22 -102 15/01/2017 07:05	-102.32	-87.89	-14.42 (6.4%)	+1.74 (1.70%)
Lisa	7.18	6.12 -106 15/01/2017 08:30	6.21 -97 25/07/2017 00:55	6.10 -107 15/01/2017 06:40	-107.48	-94.29	-13.19 (4%)	+1.96 (1.82%)
Olivillos	7.17	6.00 -117 15/01/2017 09:40	6.09 -108 25/07/2017 00:20	5.98 -119 15/01/2017 07:55	-118.65	-105.18	-13.47 (2.8%)	+2.08 (1.76%)
Majano	7.00	5.73 -127 15/01/2017 10:15	5.81 -119 25/07/2017 00:10	5.71 -129 15/01/2017 09:00	-129.49	-115.71	-13.78 (11.9%)	+2.24 (1.73%)
Esclusa	7.36	5.99 -137 15/01/2017 02:50	6.08 -128 24/07/2017 23:50	5.95 -141 15/01/2017 07:30	-140.54	-125.83	-14.71 (11.7%)	+3.74 (2.66%)

Lo primero que se evidencia en la Tabla 2 es el papel que juegan las distintas contribuciones en el valor mínimo del MELA Total en función de la ubicación de los PKs. En aquellas estaciones más cercanas a la desembocadura, es razonable afirmar que el mínimo MELA Total se origina por causas fundamentalmente astronómicas y, seguidamente, meteorológicas. El efecto de las descargas de agua dulce, en cambio, no llegan a superar los 2 cm hasta el PK de Gola, razón por la que esta contribución en el primer tramo del río se puede considerar despreciable. La contribución meteorológica se mantiene, a excepción de Chipiona, prácticamente constante y estable en la totalidad del Río, mostrando porcentajes de contribución entre ~13% y ~15%, cifras considerables que se han de tener en cuenta en la planificación de la navegación. Conforme los PKs se sitúan más cercanos a la cabecera, la contribución de las descargas va cobrando importancia. No obstante, tratándose de un mínimo valor de MELA, se espera que el efecto de las descargas sea muy escaso o, en todo caso, considerablemente inferior a la contribución

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

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

meteorológica. En todos los PKs, se puede deducir una tendencia común: la suma de la marea astronómica + la marea meteorológica, es la que ocasiona los mínimos valores del MELA. Esto se debe, como se ha comentado anteriormente, a la posible simultaneidad de condiciones astronómicas y meteorológicas que actúen en el sentido de reducción del nivel. Concretamente, el mínimo valor entre los mínimos MELA Totales, se alcanza en la estación de Majano, con un valor del MELA de 5.73 m, -129.5 cm por debajo del fondo. A Majano le siguen las estaciones de Esclusa, con un valor de 5.99 m (140.5 cm por debajo del fondo en el punto), y Puntalete, con un valor de 5.83 (116.2 cm por debajo del fondo en el punto) valores que resultan especialmente críticos teniendo en cuenta el tránsito de buques en la zona y el número de incidencias reportadas en estas ([Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga, 2019a](#)). En el PK de Chipiona, el mínimo valor del CELA Total alcanzado es de casi 2 m con respecto a la profundidad en el punto, constituyendo la máxima disminución en el periodo total observado. No obstante, la ubicación de esta estación en el océano abierto, hace que la reducción del MELA en este PK (7.16 m) no sea tan significativo o, al menos, tan crítico en el tránsito de barcos como los mencionados hasta ahora.

Por las razones descritas, la tendencia que siguen los 3 MELA en la Tabla 2 varía con respecto a la Tabla 1. Los mínimos valores del MELA se alcanzan en el caso de la simulación astronómica, seguido de la simulación total y la astronómica + meteorológica. En todo caso, los mínimos valores de los 2 MELAS comparados, no superan en ningún PK el mínimo valor del MELA Total.

Tabla 3. Como en Tabla 2 para los máximos MELA.

