

# **PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DIAGNOSTICAR Y PRONOSTICAR LAS CONSECUENCIAS DE LAS ACTUACIONES HUMANAS EN EL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR**

Septiembre 2010

## **Capítulo 1: Síntesis y Corolarios de la Parte I**

Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía – Centro  
Superior de Investigaciones Científicas

Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales  
(Centro Andaluz de Medio Ambiente – Universidad de  
Granada)

Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología  
(Universidad de Córdoba)



## *Antecedentes*

El 24 de Mayo de 2007 se firmó el contrato de adjudicación del procedimiento negociado sin publicidad entre la Autoridad Portuaria de Sevilla y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas para el estudio titulado “*PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DIAGNOSTICAR Y PRONOSTICAR LAS CONSECUENCIAS DE LAS ACTUACIONES HUMANAS EN EL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR*” coordinado por D. Javier Ruiz Segura (Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía – Consejo Superior de Investigaciones Científicas) y D. Miguel Á. Losada Rodríguez (Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales – Universidad de Granada).

Según lo establecido en el Anejo I del presente convenio se regulan las tareas científico-técnicas que le son asignadas al Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN).

Con fecha 17 de enero de 2008, fueron firmados sendos Convenios de Colaboración entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y las Universidades de Granada y Córdoba para la participación del Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (G DFA) y del Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología (G DFH), respectivamente, en la realización del citado estudio.

Inscrito en dicho marco de colaboración se encuentra el presente Informe que es *una síntesis del trabajo realizado en la Parte I y los corolarios más relevantes del mismo*, realizado por el G DFA, el G DFH y el ICMAN-CSIC. En este trabajo han participado los doctores siguientes: por el ICMAN, Javier Ruiz Segura; por el G DFH, María José Polo Gómez; y por el G DFA, Simona Bramato, Manuel Díez Minguito y Miguel Á. Losada Rodríguez, estando dirigido y redactado por el Prof. Miguel Á. Losada Rodríguez.



## **Objetivos y Organización del Informe**

En este Informe se analiza el estado actual del estuario, la desembocadura y la zona marina adyacente, especialmente tras las actuaciones humanas realizadas en los dos últimos siglos, y se pronostica su futuro más probable a la luz del régimen actual y del previsto de actividades humanas y de la variabilidad climática. El documento se organiza en dos partes: la Parte I se dedica al diagnóstico del estuario y la II al de la desembocadura y mar adyacente. Un segundo informe se podrá generar para analizar los distintos escenarios futuros que las partes interesadas identifiquen como alternativas de coexistencia/modificación/eliminación de usos, incluyendo en todos los casos los efectos de la variabilidad climática milenaria.

La Parte I del Informe se estructura en siete capítulos: este primero, de presentación y resumen, y seis más dedicados respectivamente a las descargas fluviales y los usos agrícolas, la dinámica mareal, la intrusión salina, la turbidez, las corrientes residuales, y los ecosistemas y la toxicidad.

Todos los capítulos están redactados para que se puedan leer y entender sin necesidad de conocer los otros capítulos. Por ello, es posible encontrar algunos de los aspectos más generales de la descripción y caracterización del estuario en más de un capítulo.

## **Situación actual del estuario del Guadalquivir y consecuencias**

1. **Definición.** Los estuarios son zonas de transición entre el medio fluvial y el marino, y se caracterizan por ser terrenos llanos inundables con suelos de fango y arena, prácticamente impermeables, drenados por diversos cauces y una tupida red de caños en los que se producen los gradientes espacio-temporales, a diferentes escalas, de la mezcla de agua dulce y salada. Se diferencian de un río por sus intercambios de agua, sedimentos, nutrientes y energía con la atmósfera y el océano, que determinan la dinámica y los procesos del estuario, y el desarrollo de una compleja y rica diversidad biológica.

2. **Morfología del estuario.** En la actualidad, principios del siglo XXI, el estuario del Guadalquivir, con una longitud aproximada de 110 km, se extiende desde la presa de Alcalá del Río hasta su desembocadura en la Broa de Sanlúcar, en aguas del Océano Atlántico, entre los arenales de Doñana y los acantilados pliocénicos. Es un estuario mesomareal de morfología convergente, al que los procesos morfo-hidrodinámicos naturales y las actuaciones humanas han dejado reducido a un cauce principal con numerosas cortas y algunos caños mareales. Por él circulan la marea astronómica (dos veces al día) y las descargas fluviales (moduladas por la ocurrencia de avenidas y los desembalses para el regadío) reguladas por el sistema de presas en la cuenca del río Guadalquivir, siendo la presa de Alcalá del Río el último punto de control del caudal del río. Véase Figura 1 y Figura 2.

3. **Actividades humanas.** Las actividades humanas han ido colonizando y compartimentando el estuario a lo largo de la Historia para acoger, entre otros usos, la agricultura intensiva bajo invernadero y el cultivo de arroz, la navegación comercial, pesquera y de recreo, las pesquerías y la acuicultura, las salinas, los desarrollos urbanos y sus infraestructuras, y una amplia red de carreteras y caminos, canales de riego y desagües a ambos lados del canal principal del estuario. Todo ello convive desde mediados del siglo pasado con las actuaciones para controlar las descargas fluviales y el flujo mareal en el Espacio Natural Doñana.

4. **Escalas de los procesos y evolución.** La elevación y la circulación de las masas de agua en cualquier punto del estuario, interior y exterior, dependen, principalmente, de los agentes: caudal del río, de la onda de marea y de las condiciones atmosféricas en el exterior del estuario y de la velocidad y dirección del viento. Estos agentes se suceden con varias escalas temporales, interactuantes entre sí. La más relevante es la escala semidiurna, con un periodo de poco menos de doce horas y media, luego se suceden los ciclos de mareas vivas y muertas

de, aproximadamente, 2 semanas y un mes. Los forzamientos atmosféricos y oceanográficos ocurren a escala de evento, principalmente asociados al paso de borrascas, y es de unos pocos días. La circulación global atmosférica y oceánica contribuye a modular este tránsito y se estructura en ciclos estacionales, anuales y plurianuales. Los regímenes fluviales resultan de la interacción de los agentes climáticos, la regulación ejercida en la cuenca aguas arriba de la presa (aproximadamente 48000 km<sup>2</sup>) y la demanda de agua para riego.

**5. Agentes, acciones y regímenes de caudales.** La simultaneidad y variabilidad temporal de los agentes naturales y la diversidad de las acciones humanas producen una amplia gama de regímenes hídricos del estuario, en un extremo aquellos relacionados con la escasez del recurso agua dulce y en el otro los provocados por las avenidas del río y los temporales (oleaje y viento) en la desembocadura. En este Informe se ha considerado que, en el primer caso, el caudal de agua dulce circulante es inferior a 100 m<sup>3</sup>/s, (en promedio 50 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente) la dinámica del estuario está dominado por la acción mareal y se denomina régimen de caudales bajos o de aguas bajas. El régimen de dominio fluvial (se corresponde con la presentación de avenidas), se establece cuando este caudal supera 1000 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente; entonces la dinámica fluvial controla la circulación de agua y sustancias en el estuario, la erodibilidad del cauce y los procesos asociados a la marea, salinidad y turbidez se subordinan a aquella. Entre aquellos dos se reconoce el régimen mixto fluvio-mareal en el que la dinámica del estuario transita, sin discontinuidad, entre aquellos dos regímenes. A partir de 250 m<sup>3</sup>/s las descargas fluviales reducen significativamente la intrusión salina y alteran la ubicación de los máximos de turbidez.

**6. Gestión de la variabilidad.** Los efectos de esta variabilidad natural en los usos del estuario se combaten en la práctica mediante criterios de gestión heterogéneos y descoordinados y conllevan, en general, la intervención prácticamente continua de las diferentes administraciones competentes y de los propietarios y titulares de las concesiones de usos; entre otras, el dragado periódico del cauce principal, el desvío para el regadío del agua dulce y su posterior vertido de los retornos cargados de nutrientes y productos fitosanitarios, la ocupación de los llanos mareales, los rellenos para urbanización y construcción de infraestructuras, el control mediante compuertas de la propagación de la onda de marea para mantener el Espacio Natural Doñana y para satisfacer las condiciones de uso que requieren las industrias salinera y de la acuicultura, etc.

**7. Incremento de usos y demandas.** En los últimos años ha aumentado la demanda de transformación del estuario para mejorar las condiciones de los diversos usos económicos y ambientales del estuario. A finales del siglo pasado, la Autoridad Portuaria de Sevilla presentó un proyecto para profundizar el canal de navegación; el sector arrocero proyecta atender las necesidades de agua dulce mediante la mejora del sistema de bombeo, la construcción de cinco balsas de almacenamiento y una nueva conducción para el suministro; el proyecto Doñana 2005 propone dismantelar el muro del río, construido en el último tercio del siglo pasado para separar algunas zonas del Espacio Natural de la circulación fluvial y mareal; la mayoría de las poblaciones ubicadas en el estuario están creciendo y han ampliado su trama urbana, y sus necesidades demandan suelo para infraestructuras de servicios y comunicaciones.

**8. Algunas consecuencias de la gestión actual.** Esta escalada de usos y la descoordinación práctica de la gestión, que, en general, se desarrolla sin cuantificar previamente sus consecuencias en el conjunto global de procesos y en la evolución del estuario y en el resto de actividades humanas, se manifiestan a través del agotamiento de los recursos básicos de suelo y agua e imposibilitan la satisfacción de todas las demandas, provocando, por un lado, fuertes debates y crispación social y, por el otro, citando algunos ejemplos, episodios prolongados de turbidez y toxicidad en las aguas afectando a los caudales de bombeo de los cultivos de arroz, erosión de los arenales litorales de Doñana, intrusión de arena y reducción de la sección útil de la desembocadura, movilidad y erosión de las márgenes del cauce principal del Guadalquivir y reducción de calado del canal de navegación, sobreexplotación de los acuíferos de la zona, reducción crónica de la diversidad biológica y del potencial pesquero y marisquero, sedimentación de fangos y limos en las playas próximas a la desembocadura, cegamiento de los canales de suministro de agua a las instalaciones de acuicultura y salinas.

## ***Dinámica fluvio-mareal del estuario y corrientes residuales***

9. **Comportamiento unidimensional.** Desde mediados del siglo XVII, para mejorar la navegabilidad se viene modificando el cauce principal del río del Guadalquivir ejecutando cortas, rectificaciones de curvas y profundización del cauce. Con las actuaciones de finales del siglo pasado la profundidad media del canal de navegación en el tramo medio del estuario pasó de cuatro a seis metros; esta profundidad se mantiene mediante dragados periódicos. Los principales efectos hidráulicos de esta actividad son mantener e incluso ampliar la amplitud de la marea hacia aguas arriba del estuario (con respecto a la amplitud en la desembocadura) y facilitar la descarga de los caudales de avenida reduciendo el área de las zonas inundables y su frecuencia temporal. Por otra parte, desde mediados del siglo pasado en el estuario del Guadalquivir se han reducido los llanos mareales en más de un 85% para destinarlos a fines agrícolas y ganaderos y al Espacio Natural Doñana, o por el vertido en las márgenes del material procedente del dragado. Con estas condiciones la propagación de onda de marea y la circulación fluvial es esencialmente unidimensional.

10. **Infraestructuras hidráulicas y régimen anual de descargas.** En el pasado siglo, principalmente, se realizaron numerosas actuaciones hidráulicas, presas, azudes, canalizaciones, tomas de agua, etc., para regularizar los caudales del río y mitigar los efectos de las avenidas. La construcción de embalses en la cuenca aportadora, con un volumen máximo de almacenamiento que pasó de 1646 a 6554 hm<sup>3</sup> desde 1950 a 2000, y el desarrollo de grandes áreas de regadío desde los años 30 del siglo XX (que incrementaron su superficie hasta un 181%) han modificado el régimen anual de la descarga fluvial, habiéndose reducido los aportes de agua dulce al estuario en un 60% como media (desde los aproximadamente 5000 hm<sup>3</sup>/año del periodo 1931-1981 hasta los 2000 hm<sup>3</sup>/año del periodo 1981-2000) con valores superiores de reducción en años de ciclos secos. Las descargas desde la presa de Alcalá del Río, que circula las aportaciones desde el embalse de Cantillana con un desfase inferior a un día, suponen en la actualidad aproximadamente el 80% de los aportes fluviales que reciben el estuario. Véase Figura 3.

