

PROYECTO BELICH: SEGUIMIENTO, ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DEL ESTADO DEL MAR MENOR

Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC)



Informe sobre los efectos del episodio de lluvias de marzo de 2025 en el Mar Menor

NOTA: Los datos presentados y su interpretación deben ponerse en el contexto de informes anteriores disponibles en la página web del IEO-CSIC (http://www.ieo.es/es_ES/web/ieo/mar-menor). Queda absolutamente prohibida la publicación de los datos contenidos en este informe sin el consentimiento previo de los autores y del IEO-CSIC.

Autores:

Pedro Martínez¹, Marijn Oosterbaan², Victor Orenes¹, Eugenio Fraile², Patricia Pérez¹, Virginia Sandoval¹, Antonio Ortolano¹, Roberto González¹, Rocío García¹, Mercedes Guerrero³, Gonzalo Gonzalez³, M. Josefa Alvargonzález⁴, Andrés Mira⁴, Eduardo Nicolás⁴, Gloria Rico⁴, Juan M. Ruiz¹

¹ Centro Oceanográfico de Murcia (IEO - CSIC)

² Centro Oceanográfico de Canarias (IEO - CSIC)

³ Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS - CSIC)

⁴ TRAGSATEC

Fuente de financiación:

Proyecto BELICH, IEO-CSIC: Marco de Actuaciones Prioritarias para recuperar el Mar Menor. Sub-Actuación 8.1. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD).

Otras fuentes de financiación:

Proyecto THINKING AZUL. IEO-CSIC.

Índice de Contenido

Resumen ejecutivo	5
Sistema de Monitorización en Cuenca Vertiente	7
Delimitación del evento y descripción del esquema de muestreo y del análisis.....	7
Características de la lluvia	9
Respuesta hidrológica	12
Descripción de los episodios en la desembocadura de la rambla del Albujón	12
Estructura espacial de la generación de las avenidas	14
Caudales acumulados.....	17
Otras entradas de agua dulce	18
Contextualización del evento y síntesis	18
Características fisicoquímicas de la descarga	20
Descomposición de las avenidas en fases.....	20
Descripción de la evolución de las variables físico-químicas a lo largo de las avenidas y aportes al Mar Menor	21
Discusión de características y volumen de los aportes.....	27
Sistema de Monitorización oceanográfica	29
Objetivo del informe	29
Fuentes de datos	29
Resultados.....	32
Caracterización del evento de precipitaciones	32
Caracterización del intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo adyacente	34
Efectos en la columna de agua del Mar Menor	38
Estratificación de la columna de agua.....	47

Resumen ejecutivo

El episodio ha mostrado intensidades de precipitación altas, pero no extremas. A escala semanal el episodio ha sido proporcionalmente más intenso que a escalas horaria y diaria. Esto ha resultado en una escorrentía relativamente moderada, a pesar de la precipitación acumulada en todo el episodio.

Las lluvias más intensas se han dado en el centro de la cuenca vertiente, siendo menores en las zonas próximas a la laguna. El resultado es la ausencia de actividad hidrológica relevante en las ramblas que vierten al Mar Menor salvo el Albuñón. Esto ha limitado el impacto sobre la laguna del episodio.

Se registraron dos avenidas de tamaño muy similar con picos, respectivamente, en la tarde del 2 de marzo y la mañana del 7. La descarga total fue de 1.2 hm³. La parte más importante del caudal se originó en la parte central de la cuenca desde El Albuñón hacia la Murta por el norte y Cartagena por el sur. Una posible contribución relativamente importante a través del canal D7 debe ser revisada. Los aportes de escorrentía urbana pueden ser relevantes, pero parecen menores que la entrada del Albuñón. La principal fuente de endulzamiento del Mar Menor es, con diferencia, la precipitación directa de la lluvia.

Con los datos disponibles hasta el momento la entrada de nitrógeno total disuelto se estima en 7.5 toneladas a través del Albuñón, la de carbono orgánico en 6.3 t y la de sedimentos entre 1900 y 2975 t, según el método de cálculo que se adopte. Basado en la información analítica obtenida en otras riadas el aporte de nitrato disuelto se estima en 28 t y la de fósforo total disuelto en 2 t. Las estimas de aportes se pueden ver sustancialmente incrementadas cuando se disponga de las medidas de nutrientes en sedimentos y de las analíticas completas de este evento. Los aportes directos de zonas urbanas costeras son desconocidos. En cualquier caso, el impacto global en términos de nutrientes y carbono orgánico parece ser moderado, y pequeño si se comparan con episodios como el de la DANA de 2019. No obstante, localmente puede tener más relevancia.