Estación	Prof. (m)	TOTAL	MELA Astronómica	MELA Astronómico + Meteorológico	Contr. en la fecha y hora del máximo MELA Total (cm)			
		Máx. MELA (m) Máx. CELA (cm) Fecha y hora (dd/mm/yyyy HH:MM)			A+M	A	M (%)	D (%)
Chipiona	9.12	7.87 -125 07/04/2017 17:10	7.92 -120 16/09/2017 20:40	7.87 -125 07/04/2017 17:10	-124.52	-125.78	-1.27 (1.02%)	+0.00 (0.00%)
Bonanza	8.96	7.96 -100 07/04/2017 18:00	8.00 -96 16/09/2017 19:10	7.96 -100 07/04/2017 17:55	-99.76	-99.88	-0.12 (0.12%)	+0.02 (0.13%)
Salinas	7.26	6.39 -87 07/04/2017 17:25	6.40 -86 16/09/2017 19:40	6.38 -88 07/04/2017 17:40	-87.66	-87.61	0.04 (0.05%)	+0.37 (0.47%)
Puntalete	6.98	6.15 -83 07/04/2017 16:20	6.15 -83 16/09/2017 20:00	6.14 -84 07/04/2017 18:25	-83.59	-83.61	-0.02 (0.02%)	+0.82 (0.97%)
Gola	7.87	7.14 -73 07/04/2017 15:30	7.13 -74 16/09/2017 17:35	7.13 -74 07/04/2017 15:50	-74.15	-74.43	-0.28 (0.37%)	+1.63 (1.86%)
Canal Nuevo	7.24	6.51 -73 07/04/2017 18:15	6.49 -75 16/09/2017 16:55	6.49 -75 07/04/2017 17:45	-74.87	-75.42	-0.55 (0.74%)	+1.93 (1.88%)
Lisa	7.18	6.37 -81 07/04/2017 20:25	6.35 -83 16/09/2017 17:40	6.36 -82 07/04/2017 19:15	-82.27	-82.83	-0.57 (0.69%)	+2.23 (2.06%)
Olivillos	7.17	6.26 -91 07/04/2017 20:05	6.23 -94 16/09/2017 19:25	6.24 -93 07/04/2017 18:50	-93.40	-93.92	-0.53 (0.56%)	+2.44 (2.09%)
Majano	7.00	5.99 -101 07/04/2017 19:40	5.94 -106 09/03/2017 04:15	5.97 -103 07/04/2017 18:40	-103.14	-103.68	-0.55 (0.53%)	+2.71 (2.15%)
Esclusa	7.36	6.54 -82 21/02/2017 23:45	6.20 -116 09/03/2017 05:30	6.23 -113 07/04/2017 18:55	-86.61	-87.74	-1.13 (1.30%)	+5.67 (5.54%)

En la Tabla 3, los valores máximos del MELA alcanzados son muy superiores a los mínimos, resultados que hacen que el análisis estadístico de estos requiera una menor atención que el análisis realizado en la Tabla 2. Del mismo modo que en el caso anterior, el efecto de las descargas va cobrando importancia a medida que el PK se sitúa más cercano a la Esclusa. Las discrepancias entre la contribución astronómica y astronómica + meteorológica, en cambio, son menos evidentes que en el caso anterior, debido a que la tendencia general del residuo meteorológico tiende a ser más negativa que positiva. Por otro lado, la influencia de las descargas hace que la tendencia general de los 3 MELA en la Tabla 3, se asemeje más a la obtenida en la Tabla 1, obteniendo los máximos valores del MELA en el caso del MELA Total, seguido de los MELA Astronómico y Astronómico + Meteorológico.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
 Mecanismo «Conectar Europa»

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

2.2 Parte 2: Estacionalidad

La Figura 4 y Figura 5 muestran los *Box Whiskers plot* de los MELA Total y Astronómico + Meteorológico obtenidos en los PK de Bonanza y Esclusa, respectivamente, separados por meses para el estudio de su variabilidad estacional. Dada la naturaleza determinista de la marea astronómica, en esta sección del informe se ha omitido el análisis estacional de esta serie.