11. **Velocidad y nivel del río.** El caudal medio diario desde 1981 es 63 m<sup>3</sup>/s, aproximadamente, si bien el 50% de los días de este periodo su valor medio es mucho menor (25 m<sup>3</sup>/s); los ciclos secos y húmedos hiperanuales condicionan dicho régimen, con un caudal medio diario de 43 m<sup>3</sup>/s durante los años 1981 a 1995 (con dos intervalos de sequía marcada), que asciende hasta 83 m<sup>3</sup>/s desde 1995 a 2009. La velocidad de la corriente fluvial en el régimen de aguas bajas es muy pequeña 1-5 cm/s y su contribución al nivel de las aguas es despreciable. En régimen de avenidas la velocidad fluvial puede superar en el último tercio del estuario (aguas arriba) la velocidad de 3 m/s, que se reduce paulatinamente hacia la desembocadura, donde, aproximadamente, descarga con 0.5-1 m/s. En estas condiciones, su efecto se superpone (linealmente) con la onda de marea determinando la velocidad de descarga, el nivel de las aguas y la distribución de la salinidad y la turbidez.

12. **Amplitud y características oscilatorias de la marea.** La onda de marea al propagarse por el interior del estuario se asomera por el efecto de la convergencia del cauce, disipa energía por fricción y se refleja en cambios de sección y en la presa de Alcalá del Río. En el tramo bajo del estuario, (primeros 15 km, aproximadamente) el efecto de la fricción supera al asomeramiento reduciendo la carrera de marea (estuario hiposíncrono), de forma más significativa en vivas (25%) que en muertas (<5%) con respecto a la amplitud en mar abierto. En el tercio medio del estuario (PKs 15 a 40-50) la fricción y el asomeramiento (convergencia) están sensiblemente en equilibrio y la amplitud no cambia sustancialmente. En el tercio alto del estuario, la onda de marea alcanza con suficiente energía la presa de Alcalá del Río donde se refleja incrementando su amplitud (estuario hipersíncrono); en ese tramo el régimen mareal es parcialmente estacionario presentando quasi-nodos y quasi-antinodos; en mareas vivas se recupera la amplitud de la desembocadura y en mareas muertas se incrementa hasta un 60% aquella amplitud. El resultado es la reducción de las diferencias en amplitud entre mareas vivas y muertas en ese tramo del estuario. Véase Figura 4 y Figura 5.

13. **Consecuencias de la transformación oscilatoria.** La transformación del carácter oscilatorio de la onda de marea a lo largo del estuario (de marea cooscilante progresiva en el

borde de la plataforma continental a parcialmente estacionaria en su último tercio), conjuntamente con las descargas fluviales y la acción del viento, tiene importantes consecuencias, entre otros, en la morfología del cauce, la formación de barras en el tercio superior, la erosión de las márgenes, la migración de los contornos, y en la magnitud y distribución espacio-temporal de los sólidos en suspensión, y la calidad de las aguas, especialmente, del oxígeno disuelto y de la toxicidad, así como en su distribución espacial y temporal y en su persistencia. Véase Figura 6.

**14. Asimetría, sobremareas y corrientes residuales.** Durante la propagación de la onda de marea por el estuario se generan nuevas componentes armónicas, super-armónicas (M4 y SM4, entre otras, que dependen de la relación entre la amplitud y la profundidad) y sub-armónicas (Msf y Mm, sobremareas escalas de 14 y 28 días, aproximadamente, que dependen de las amplitudes lunar y solar) que se manifiesta en la asimetría vertical y horizontal de la onda de marea. Las corrientes de llenante son mayores que las de vaciante (el dominio de la llenante es una característica de los estuarios con poca superficie de llanos mareales y marismas), favoreciendo la colmatación del estuario y la baja tasa de renovación de las aguas. Las sobremareas tienen un nodo, aproximadamente, en el km60 y generan corrientes residuales del orden de 1-5 cm/s, del mismo orden que las corrientes de Stokes, de densidad, onda de Ekman y circulación fluvial en regímenes de aguas bajas. La distribución espacio temporal de este sistema de corrientes residuales desempeña un papel relevante en la tasa de renovación de las aguas en el estuario y en la distribución espacial de sedimentos, especialmente los máximos de turbidez y su persistencia. Véase Figura 7.

**15. Circulación transversal.** En ausencia de acciones humanas, la pendiente de la márgenes derecha e izquierda del cauce dependen de la variabilidad transversal de las corrientes y de la inestabilidad de la circulación mareal. El primer tercio del estuario finaliza con una geometría del canal de fuerte curvatura que dominan las corrientes transversales, produciendo variaciones de profundidad que pueden superar 3-5 metros en una avenida y provocar la migración media anual de las márgenes en más de un metro. En el segundo tercio la variabilidad transversal de la corriente de marea parece estar relacionada con la inestabilidad de la circulación mareal alimentada por la morfología rectilínea del cauce (cortas y mantenimiento de las alineaciones del canal de navegación). Estas situaciones favorecen la tendencia a desarrollar meandros, erosionando alternativamente de una a otra margen en una longitud que depende del prisma de marea en esa zona (velocidad de la corriente), inscribiendo formas dentadas en las riberas y colmatando el cauce. Las ondas generadas por el tránsito de los barcos también contribuyen a la migración en las zonas de curvatura y erosión de las márgenes. La magnitud e importancia de su efecto depende de la velocidad del barco y de su geometría, eslora, manga y calado. Véase Figura 8.

**16. Interacción marea - descarga fluvial.** En condiciones de regímenes medios de caudales (>500m<sup>3</sup>/s) y de avenidas, el nivel y las velocidades de las aguas en el estuario (tanto en llenante como en vaciante) se pueden aproximar por la superposición lineal de la contribución mareal y la fluvial. Asimismo, en condiciones de avenida se modifica la morfología de la sección, erosionando lecho y márgenes. Tras la descarga, se produce una relajación morfológica hasta que el cauce recupera parcialmente la forma que tenía antes de la descarga, que se mantiene merced a los trabajos de dragado de mantenimiento. El periodo de relajación puede superar los dos meses, dependiendo de la magnitud de la descarga. Véase Figura 9 y Figura 10.

**17. Interacción marea- viento-oleaje.** La presencia de viento (velocidad superior a 10m/s, aproximadamente) en la plataforma altera las características de la onda de marea y, si es persistente, afecta, de forma significativa, entre otros, a la distribución de salinidad en el estuario interno, turbidez, los tiempos de residencia y a los procesos asociados, oxígeno disuelto y toxicidad. En general, para estuarios en los que la variabilidad lateral es despreciable, como el del Guadalquivir, el viento remoto tiende a producir un flujo unidireccional que se dirige hacia el interior cuando el nivel de agua aumenta sobre el nivel medio y hacia el exterior cuando el nivel de agua desciende. La amplitud de la velocidad depende de la velocidad y dirección del viento y es del mismo orden, aunque, en general, superior (5-15 cm/s) a la magnitud de las velocidades residuales. Los valores más altos ocurren con vientos del Este y la oscilación puede perdurar varios días aunque el viento



forzador haya dejado de actuar. La interacción del oleaje y la circulación mareal se manifiesta por la modificación de la resultante neta sobre los sedimentos y en la morfología del fondo. El avance de los arenales de Doñana ha "empujado" la descarga mareal hacia la ribera izquierda, desestabilizando el canal de navegación y haciéndola asimétrica.

**18. Corrientes residuales.** El promedio en un ciclo de marea de las componentes de la velocidad de marea en un punto del estuario es un valor no nulo, resultando una corriente neta denominada corriente residual de marea. Si bien es una corriente pequeña comparada con las velocidades instantáneas, sus efectos en el transporte de sustancias son importantes puesto que, a efectos prácticos, actúan como una corriente en régimen permanente. Además, la acción del viento, las diferencias de densidad (por temperatura y salinidad) entre dos tramos de estuario, la descarga fluvial y las corrientes inducidas por la asimetría del cauce (tramos curvos, meandros y dragado) generan corrientes que, promediadas en un ciclo mareal, tienen velocidad no nula. En ausencia de una potente circulación mareal en llanos mareales, este movimiento residual gobierna la capacidad de llenado y vaciado del estuario, tanto de las masas de agua como de sólidos en suspensión y sales, y otras sustancias.

**19. Corrientes residuales en el Régimen de caudal bajo.** En régimen de aguas bajas la circulación residual en el estuario del Guadalquivir está regulada por la propagación y transformación (asomeramiento, fricción y reflexión) de la onda de marea; las más significativas son la deriva de Stokes, siempre dirigida hacia la cabecera del estuario, y la deriva Euleriana cuyo sentido depende del tramo. Aquella, la descarga fluvial y la corriente por gradientes de densidad (dirigida hacia la cabecera del estuario) son del mismo orden de magnitud 5-10 cm/s. Los ciclos de mareas vivas y muertas refuerzan o debilitan la corriente residual mareal (variabilidad a escala submareal) y alteran la resultante de estas corrientes en los diferentes tramos del estuario.

**20. Variabilidad espacial.** En aguas bajas, la marea domina la resultante neta de las corrientes residuales, (promedio en un ciclo de marea), que varía a lo largo del estuario y determina el comportamiento del estuario por tramos, es decir, define un estuario no uniforme con diferencias notables entre ellos. El motor de esa variabilidad es el comportamiento diferenciado de la onda de marea, que pasa de un movimiento esencialmente progresivo en el primer tercio del estuario hasta un movimiento casi estacionario en el último tercio, aguas arriba, del estuario. La descarga fluvial se dirige siempre hacia la desembocadura y es la componente principal para poder controlar la resultante neta de las corrientes residuales en un tramo del estuario.

**21. Estuario bajo el dominio fluvial.** En condiciones de avenida la descarga fluvial supera en uno o dos órdenes de magnitud a las corrientes residuales; su resultante neta es hacia la desembocadura, controlando la evolución y los procesos morfodinámicos del estuario. La geometría de la desembocadura determina la forma de la descarga y regula los procesos y la evolución de los sedimentos al llegar al mar.

**22. Desequilibrio morfodinámico y gestión.** La morfología, la dinámica y los movimientos residuales evidencian que, a las diferentes escalas de funcionamiento, el estuario no alcanza un estado de equilibrio morfodinámico; no hay un equilibrio entre la dinámica sedimentaria y la hidrodinámica. La reducida contribución de los llanos mareales, los dragados periódicos necesarios para mantener el tránsito de buques hasta el puerto de Sevilla, el mantenimiento de las descargas en aguas bajas ("caudal ecológico" y agua para el regadío) y las descargas desde la presa de Alcalá del Río necesarias para la regulación de las avenidas, mantienen el sistema estuario en situación de desequilibrio. La cuantificación de la heterogeneidad espacial y temporal de las corrientes residuales debe ser el fundamento de una estrategia para la gestión del estuario en desequilibrio. La tramificación funcional del estuario según el sentido de las corrientes de baja frecuencia aporta información cuantitativa sobre el transporte de sedimentos, la evolución de la turbidez y de la salinidad y, por ende, la productividad primaria y la toxicidad de las aguas. Las prioridades de usos y el control de todas las intervenciones humanas deben servir para minimizar los efectos del desequilibrio del estuario y la duración y las consecuencias de los episodios indeseados.

## **Salinidad, intrusión salina y cuña salina**

23. **Salinidad.** Los aportes salinos al estuario llegan del océano, donde la salinidad se encuentra en el intervalo 30 - 35.5 PSU, con la propagación de la onda de marea. En el estuario las aguas salinas se mezclan con las aguas del estuario de salinidad más reducida debido a la circulación fluvial. Debido a la configuración geométrica, tanto la dinámica como el transporte de sales en el estuario es un proceso eminentemente unidimensional. No obstante, en los tramos de fuerte curvatura, o con barras longitudinales y fuerte asimetría transversal del cauce, se pueden generar zonas de casi parada e inversión de la circulación mareal, fomentando la localización de puntas de salinidad y gradientes transversales de salinidad que, en general, son poco relevantes para la dinámica pero, en un estuario tan limitado como éste, pueden desempeñar un papel significativo en los flujos biogeoquímicos a escala local y en el desarrollo de los ecosistemas. Véase Figura 10.