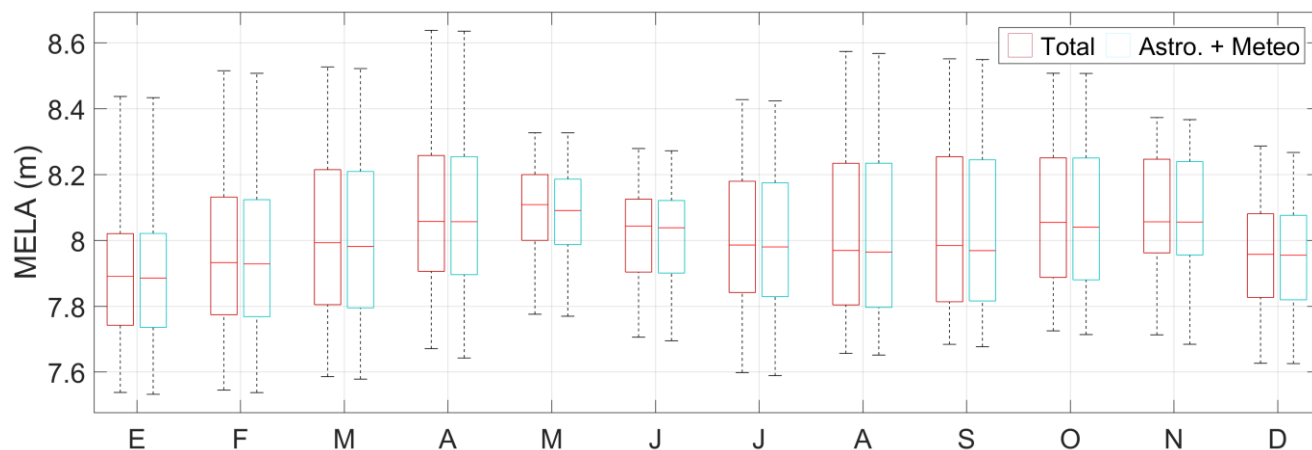


Figura 4. Box Whiskers plot del MELA Total (forzamiento astronómico + meteorológico + descargas, representado con una caja roja) y el MELA Astronómico + Meteorológico (representado con una caja cian) en el PK de Bonanza, representados por meses en el periodo temporal completo (E: Enero, F: Febrero, M: Marzo, A: Abril, M: Mayo, J: Junio, J: Julio, A: Agosto, S: Septiembre, O: Octubre, N: Noviembre, D: Diciembre). Las medianas se representan en cada caja con líneas horizontales rojas, las cajas representan el rango intercuartílico y los límites (whiskers) los intervalos de la mediana ± 1.5 veces la desviación típica.

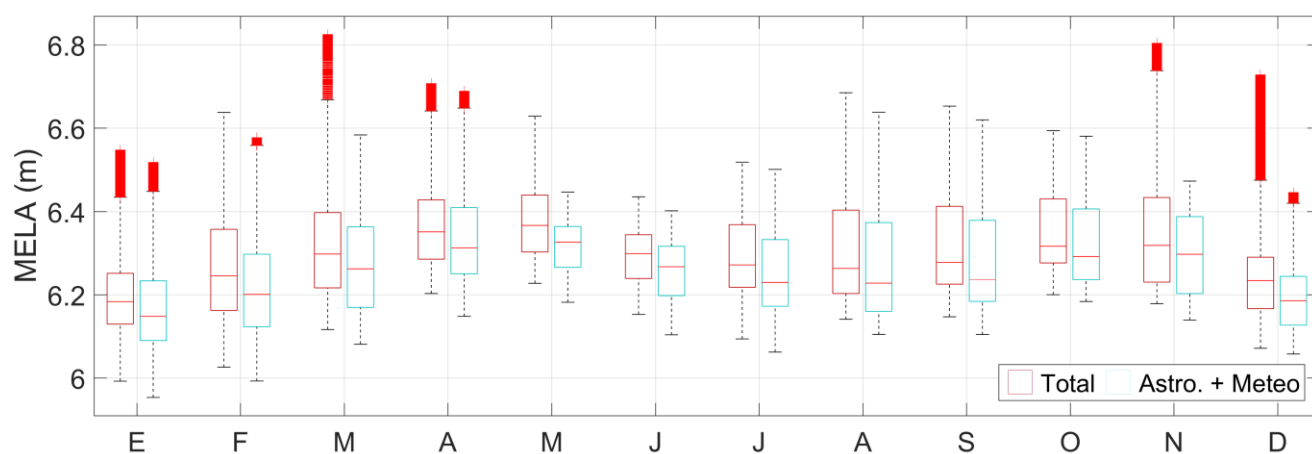


Figura 5. Como la Figura 5 para el PK de Sevilla.

Tanto la Figura 4 como la Figura 5, evidencian una marcada estacionalidad de la evolución del MELA en ambos PK, mostrando los mayores rangos de variabilidad, generalmente, en los meses de invierno y primavera. Los valores extremos más elevados, se observan en los mismos meses, como anomalías positivas, reflejando el efecto conjunto, o aislado por tipo de forzamiento, que genera un aumento del MELA. Los valores medianos (líneas horizontales rojas), presentan una periodicidad a lo largo del año con valores mínimos centrados en el primer (E,F,M) y tercer (J,J,A) trimestre del año y valores máximos en torno al segundo (M,A,M) y cuarto (O,N,D).