24. **Regímenes de intrusión y cuña salina.** En el régimen de aguas bajas, la intrusión salina (longitud del estuario en la que la salinidad presenta el 5 -10 % de su valor en mar abierto) en el estuario y su variabilidad temporal dependen, esencialmente, de la dinámica mareal; en estas condiciones, los máximos y mínimos de la salinidad en cualquier punto del estuario coinciden con los instantes de la estoa (velocidad mareal nula) de llenante y vaciante, respectivamente. En el régimen de caudales medios y avenidas ( $Q > 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) la circulación fluvial mantiene las aportaciones salinas cerca de la desembocadura, formando la estructura de cuña salina.

25. **Longitud de la intrusión salina.** En el régimen de caudales bajos, la variación espacial de la salinidad promediada en un ciclo semidiurno es gradual, suave, con forma de media campana, y la marea controla la dinámica y la posición de la intrusión salina. Desde los valores máximos en la desembocadura, la salinidad decrece a lo largo del cauce, hasta alcanzar las proximidades de la Punta de la Mata (unos 40 km estuario arriba) donde la salinidad máxima es menos del 5% de su valor máximo en la desembocadura; desde allí hasta la presa de Alcalá del Río, los valores de la salinidad son prácticamente despreciables. Los principales procesos físicos que controlan este comportamiento son la advección por las corrientes residuales medias y la difusión turbulenta. El descenso fuerte de la salinidad media se produce entre los PKs 18 (Cepillos) y 26 (Esparraguera-Tarfía), y su posición espacial, promedio en el tiempo, queda definida por la corrientes residuales netas (promediadas en un ciclo mareal) en el estuario debidas a las circulaciones mareal y fluvial, los gradientes de salinidad y los efectos del viento. Véase Figura 12.

26. **Variabilidad temporal de la intrusión salina.** La intrusión salina varía, alrededor de su valor medio, con el ciclo mareal por el efecto advectivo de la corriente de marea (y de los procesos difusivos turbulentos). La localización espacial del tramo de estuario en el que se produce la variación fuerte de la salinidad depende del estado de la marea, y se puede predecir de forma simple trasladando la curva hacia la desembocadura para la vaciante y hacia Sevilla en la llenante. En mareas muertas el tramo se desplaza unos 8 km arriba y abajo de su posición media, y se detiene en las proximidades de la Corta de los Jerónimos, mientras que en mareas vivas el desplazamiento es del orden de 20 km, alcanzando los 80 km estuario arriba (Pta. del Verde). Esta distancia es también una indicación del desplazamiento medio de las partículas de agua en el ciclo mareal. El caudal fluvial circulante y su persistencia en el tiempo son determinantes en la longitud media de la intrusión salina en el estuario. En invierno, los aportes desde la cuenca se incrementan y la intrusión salina se puede recortar entre 10 y 20 km con respecto a periodos de estiaje.

27. **Descargas y cuña salina.** En régimen de avenida (caudales del orden y superiores a  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) la descarga de agua dulce controla el transporte de sustancias y desplaza la mezcla de agua hasta la desembocadura, donde el encuentro abrupto con las aguas saladas oceánicas forma una estructura de cuña salina. La transición tiene una longitud aproximada de un kilómetro, con circulación superficial del agua dulce y del agua salada por debajo, separadas por una interfase plana donde se producen violentos procesos de mezcla. A su alrededor se pueden encontrar aguas parcial y temporalmente estratificadas. Aguas arriba de ese punto la

masa de agua bien mezclada es, esencialmente, dulce. En promedio se producen 4-6 episodios de cuña salina (generación, evolución y desaparición) en un año en el estuario del Guadalquivir y su duración media es el orden de 5-7 días.

**28. Tiempo de recuperación del régimen de aguas bajas.** Tras remitir el régimen de caudales medios o de avenida y establecido, de nuevo, el régimen de caudales bajos, el estuario inicia la reconstrucción del régimen de intrusión salina. El tiempo de recuperación en un punto cualquiera del estuario depende, principalmente, de la distancia a la desembocadura, del caudal de agua dulce, de la dinámica mareal (vivas o muertas), y del viento y del oleaje en la desembocadura. La combinación de agentes es muy amplia por lo que se pueden producir tiempos de recuperación muy diferentes. Por ejemplo, tras una descarga de 500 m<sup>3</sup>/s se ha medido un tiempo de recuperación de la intrusión salina de 13 días en la zona de Cepillos que se amplía hasta los 17 días en la Pta. del Verde. En ausencia de viento y descarga fluvial, el tiempo de recuperación del régimen de intrusión salina depende de la velocidad residual neta hacia aguas arriba que, en general, es del orden de 5-10 cm/s.

### ***Sólidos en suspensión, persistencia y morfología***

**29. Fuentes de los sólidos en suspensión.** A diferencia de la salinidad, los sólidos en suspensión del estuario provienen de diversas fuentes: las descargas del río desde la presa de Alcalá del Río y otros cursos fluviales, la erosión de cauces y márgenes por las descargas fluviales, la acción de la marea y, en su caso, el oleaje local, y desde la plataforma continental interior y desembocadura, transportados por la circulación (marea, viento y oleaje). Estas fuentes se completan con las aportaciones desde los caños, los esteros y las acequias de riego, y por el dragado y la navegación. Véase Figura 13.

**30. Turbidez.** La turbidez de las aguas del estuario, o pérdida de transparencia, se debe al contenido de sólidos en suspensión, partículas de la fracción fina y muy fina inmersas en el fluido, cuya evolución temporal (tiempo de alcanzar el fondo) depende de las fuerzas turbulentas y de las de presión en presencia de la gravedad. Las condiciones salinas de las aguas del estuario favorecen la formación y mantenimiento de flóculos por aumento de su cohesividad y fomento de colisiones entre partículas individuales, alterando su velocidad de sedimentación y la turbidez que genera una determinada cantidad de sólidos en suspensión. La turbidez se caracteriza en *Unidades Nefelométricas de Turbidez (Nefelometric Turbidity Unit, NTU)* y puede proporcionar, además, una estimación de la concentración de TSS (Sólidos Totales en Suspensión). De la información recopilada en los últimos 18 años (diversas fuentes y métodos de medida y análisis) en el estuario se pueden definir cuatro intervalos de turbidez en función de su frecuencia en la muestra de datos: un 50% de los datos no superan el umbral de 500 mg/L, un 20% de los datos superan 800 mg/L y en un 10% de los datos la concentración excede 900 mg/L.

**31. Variabilidad de la turbidez.** La turbidez a lo largo del eje principal del estuario aumenta con las descargas en la presa, aunque su magnitud difiera de un tramo a otro. El desfase mensual encontrado entre la ocurrencia de descargas y el aumento de la concentración de sólidos en suspensión en la zona de máxima turbidez, situada en el tramo medio-bajo (en contraposición a un desfase en la respuesta de salinidad del estuario de 1-2 días), evidencia que la turbidez en el estuario y su persistencia no se deben tan sólo a aportes directos de sedimentos desde las cuencas vertientes, sino a su amplificación por procesos de resuspensión y/o erosión local del lecho y márgenes debido a los cambios hidrodinámicos que se inducen en el propio estuario.

**32. Regímenes de turbidez en el estuario.** La simultaneidad y variabilidad temporal de las fuentes de sólidos en suspensión, tanto agentes naturales como debidos a las actividades humanas, producen un amplio espectro de niveles de sólidos en suspensión en el estuario. Una vez en el seno del fluido su evolución espacio-temporal depende de la competencia entre las fuerzas que mantienen (o resuspenden) las partículas flotando y las que las empujan hacia el fondo. Durante el tiempo en el que se encuentran en flotación su movimiento neto horizontal depende de la circulación residual (en ese tiempo) en el estuario. A partir de los datos

disponibles se han definido tres regímenes (patrones) de turbidez en el estuario en función de la fuente principal de sedimentos.

**33. Turbidez en régimen de caudal bajo.** Es el régimen más frecuente; ocurre y domina cuando el régimen hídrico es de caudal bajo, el viento exterior es inferior a 5 m/s y el oleaje en la desembocadura no resuspende sedimento ( $H_s < 1$  m). El estuario se encuentra bien mezclado y la fuente principal de sedimentos es la erosión de una capa "flotante" de lecho por la acción mareal de un metro de espesor aproximadamente. A diferencia de lo que ocurre con la salinidad, la señal de turbidez en el interior del estuario está forzada principalmente por tres componentes,  $M_{sf}$ ,  $M_2$  y  $M_4$ . En estas condiciones la evolución espacio-temporal de los sólidos en suspensión (y la corriente residual) está dominada por la marea astronómica y sus ciclos quincenales de vivas y muertas. La contribución fluvial es casi despreciable y los tiempos de residencia siguen los ciclos de mareas vivas y muertas; aquellas levantan más lecho que éstas. La turbidez crece con la profundidad ya que las fuerzas turbulentas son mayores en las proximidades del fondo. En estas condiciones la concentración de sólidos en suspensión en la zona de máximo de turbidez se encuentra en el intervalo de decenas a pocas centenas de miligramos por litro.

**34. Turbidez en régimen mixto fluvio-mareal.** Cuando la descarga fluvial supera 250 m<sup>3</sup>/s, y, en particular, cuando alcanza 500 m<sup>3</sup>/s, proporciona una nueva fuente de sedimentos (menor que la de la marea); además influye de forma determinante en la corriente residual en todo el estuario, especialmente aguas arriba del PK 40; la recesión de la intrusión salina modifica el equilibrio vertical de las partículas y la turbidez se incrementa notablemente con respecto al régimen anterior. En estas condiciones la concentración de sólidos en suspensión en las zonas de máximo de turbidez se encuentra en el intervalo de centenas de miligramos a unos pocos gramos por litro.

**35. Turbidez bajo el dominio fluvial.** Este régimen de turbidez se relaciona con el régimen hidráulico con caudal fluvial superior a 1000 m<sup>3</sup>/s y su relevancia como fuente de sedimentos, ya que aporta sólidos en suspensión desde la presa procedentes del río, por la erosión del lecho aguas abajo de la presa (reforzada por la forma del vertido bajo compuerta) y a lo largo del cauce, y por el incremento de velocidad en márgenes y lecho. Además de provocar cuña salina, incrementa significativamente la velocidad residual hacia la desembocadura. La evolución espacio-temporal de los sólidos en suspensión (y la corriente residual) está controlada esencialmente por la descarga fluvial; hay un transporte neto de sólidos en suspensión hacia el mar. La forma y la distancia del vertido en el mar, la dinámica de la "pluma de vertido", así como su posible reincorporación al estuario están controladas por las condiciones atmosféricas y marítimas en el entorno de la desembocadura y por el caudal de descarga. En estas condiciones la concentración de sólidos en suspensión en cualquier punto del estuario puede ser muy elevada, pudiendo exceder diez gramos por litro.

**36. Tránsito entre regímenes y episodios.** Estos tres regímenes pueden estar afectados por la acción del viento y el oleaje en la desembocadura. Su contribución a la turbidez es múltiple pues aportan sólidos en suspensión y modifican el régimen de corrientes residuales de diversas formas. Dependiendo de las condiciones atmosféricas y oceanográficas, y de la gestión de la recesión del caudal del río, los episodios de turbidez generados bajo el dominio fluvial pueden evolucionar, en promedio, durante un mes aproximadamente, hasta recuperar el nivel de turbidez correspondiente al régimen de caudal bajo (régimen permanente). Las descargas fluviales con caudal inferior a 250 m<sup>3</sup>/s reducen la duración de los episodios de turbidez y de los transitorios en todo el estuario.

**37. Tramos con turbidez máxima.** Al igual que en otros estuarios, la curva de turbidez a lo largo del eje del estuario presenta máximos y mínimos. En el régimen de caudal bajo se han identificado dos tramos de turbidez máxima; el primero ubicado en el tramo entre El Puntal – Esparraguera y el segundo, estuario arriba, entre El Mármol y Sevilla. El primero se debe principalmente al incremento de la capacidad de resuspensión por la circulación en zonas con radios de curvatura pequeños. El segundo es muy amplio espacialmente y está asociado a la concomitancia de diversos agentes, el dragado y la transformación del movimiento mareal en estacionario, entre otros.

**38. Turbidez en el tramo Esclusa-Presa de Alcalá del Río.** En este tramo la onda de marea es parcialmente estacionaria y el transporte neto de sedimentos en suspensión en la capa límite oscilatoria genera acumulaciones de sedimento (barras transversales) en los antinodos y erosión en los nodos. La distancia entre barras depende del periodo de la componente cuartodiurna. Estas barras pueden desaparecer por la acción de una descarga fluvial moderada, si bien la tendencia de la dinámica mareal es a su inmediata reconstrucción. Algunas de las barras y los senos transversales que se pueden observar entre Sevilla y Esparraguera pueden estar siendo controlados por la reflexión de las componentes M2 y S2 en la presa de Alcalá del Río.

**39. Episodios de turbidez extrema y persistencia.** Desde principios del siglo pasado el estuario del Guadalquivir ha tenido varios episodios de turbidez extrema de larga duración afectando a todo el estuario. La mayoría de ellos se activaron tras circular por el estuario caudales muy elevados concentrados en uno o pocos días, sucedidos y precedidos por largos periodos sin descargas. El sedimento proviene en su mayor parte de la erosión del lecho, resuspendido por el brusco incremento de los esfuerzos de corte en el fondo y las márgenes, provocando un cambio morfológico e hidráulico del cauce. La recuperación parcial del cauce mediante la decantación del sedimento y los flóculos por la acción gravitatoria es lenta (puede durar meses) dependiendo de las condiciones mareales y en la plataforma. La duración de estas altas concentraciones de sedimento en suspensión se puede reducir mediante la gestión de las descargas desde la presa de Alcalá del Río. Véase Figura 14.

**40. Condiciones en la plataforma.** La presencia de viento en la plataforma altera las características de la onda de marea y, si es persistente, afecta a la distribución de sólidos en suspensión en la desembocadura y en el estuario interno. Vientos provenientes del Estrecho de Gibraltar y la presencia de la onda de Ekman, acompañados de oleaje pueden, asimismo, propiciar un incremento y mantenimiento de concentraciones elevadas de material en suspensión y la reducción de su capacidad de extracción hacia el mar. Vientos de procedencia N-NNE favorecen la surgencia de aguas profundas y la renovación del agua estuarina, incluyendo sólidos en suspensión. El oleaje en la desembocadura es un agente "resuspensor" de sedimento y su rotura en los arenales de Doñana genera un potente mecanismo de transporte de sedimentos en el estuario.

**41. Turbidez por la actividad humana.** La operatividad portuaria con el tránsito de buques hacia el puerto de Sevilla es un elemento más que condiciona la evolución morfológica y sedimentológica del estuario, así como la calidad de sus aguas. Durante el tránsito, dependiendo del desplazamiento, la velocidad y el estado de carga del buque, la acción de las hélices de propulsión sobre el fondo, la generación de estelas de turbulencia y la formación de trenes de onda, produce la resuspensión de sedimentos (principalmente de la capa "flotante") y, eventualmente, la erosión de las márgenes. Los efectos de un único barco navegando a velocidad controlada en un ciclo de marea no es comparable con los de la onda de marea. No obstante, elevando el número de barcos que transita en un ciclo de marea se puede incrementar significativamente el régimen de fuerzas sobre el fondo y el régimen de corrientes residuales. Asimismo, la política de dragado, "cuándo, dónde y cuánto", y las técnicas empleadas repercuten en el comportamiento mecánico del fondo, el espesor de la "capa flotante" y la estabilidad de las márgenes. Tras un dragado "artificial", al igual que tras un dragado "natural" por una avenida, el estuario trata de restaurar el equilibrio morfológico asociado a la dinámica mareal en el régimen de caudal bajo, en particular su profundidad.

### ***Ciclos biogeoquímicos y toxicidad***

**42. Aportes de nutrientes y otros.** Las descargas fluviales en Alcalá del Río también suponen una importante fuente de aportes de sustancias asociadas (ya que, por su extensión, este punto engloba las mayores cantidades de agua, sedimentos y nutrientes), por lo que en términos absolutos, los mayores vertidos contaminantes, tanto de origen agrícola como urbano, proceden de esta zona. Sin embargo las cuencas vertientes a la margen izquierda del estuario, suponen los mayores aportes de nutrientes en términos relativos, especialmente desde las zonas agrícolas. Esta elevada carga de nutrientes así como de materia orgánica particular y en

disolución es un importante agente de desequilibrio ecológico en el contexto de la profunda heterotrofia detectada en el Guadalquivir.

**43. Sólidos en suspensión y transmisión de la luz.** Las elevadas concentraciones de sólidos en suspensión limitan de forma severa la penetración de la luz en las aguas del estuario. El coeficiente de extinción vertical de la luz es en promedio anual 20 veces mayor que en otros estuarios similares, alcanzando en primavera valores 40 veces superior. El nivel de radiación incidente al que el fitoplancton tiene acceso resulta significativamente mermado, impidiendo una eficiente transformación de la energía lumínica en biomasa a través de la fotosíntesis. Véase Figura 15.

**44. Hipoxia.** El efecto inhibitorio de la disponibilidad de radiación incidente debida a la turbidez de las aguas y la elevada carga de materia orgánica que recibe el estuario repercute en el alto grado de hipoxia que soporta éste durante determinados periodos del ciclo anual en áreas extensas del mismo. Don Isaías constituye la zona caracterizada por una mayor hipoxia, ya que durante el periodo de estudio la concentración de oxígeno se mantuvo en un 90% del tiempo por debajo del nivel marcado como crítico (2,9 mg/L según la Agencia de Protección Ambiental de EEUU). El escenario opuesto se aprecia en Broa, donde el contacto con la zona costera favorece la ventilación y oxigenación del sistema a través de la marea. En dicho intervalo el estuario no tuvo limitación de nutrientes tanto con respecto al nitrógeno como al fósforo. Véase Figura 16.

**45. Hipercapnia.** El estuario sufre una severa hipercapnia (niveles elevados de la presión parcial de CO<sub>2</sub>), enfatizando la presencia de heterotrofia. La presión parcial de CO<sub>2</sub> en el cauce se situó siempre por encima del nivel atmosférico medio equivalente a 382 ppm durante el periodo de estudio, reflejando el comportamiento del sistema como una fuente de dióxido de carbono hacia la atmósfera. El máximo valor registrado durante el periodo de estudio, correspondiente a 3112 ppm, se observó en la Boya 47 en enero de 2009, registrándose un mínimo de 445 ppm en la Broa en junio de 2008. El impacto de la elevada concentración de CO<sub>2</sub> (y de un valor reducido de pH) se aprecia tanto en la comunidad zooplanctónica como en la fauna bentónica, aunque las consecuencias son particularmente drásticas en el caso de esta última debido a su relativo carácter sésil y a las condiciones físico-químicas del propio sustrato. El estado hipercápnico prolongado del sistema es, por tanto, uno de los factores que contribuye a la baja riqueza específica del bentos en el estuario.

**46. Variabilidad temporal y distribución espacial en el régimen de caudal bajo.** Más del 80% de los días del año el estuario se encuentra bajo el dominio de la dinámica mareal con caudal de agua dulce inferior a 100 m<sup>3</sup>/s. En estas condiciones se producen dos máximos de turbidez, en los tramos Cepillos-Esparraguera y Mármol – Sevilla, y un descenso suave de la turbidez desde Sevilla hasta la presa de Alcalá del Río, con máximos y mínimos relativos cuasi-permanentes debidos a las prácticamente nulas velocidades residuales y al control ejercido por el movimiento parcialmente estacionario de la marea en ese tramo. Además, en el primer máximo la salinidad se mantiene siempre por encima del 60% del valor en la desembocadura, mientras que en el segundo máximo la salinidad es del orden del 10% de aquel valor; desde allí hasta la presa el agua es esencialmente dulce. Esta distribución espacial de sólidos en suspensión y tiempo de renovación condiciona la relación existente entre la profundidad crítica para la producción primaria (D<sub>c</sub>) y la propia batimetría del estuario. La primera es más somera que la segunda en un abanico amplio de frecuencias. Junto con las entradas de materia orgánica, esta circunstancia conduce a un estuario que es deficitario en oxígeno a escalas de variabilidad que afectan a su capacidad de contener biodiversidad.

**47. Biodiversidad en régimen de caudal bajo.** El espectro de variación de la concentración de oxígeno en el estuario dificulta la acumulación de biodiversidad y determina los grandes grupos taxonómicos que componen su biota. En este contexto hay que situar al Guadalquivir en el conjunto de estuarios del Atlántico nor-occidental con biodiversidad constreñida fundamentalmente por eventos de hipoxia, excepto para los moluscos, que están controlados por fenómenos de hipercapnia. Este control por hipoxia es más severo al avanzar desde la desembocadura hacia la cabecera del estuario.

**48. Influencia en las riberas del estuario, la costa y la mar abierta.** Esta disminución de la biodiversidad se extiende desde los componentes iniciales de la red trófica acuática hasta los vertebrados que conforman recursos para el consumo humano. La limitación en la concentración de oxígeno disuelto en el estuario se extiende hasta las riberas del último tramo del estuario, la desembocadura y el litoral adyacente. Estos eventos conducen a la aparición de “zonas muertas” costeras que condicionan el desarrollo de sus recursos naturales. Adicionalmente, en virtud de la heterotrofia reinante, el estuario supone una fuente considerable de sedimentos, materia orgánica y compuestos nitrogenados a la plataforma continental del golfo de Cádiz, ejerciendo así mismo, como un potente emisor de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

**49. Fitoplancton y sólidos en suspensión.** Totalmente al contrario de lo que cabría esperar en el estuario dada su elevada radiación solar incidente, el fitoplancton es incapaz de crecer significativamente debido a la limitación por luz que generan sus niveles de sólidos en suspensión, se comporta como las plantas de oscuridad y se encuentra en un estado extremo (aparentemente próximo a la mera supervivencia). En el estuario se puede encontrar un fitoplancton poco diverso que incluye importantes componentes de organismos heterótrofos y de fitoplancton tóxico. La principal especie tóxica del área es la cianobacteria *Microcystis aeruginosa*. Se caracteriza por su elevada persistencia en la columna de agua, alcanzando la cadena trófica y concentrándose en peces y moluscos.

**50. Fitoplancton tóxico en la red trófica.** En el hígado de una elevada proporción de los peces muestreados (5 especies de peces y coquinas recolectadas en la margen derecha de la desembocadura) se detectó microcistina a dosis mayor de 0.1 ppb. En algunos peces, las concentraciones fueron lo suficientemente elevadas como para estar cerca de provocarles la muerte > 0.7 ppb. Además, la microcistina se detectó tanto en peces herbívoros (p.e. carpas) como en carnívoros (p.e. róbalo). La presencia en coquinas alerta del papel que la circulación fluvio mareal puede estar desempeñando en la exportación de microcistina al medio marino.

**51. Episodios históricos y variabilidad temporal.** Es habitual encontrar microcistinas entre las estaciones de Don Isaías y la Boya 13. Los estudios sobre fitoplancton tóxico, en la ribera del Parque Nacional de Doñana (dentro de la red de alerta de fitoplancton tóxico del Espacio Natural Doñana) confirmaron que los episodios de mortandad ocurridos desde 2001 se debieron a cianobacterias tóxicas de agua dulce (principalmente *Microcystis aeruginosa*) mucho más que a dinoflagelados y diatomeas de origen marino. Entre octubre 2007 y julio 2009 solo durante el 32% del periodo los niveles de microcistinas estuvieron por debajo de lo recomendable.

**52. Regímenes mixtos fluvio-mareal.** El agua dulce en el estuario es un factor determinante para conseguir la ocurrencia de estratificación que inhiba el afloramiento de los sólidos en suspensión a la superficie y mantenga los niveles de oxígeno por encima del umbral crítico. Cuando el caudal de descarga es suficiente y persiste un tiempo mínimo, se pueden desarrollar ventanas de tiempo durante las que se sientan las bases para recuperar la biodiversidad perdida. Los primeros cálculos indican que para alcanzar esas condiciones se necesitaría mantener un caudal de descarga fluvial en el intervalo 150-300 m<sup>3</sup>/s, dependiendo de las condiciones atmosféricas y oceanográficas, el estado del estuario y la dinámica mareal.