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

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

La tendencia estacional se observa de forma común en ambos PK pero el rango de variabilidad entre los dos MELA representados muestra diferencias sustanciales. Puesto que las descargas de agua dulce en las inmediaciones de la desembocadura son prácticamente inapreciables y, dado el hecho de que el MELA Total contiene de por sí el MELA Astronómico y Meteorológico, la diferencia entre el primer y segundo MELA en el caso de Bonanza (Figura 4) es mínima. No obstante, a pesar de la similitud en términos de centralidad de las distribuciones, sí que se observa un diferente rango variabilidad en función de los trimestres del año. Los meses de mayo y abril presentan una variabilidad bastante más reducida y valores medianos más altos, reflejo del paso frecuente de bajas presiones, pero con menos variabilidad que en invierno. Los meses en los que los MELA alcanzan valores mínimos son los meses invernales de enero y diciembre, presentando el primero una variabilidad ligeramente superior al segundo. En los meses de verano, la contribución a la variación del MELA de origen astronómico + meteorológico, es más moderado y menos variable, puesto que estos meses son los que más estabilidad meteorológica presentan.

En el PK de la Esclusa (Figura 5) la tendencia estacional observada en Bonanza (Figura 4) se repite, con una mayor variabilidad en los meses de invierno y primavera y un menor rango y mayor estabilidad en los meses estivales. No obstante, la diferencia entre las dos series del MELA es considerablemente más marcada que en el caso anterior. En este PK, es razonable afirmar que el forzamiento prevalente es el total, el cual incluye las descargas, mucho más efectivas en la parte alta del río (notar las medianas de las cajas rojas siempre mayores que las de las azules). Las descargas más elevadas se observan en los meses de invierno - primavera, cuando las anomalías son prevalentemente positivas (hacia un aumento del MELA). Los mínimos de variabilidad también se observan en los meses de tarda primavera - comienzo del verano, índice de la mayor estabilidad meteorológica. En este último caso, llama especialmente la atención la presencia de *outliers* en ciertos meses de la serie completa (enero, febrero, marzo, abril y, de forma más marcada, diciembre), los cuales no se veían representados en la Figura 14. El hecho de que éstos sean siempre positivos, confirma la influencia de las descargas en la Esclusa, ya que éstas siempre tienden a aumentar el ELA.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

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

3 CONCLUSIONES DE LA 322

En el presente informe, se ha descrito y puesto en práctica la primera aplicación del modelo en base a las correcciones batimétricas explicadas en el ST321.

El análisis llevado a cabo ha sido la evaluación y cuantificación de la importancia relativa de los distintos forzamientos sobre el Mínimo Espesor de la Lámina de Agua (MELA), con el fin de determinar su comportamiento en 10 localidades seleccionadas a lo largo del estuario desde la desembocadura (Chipiona) hasta la cabecera (Esclusa). Para llevarlo a cabo, se han ejecutado tres simulaciones del modelo hidrodinámico y se han evaluado las Contribuciones al Espesor de la Lámina de Agua (CELA) en dichos puntos, calculados como la envolvente negativa del nivel del río. A partir de los CELA y la batimetría disponible, se han determinado los valores del MELA en cada localidad.

Una vez obtenidas las simulaciones, se han planteado y llevado a cabo dos estudios estadísticos detallados del comportamiento MELA: uno que ha contemplado el periodo completo simulado (01/01/2016 - 01/01/2018) y otro que lo ha desglosado por meses, con el fin de valorar el grafo de afección que producen los distintos forzamientos bajo diferentes escalas temporales.

En la primera parte se han presentado las estadísticas promedio y la desviación estándar calculadas sobre las tres series temporales del MELA, así como la contribución aislada de las fuentes su variabilidad, para facilitar la justificación valor promedio del MELA. Por otra parte, también se han presentado los mínimos y máximos valores del MELA. De la primera parte, se ha concluido una mayor influencia de las descargas en las inmediaciones de la cabecera y, por tanto, un máximo valor del MELA Total en este tramo, y una influencia generalmente negativa del residuo meteorológico y, por tanto, un mínimo valor del MELA forzado con esta contribución. El MELA Astronómico ha reflejado valores gradualmente más positivos en dirección a la Esclusa, lo que ha confirmado la tendencia progresiva que sigue la marea en dirección a la cabecera.

En la segunda y última parte, se ha concluido una clara influencia de las estaciones en la variabilidad del MELA, observándose una menor (mayor) discrepancia entre las series del MELA Total y MELA Astronómico + Meteorológico en el caso de Bonanza (Esclusa).

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»

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

4 BIBLIOGRAFÍA

- Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga. (2019a). 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.
- Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga. (2019b). Actividad 2 - Nota Técnica. Cálculo de los 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. (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 Synchro.
- Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga. (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 Synchro.
- Siport21. (2020). Actividad 3: Estudios Detallados. Informe para la Autoridad Portuaria de Sevilla en el marco del proyecto AIRIS-II Synchro.

CONFIDENCIAL



Cofinanciado por la Unión Europea
Mecanismo «Conectar Europa»