## **Corolarios**

**53. Usos y demandas.** La interacción de los aportes fluviales y la propagación de la onda de marea en presencia de diferentes condiciones atmosféricas y oceanográficas determinan los distintos estados del estuario que se llegan a alcanzar, sus cambios morfológicos y las condiciones dominantes a lo largo del año: salinas o dulces. La mayoría de estos estados y sus correspondientes regímenes confrontan con los usos actuales del estuario, que alteran sus procesos y condicionan su evolución. Las demandas actuales sobre el estuario y su entorno no se pueden satisfacer simultáneamente ni en cantidad de agua/calado ni en su calidad/condición. En la situación actual es prácticamente imposible optimizar todos los usos a su máximo nivel, sobre todo en años secos. Los valores óptimos individuales no son compatibles entre sí.

**54. Planificación de actividades humanas.** Esta situación se puede aliviar priorizando o limitando los usos y demandas actuales. Cualquier actuación concebida para garantizar de forma individual cualquiera de las demandas actuales o futuras conlleva inevitablemente una reducción de la probabilidad de satisfacer adecuadamente el resto de demandas. El estudio de cualquier actuación debe modelar de forma integral el estuario, sus procesos y sus efectos/aportes del entorno circundante; cualquier planificación y decisión debe hacerse diseñando estrategias de gestión integral que contemple todos los aspectos mencionados a lo largo de este capítulo.

**55. Efecto de la variabilidad climática.** La subida del nivel medio del mar que previsiblemente se producirá a lo largo de los próximos 50-100 años y a la que no puede afirmarse que acompañará un aumento equivalente de los aportes fluviales por lluvias, supondrá un incremento de la superficie inundada y un incremento del prisma de marea que afectarán de forma diferente a los usos actuales, y condiciona definitivamente la estrategia actual de ocupación de suelos desecados en el estuario para nuevas actividades.

**56. Algunos factores críticos.** En la actualidad, el estuario presenta varios déficits que están marcando sus procesos y su evolución,

1. La ocupación de los llanos mareales para desarrollos agrícolas y el control del acceso a los terrenos del espacio natural Doñana han reducido el prisma de marea y han forzado un estuario con dominio de la llenante.

2. El prisma de marea y los llanos mareales son insuficientes para conseguir que el estuario pase a estar en equilibrio o domine el flujo de vaciante, lo que determina: la entrada de sedimentos por la Punta del Malandar; que la costa de los arenales de Doñana esté en regresión; que la zona de la descarga fluvio-mareal se traslade hacia el este, erosione la margen izquierda y sean necesarios dragados periódicos en la desembocadura y su entorno. Asimismo, el tramo Bonanza - Cepillos está cambiando su morfología para seguir los cambios de la desembocadura. Estos cambios están creando dificultades en las entradas de agua para las industrias salinera y acuicultura. En un futuro próximo, para mantener la alineación del canal de navegación será necesario dragar.

3. La presa de Alcalá del Río, además de ejercer un control de las descargas fluviales, provoca la reflexión de la onda de marea, lo que incrementa la amplitud total de la marea en todo el estuario y determina la formación de barras y senos y la reducida de renovación de las aguas en la parte alta del estuario.

4. La dinámica mareal no es capaz de mantener el calado actual, 5-6 m (referido a la Bajamar), del tramo Tarfía - Esclusa por lo que su tendencia es a sedimentar en el cauce y reducir el calado hasta 3-4 m para que la fricción en el fondo y la convergencia geométrica del canal estén en equilibrio; el dragado y la descargas fluviales superiores a 500 m<sup>3</sup>/s colaboran en el mantenimiento del calado actual, creando una capa flotante de sedimentos en las proximidades del lecho que se resuspende bajo la acción mareal. Cuando el sedimento se extrae del sistema (transportado hacia la desembocadura o extraído por dragado) la demanda de sedimento se satisface principalmente por la acción de la marea, por la erosión de las márgenes.

5. Durante más del 80% de los días del año la descarga fluvial es insuficiente para evitar que las masas de agua estén bien mezcladas, lo que impide su estratificación. En esas condiciones los sólidos en suspensión limitan severamente la fotosíntesis y la diversidad biológica, y se favorece la permanencia de fitoplancton tóxico en el estuario. Esta permanencia facilita su flujo por la red trófica.

6. El fuerte desequilibrio en el que actualmente se encuentra el ecosistema del estuario inhibe el papel que naturalmente debería cumplir como zona de reclutamiento para numerosas especies de interés pesquero, con importantes efectos sobre el potencial de capturas en la región.

7. La ocurrencia de otros agentes, tales como viento u oleaje en la desembocadura, desvío de la circulación en el estuario para ejecutar obras, labores de limpieza o simplemente atendiendo necesidades urgentes o de primera necesidad, "intensifican" los factores y potencian, por ejemplo, la ocurrencia de episodios de turbidez extrema y toxicidad. En las condiciones actuales, las dos alternativas de solución son la espera a que cesen las causas y que el sistema se recupere "a su buen saber y entender" o la gestión integral de los recursos del estuario.



**57. Algunas acciones previstas.** En los últimos años se han propuesto algunas acciones en el estuario que afectan a los factores críticos y sus consecuencias, entre ellas, el dragado hasta la cota -8, la ampliación del sistema de riego del arrozal, el levantamiento del dique del río y la construcción de nuevas instalaciones en la margen izquierda de la desembocadura.

1.a Un dragado del canal de navegación a la cota -8 no cambia, sustancialmente, ni la amplitud de marea en el estuario ni las estoas; reduce su asimetría vertical, la velocidad y las fuerzas turbulentas en el fondo; además modifica las corrientes residuales debidas a la marea (que, en general, son hacia el interior del estuario), mejorando, si se mantienen, al menos, las descargas actuales, los tiempos de residencia y la renovación de las aguas estuarinas.

1.b. La dinámica mareal no es capaz de mantener el calado -6, por lo que tendrá menos capacidad de hacerlo con el -8 y será necesario realizar labores de mantenimiento. La extracción del material de dragado creará la demanda de nuevo material que necesariamente saldrá de las márgenes. El incremento del calado mejorará la capacidad de circulación de las avenidas, reduciendo aún más la superficie con riesgo de inundación en esas condiciones y amortiguará, ligeramente, los efectos de los barcos de menor porte en las riberas y lecho.

1.c. Aquel dragado no modifica significativamente el régimen de intrusión salina y su patrón oscilatorio con respecto al actual. Si se mantiene el mismo régimen de descargas fluviales la curva de recesión de la salinidad promediada en un ciclo de marea se trasladará ligeramente hacia el mar.

1.d. Análogamente, si se mantiene el mismo régimen de descargas fluviales, un dragado del canal no cambia sustancialmente la posición y forma de los máximos de turbidez, reduce la concentración de sólidos en suspensión que alcanzan la superficie y aligera la doble pulsación en el fondo relacionada con la generación de componentes cuartodiurnas en las proximidades de la superficie, mejorando la transmisión de la luz y los procesos asociados a ella.

2. Una ampliación de la superficie del arrozal conlleva el incremento de la demanda de agua dulce, lo cual, si se extrae del caudal circulante por el estuario, reduce aún más la biodiversidad del sistema, favorece, un poco más, los episodios de toxicidad y condiciona la única alternativa posible que se puede manejar para controlar episodios de turbidez extrema o de toxicidad.

3. El levantamiento del muro del río potencia la inundación por la marea de algunos llanos mareales, salinizando algunos entornos que hoy en día son dominios de agua dulce. Además contribuye a generar asimetría entre llenante y vaciante, corregir el desequilibrio de la desembocadura y aumentar el volumen de agua y sustancias exportado hacia el mar en cada ciclo de marea.

4. La construcción de nuevas instalaciones (obras de abrigo) en la margen izquierda, de la desembocadura, de la misma forma que el dique de Bonanza actual, colabora en la "canalización" y el control del desplazamiento del flujo de descarga por aquella margen, y favorece la profundización asimétrica del canal de navegación y de las secciones transversales de la desembocadura.

5. En el régimen de caudal bajo, las variaciones de las características de la onda de marea, de las curvas de recesión de la salinidad del régimen y de los máximos de turbidez inducidos por el dragado propuesto se solapan con las que pueden inducir las restantes actividades. Además dichas variaciones están en el orden de magnitud de la variabilidad "natural" del sistema, por lo que será complejo identificar sus efectos directos para, en su caso, exigir y distribuir las oportunas responsabilidades.

**58. Valoración de los efectos en la dinámica del estuario.** Excepto la reinundación de llanos mareales en el entorno del Espacio Natural, todas las actuaciones previstas repercuten, de una u otra forma, negativamente en la dinámica, morfología y biodiversidad del estuario, no mejoran la situación frente a episodios extremos (turbidez y salinidad) y limitan severamente la capacidad de minimizar su duración y sus efectos. Para minimizar los efectos negativos y potenciar los procesos y la evolución del estuario y su adecuación a la variabilidad climática es recomendable la implantación de la gestión integral de los recursos naturales del estuario y su entorno, manejando con sabiduría, entre otros, los recursos disponibles de agua dulce, realizando en tiempo, lugar y magnitud, las labores de mantenimiento del dragado, incorporando progresivamente llanos mareales al ciclo mareal y promoviendo estrategias de desarrollo de la industria marisquera y pesquera y sus derivados, y tomando decisiones, previa cuantificación del riesgo (probabilidad de ocurrencia e incumplimiento de los objetivos por las consecuencias).



## Figuras

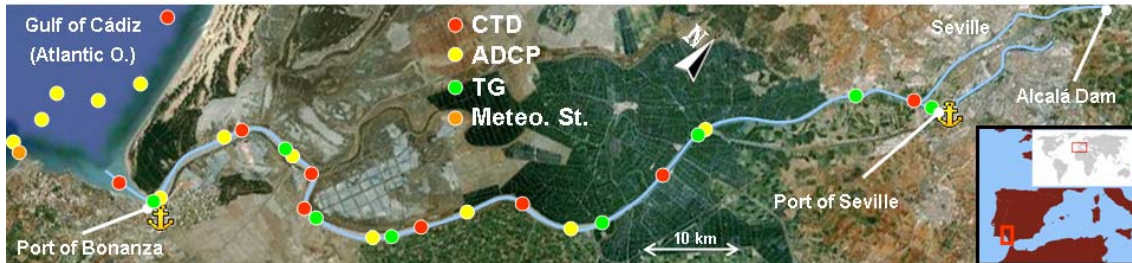


Figura 1. Ubicación de los equipos. En rojo se muestran los CTDs, en verde los mareógrafos, en amarillo los correntímetros y en naranja la estación meteorológica de Salmadina. Mediante campañas de campo específicas se han obtenido más datos de parámetros hidromorfológicos no indicados en esta figura.

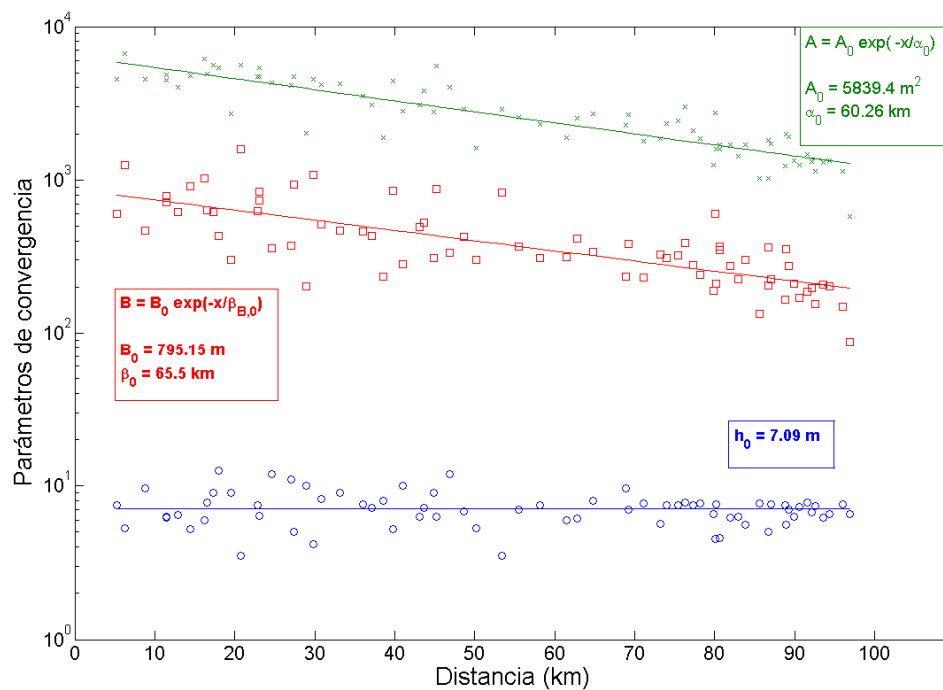


Figura 2. Parámetros de ajuste geométricos del cauce principal del Guadalquivir: sección (verde), anchura (rojo) y profundidad (azul). Para el ajuste de anchura, sección y profundidad media en todo el estuario no se han considerado los datos en la Broa, más allá de Bonanza.

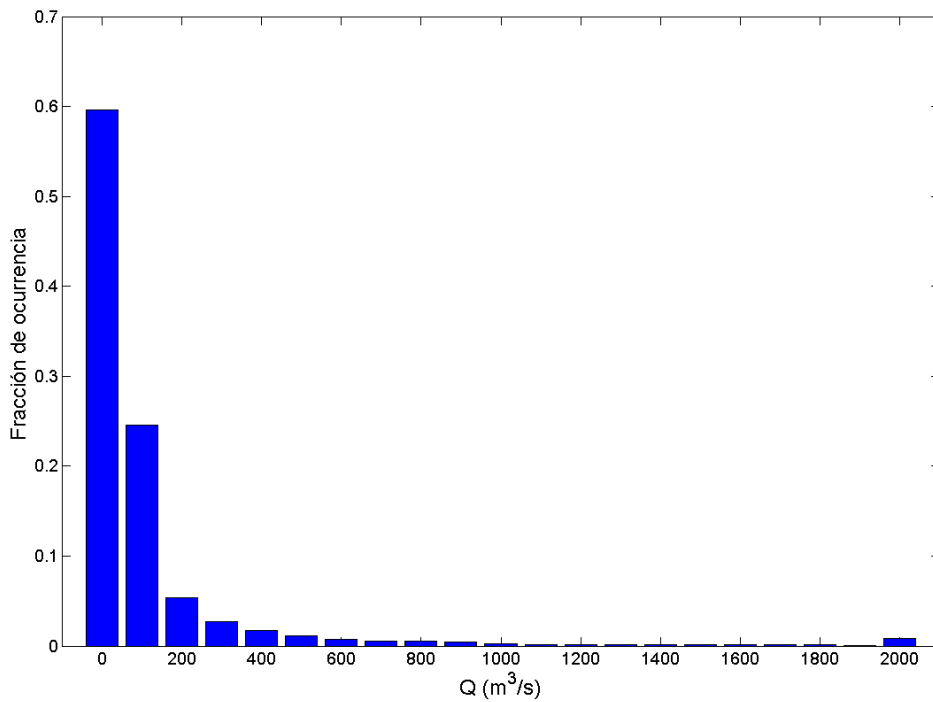


Figura 3. Función densidad de probabilidad de caudales históricos descargados por la presa de Alcalá del Río.

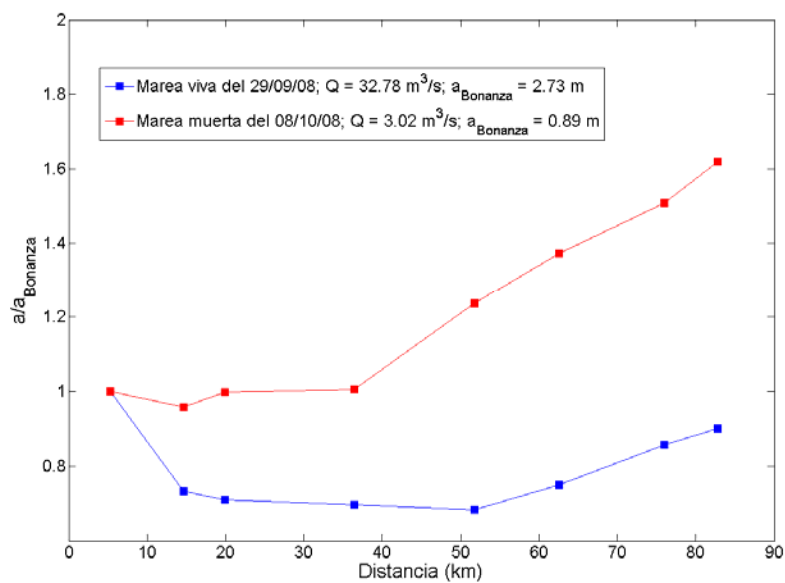


Figura 4. Amplitud relativa de marea  $a(x)/a_{Bonanza}$  en su propagación a lo largo del estuario. Estas amplitudes son representativas de la dinámica mareal. Se han considerado fechas, en vivas y en muertas, en donde las descargas de la presa de Alcalá del Río fueron pequeñas durante esos días y los anteriores. La diferencia de amplitud entre vivas y muertas tiende a disminuir estuario arriba.

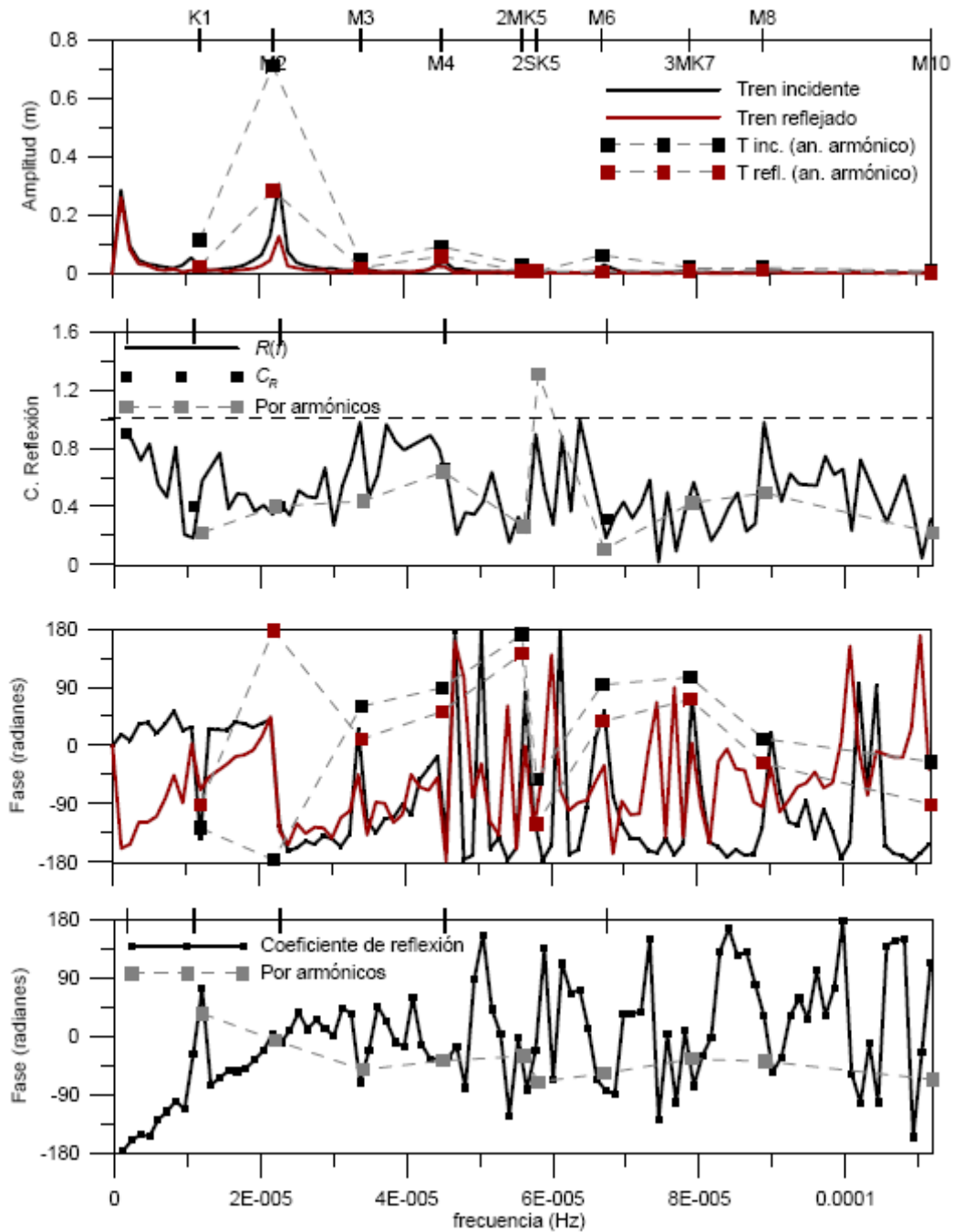


Figura 5. De arriba abajo: (1) Descomposición espectral de las amplitudes de los trenes de ondas incidente y reflejado. (2) Coeficiente de reflexión dependiente de la frecuencia. (3) Variación con la frecuencia de las fases de los trenes incidente y reflejado. (4) Fase del coeficiente de reflexión. En todos los paneles, los puntos muestran los resultados del análisis por armónicos.

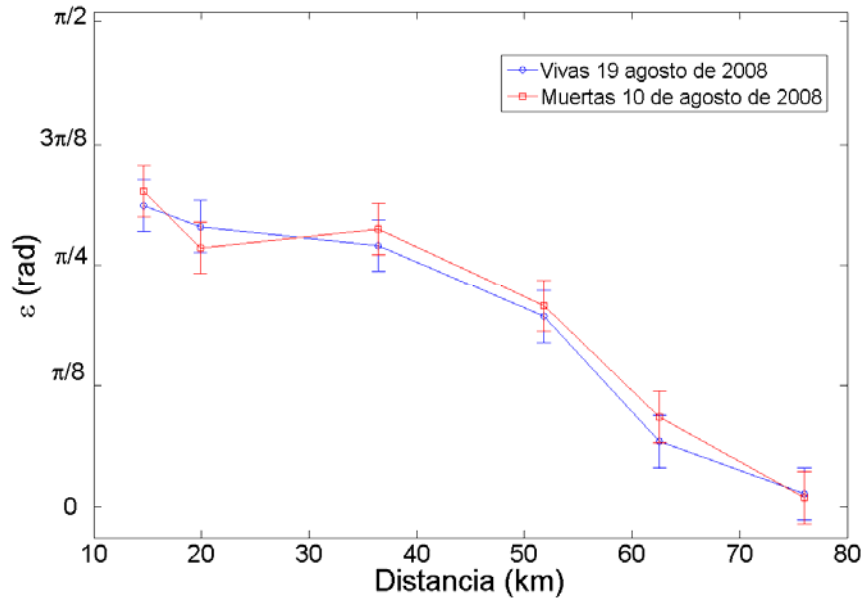
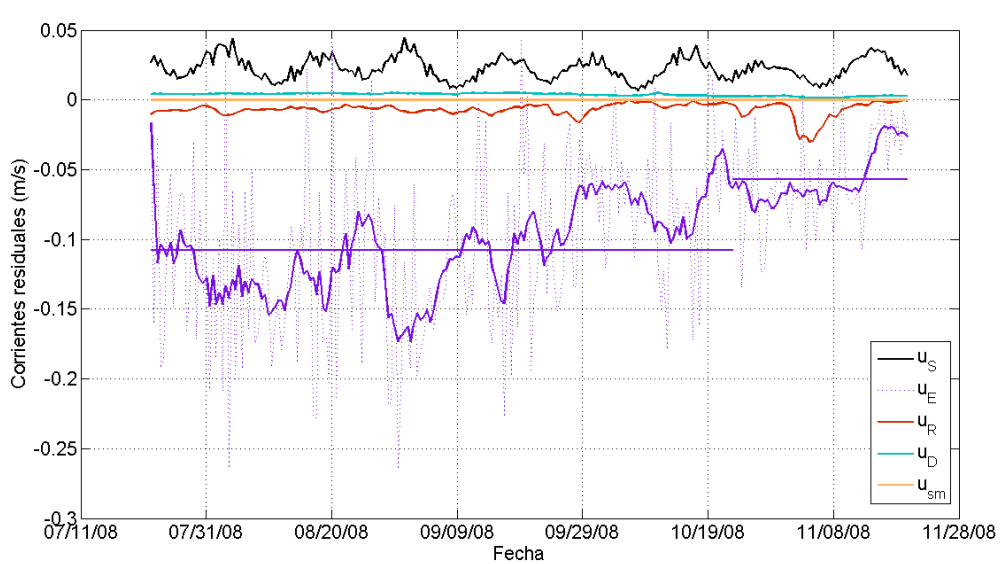
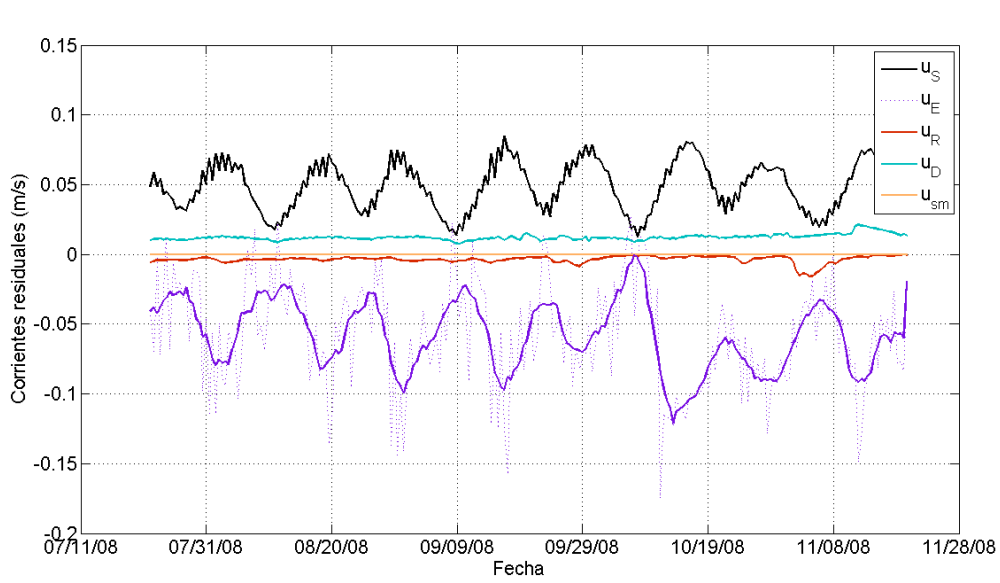


Figura 6. Desfase  $\varepsilon$  entre la pleamar y la estoa de llenante en el estuario. Este valor es indicativo de cómo varía la onda de progresiva a estacionaria.



**Figura 7. Deriva de Stokes, corriente euleriana, corriente fluvial, corriente de densidad y corriente submareal promediada en ciclos mareales semidiurnos para el ADCP2 - TG1 (panel superior A) y ADCP5 - TG4 (panel superior B).**

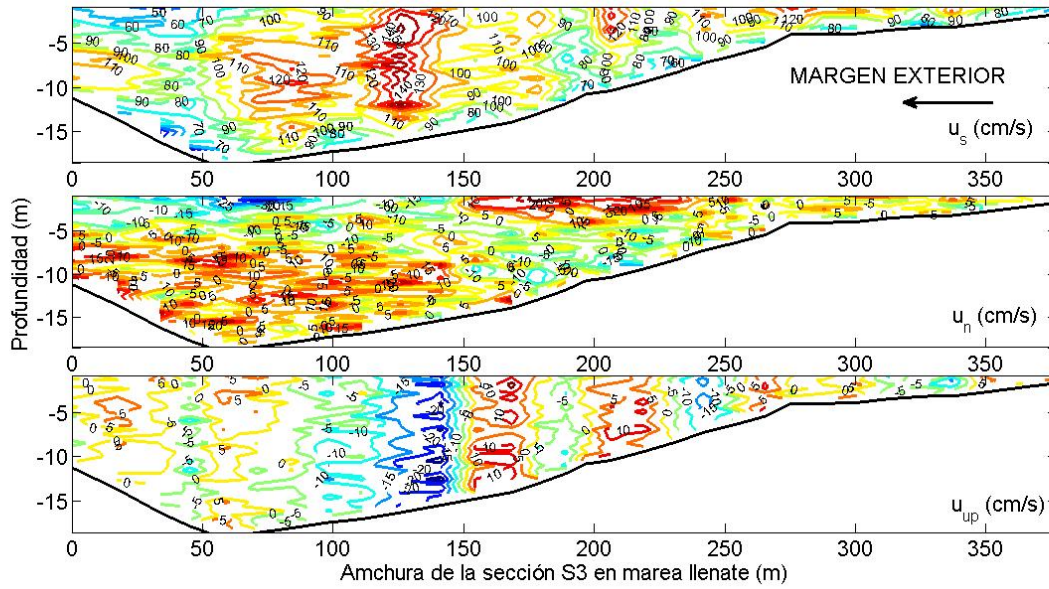


Figura 8. Corrientes longitudinales (n), transversales (s) y verticales (up) en la sección S3 (El Puntal).

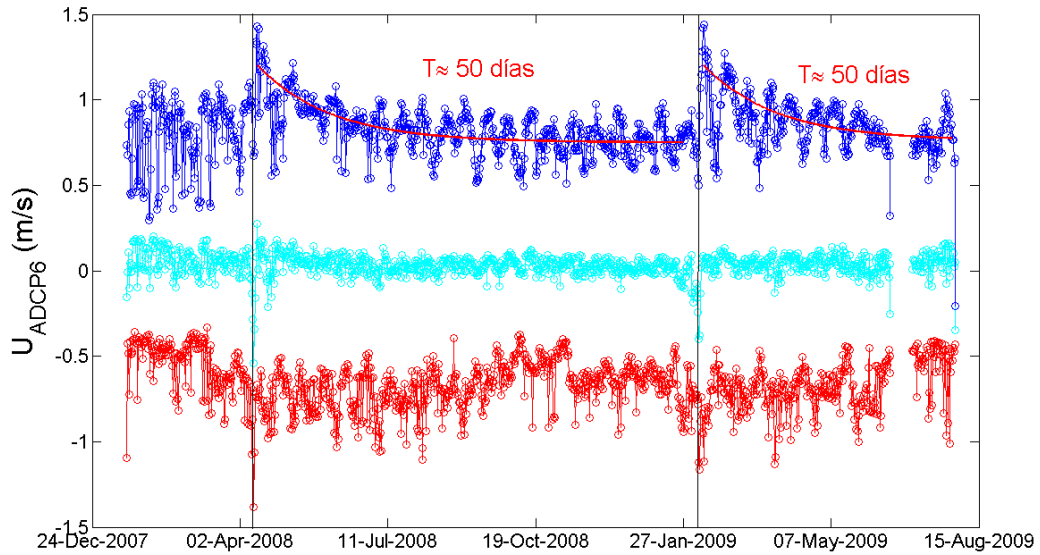


Figura 9. Relajación morfológica tras descargas. Corrientes máximas (curva azul con puntos), medias (curva cian con círculos) y mínimas (curva roja con círculos) en cada ciclo M2 obtenidas por el ADCP6. Las líneas en rojo son las ajustadas a las corrientes mínimas tras las descargas.



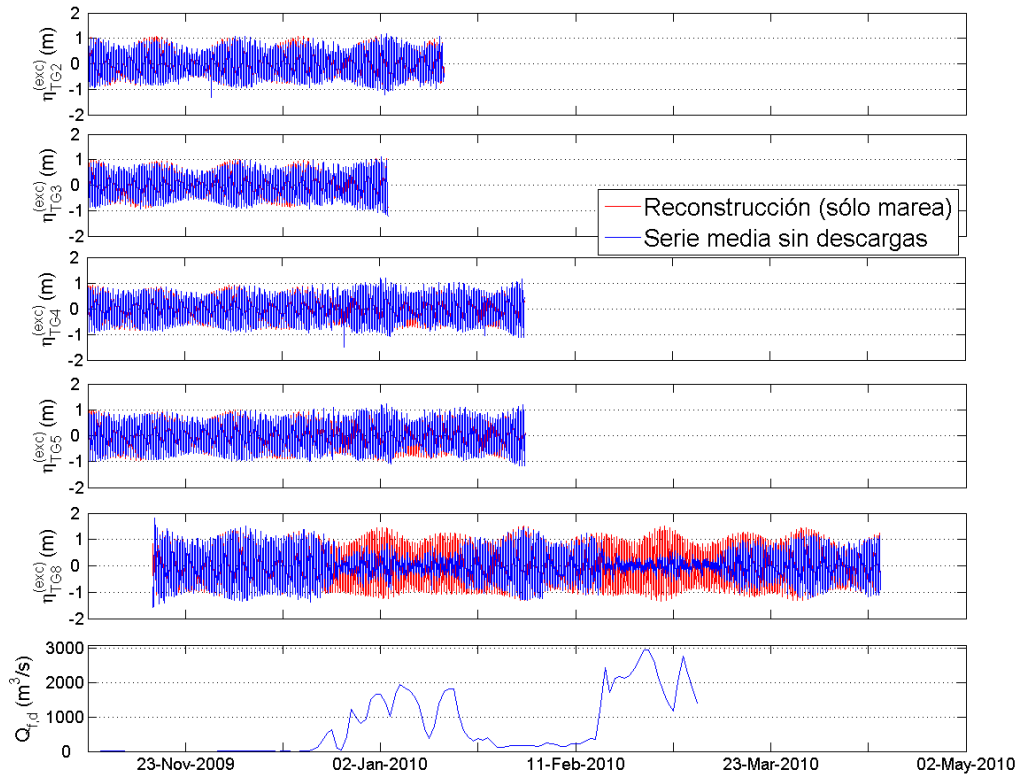


Figura 10. Superposición lineal en sobrelevación mareal y fluvial. Se muestra el exceso  $\tilde{\eta}$  en cada mareógrafo (curvas azules). Las curvas rojas son la predicción  $\eta_{predicción}$ . Coinciden casi por completo en el periodo de descargas, excepto en mareas muertas donde hay pequeñas discrepancias.

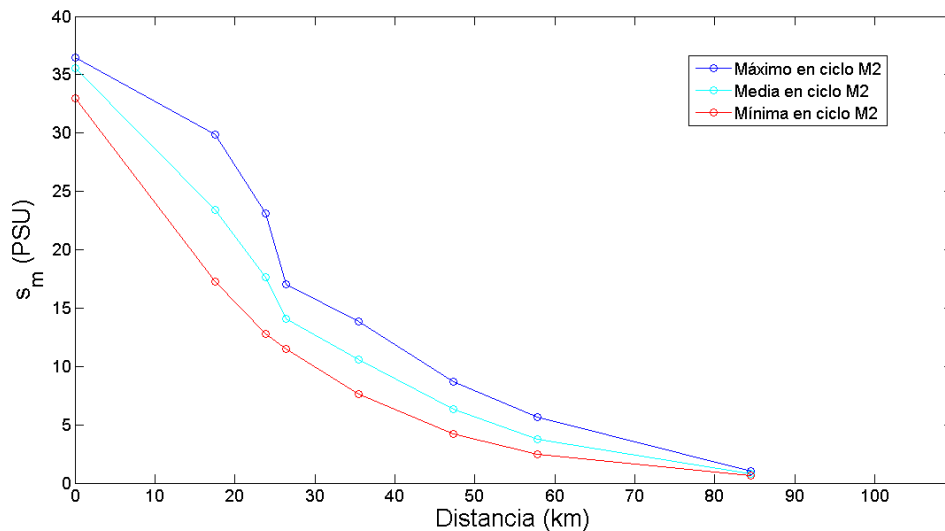


Figura 11. Perfil longitudinal de salinidad máxima (dato registrado en pleamar en torno al 30 de agosto de 2008, mareas vivas,  $Q_{f,d} \approx 20m^3/s$ ), media (salinidad promediada en el ciclo M2 del mismo día) y mínima (dato registrado en bajamar en el mismo día).

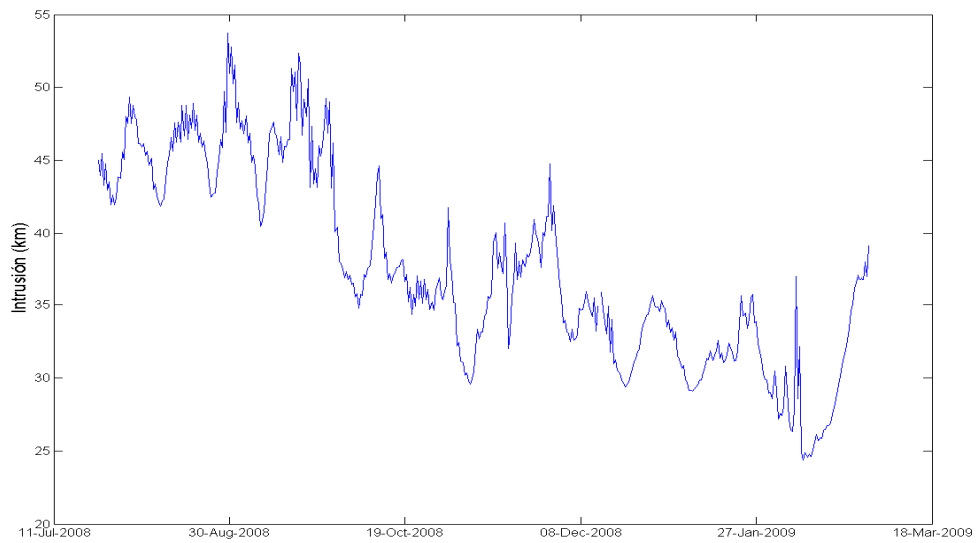


Figura 12. Intrusión salina promediada en el ciclo semidiurno M2.

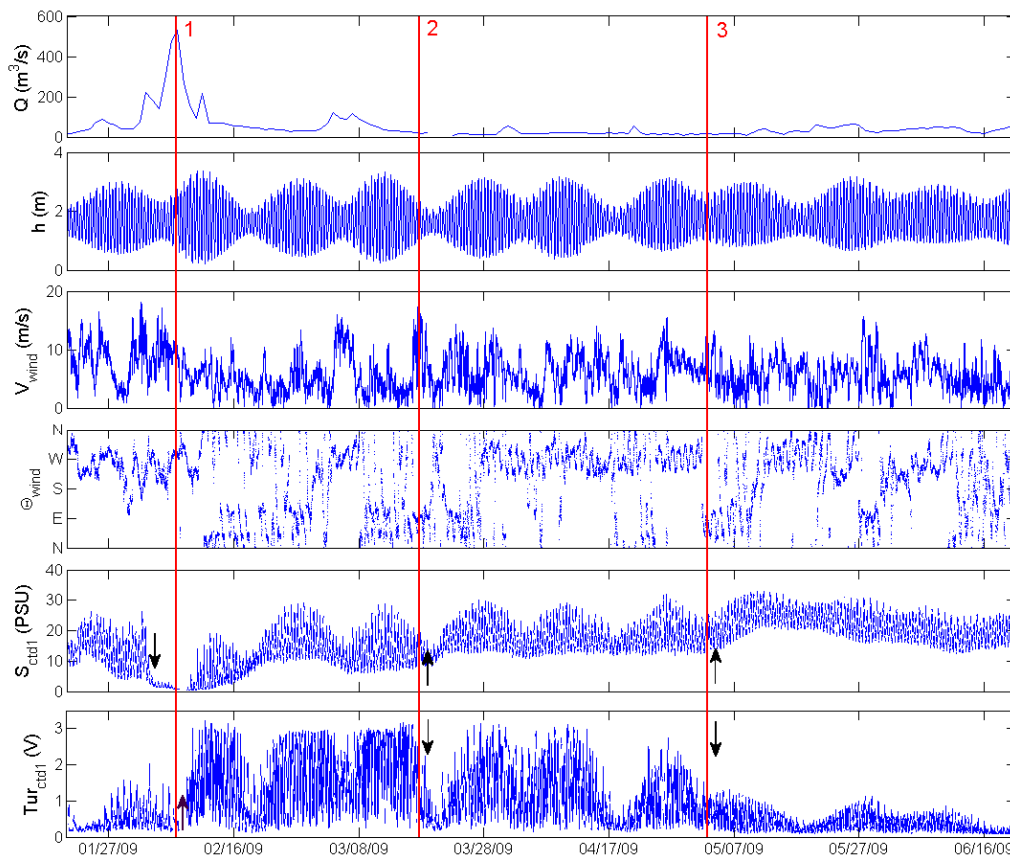


Figura 13. De arriba a abajo: Caudal descargado de la presa de Alcalá del Río, marea en Bonanza, velocidad del viento, dirección del viento, salinidad y turbidez medidas a -1m de la superficie libre en el CTD1. Las flechas negras indican la tendencia tras cada evento.

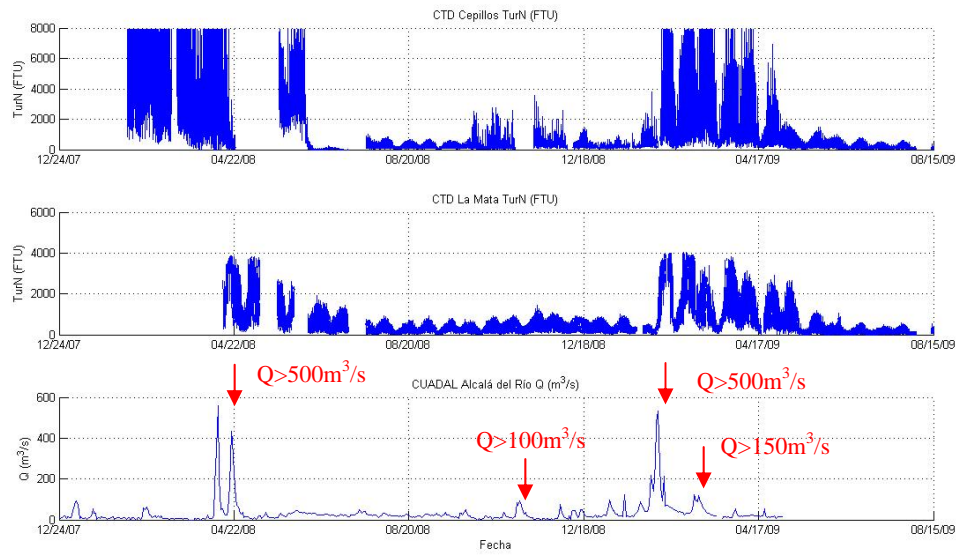


Figura 14. Evolución temporal a 1 m de profundidad de la turbidez (FTU) en los CTD1 (Cepillos) y CTD5 (La Mata). Además se incluye la curva de caudales medios diarios vertidos desde la presa de Alcalá del Río.

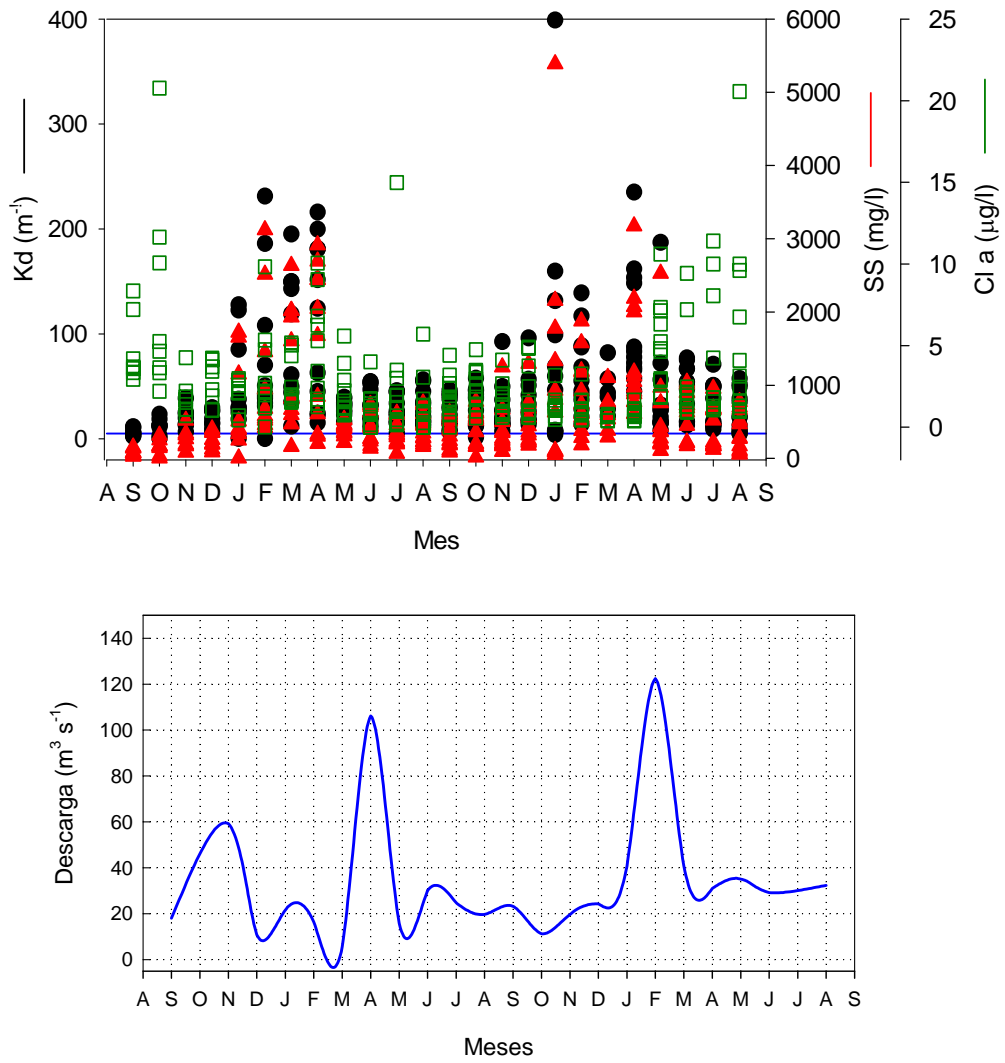


Figura 15. Variabilidad temporal del coeficiente de extinción vertical de la luz en el estuario desde septiembre de 2007 hasta agosto de 2009. La línea horizontal azul indica el valor del coeficiente que marca la presencia de aguas turbias en sistemas estuáricos. La figura inferior corresponde a la descarga de agua media desde la presa de Alcalá del río durante el mismo periodo.

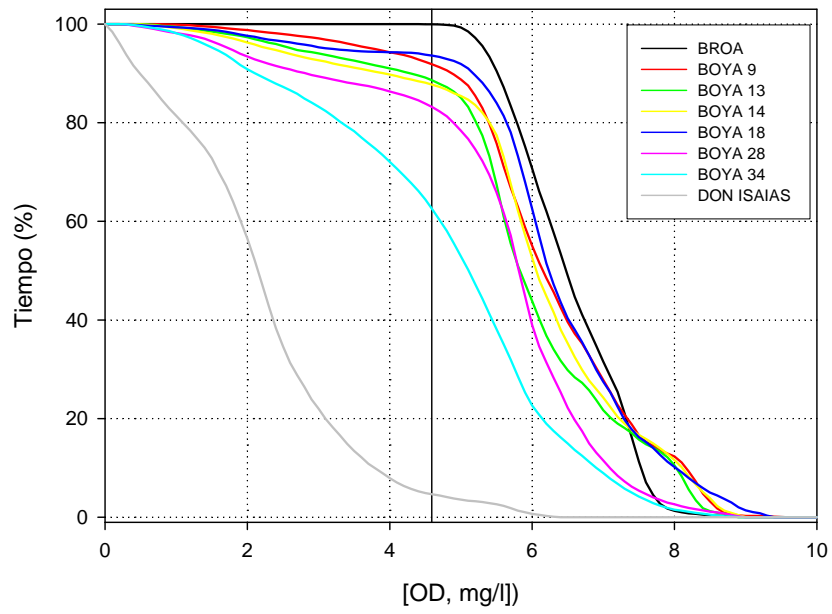


Figura 16. Porcentaje de tiempo a lo largo del periodo de estudio durante el cual la concentración de oxígeno disuelto en las estaciones de muestreo fue inferior 4,59 mg/l.