El nuevo sistema de monitorización oceanográfica, implementado en febrero de 2025, ha demostrado una elevada eficacia para el registro y análisis de eventos oceanográficos con una resolución temporal sin precedentes y en tiempo casi real. Gracias a este sistema, ha sido posible obtener información detallada y simultánea sobre el intercambio de agua a través de las golas y del estado de la masa de agua lagunar, lo que permite evaluar con un grado de detalle y precisión sin precedentes el impacto de eventos meteorológicos y oceanográficos sobre el Mar Menor.

Durante el reciente evento de fuertes vientos de levante y precipitaciones, el sistema de observación ha detectado un incremento transitorio de hasta 21.15 cm del nivel del mar, atribuido principalmente a la entrada neta de agua Mediterránea a través de las golas, la precipitación directa sobre la laguna y, en menor medida, los aportes desde la cuenca (especialmente desde la rambla del Albuñón). Este episodio también provocó una reducción temporal de la temperatura del agua en 1.5°C, así como una disminución significativa de la

salinidad (de hasta 2.5 unidades), resultado de la mezcla con agua de lluvia y de la entrada del mar Mediterráneo.

El oxígeno ha mostrado también una leve disminución reversible del orden de 1 mg/l, pero en todo momento se mantiene en valores normales para esta época del año. Igualmente, durante el evento se observan valores extremos de turbidez durante los que apenas llega la luz al fondo, aunque se trata de episodios puntuales de corta duración relacionados con los diferentes episodios de vientos y de aportes de materiales desde la cuenca vertiente. Ni durante el evento documentado, ni una semana después, se han observado indicios de que estas alteraciones del estado de la laguna hayan dado lugar a episodios de estratificación y/o desarrollo fitoplanctónico que pudieran desembocar en situaciones más críticas para el ecosistema lagunar.

En conclusión, y en consonancia con la intensidad moderada del propio evento, el reciente episodio de precipitaciones documentado en este informe no ha tenido, hasta la fecha, unas consecuencias negativas sobre el estado del ecosistema lagunar. Los cambios observados son característicos de eventos de esta naturaleza y en ningún caso comparables con episodios extremos registrados en años anteriores (p.e. DANA de 2019). No obstante, no podemos descartar respuestas a corto y medio plazo debido a los efectos acumulativos de los materiales y nutrientes aportados al sistema lagunar durante el evento y su interacción con la evolución de las condiciones ambientales asociada a la estacionalidad y otros factores locales y globales (p.e. calentamiento global).

El éxito de este sistema de monitorización reafirma su valor como una herramienta fundamental para la gestión y protección del Mar Menor. Su capacidad para registrar con precisión estos eventos y proporcionar datos en tiempo real lo convierte en un instrumento clave para la toma de decisiones informadas por parte de las administraciones del Estado y la sociedad.

Sistema de Monitorización en Cuenca Vertiente

Delimitación del evento y descripción del esquema de muestreo y del análisis

El episodio de lluvias que aquí se describe y analiza se desarrolló en los primeros días de marzo. Concretamente, hay un primer evento concentrado los días 1 y 2 de marzo y un segundo concentrado los días 5 y 6 de marzo. A la hora de adquirir los datos se ha delimitado una ventana temporal comprendida entre el 28/02/2025 00:00 y el 8/03/2025 00:00. En la práctica el límite final corta la última parte del ascenso de caudales tras la segunda avenida. En el momento inicial del estudio el caudal en la desembocadura de la rambla del Albuñón era de 66 L s^{-1} , mientras que en el momento final era de 608 L s^{-1} . La recesión de una riada es un proceso lento, pero, además, el caso de la rambla del Albuñón, conforme la avenida se desvanece puede aumentar la descarga lateral a la rambla fruto de la recarga rápida del acuífero en las zonas donde el nivel piezométrico es alto, lo que ocasiona un caudal base del preexistente a la avenida y también hay sistemas artificiales que pueden aumentar el caudal post-avenida. El día 16 de marzo el caudal en la desembocadura era todavía superior a 200 L s^{-1} .

Las fuentes de datos utilizados en este informe son las siguientes:

- Datos de caudal de todas las estaciones del SAIH de la CHS en la cuenca vertiente del Mar Menor ($n = 8$). Resolución 5-minutal. Listado en las Figuras 6 y 7.
- Datos de precipitación de las estaciones SAIH en la cuenca vertiente del Mar Menor y áreas periféricas ($n = 26$). Resolución 5-minutal. Listado en la Tabla 1.
- Datos de precipitación diaria de la serie histórica de AEMET, estación de Pozo Estrecho (1960-2022).
- Datos de precipitación horaria de la estación Fuente Álamo – Campillo de Abajo (CA91) del SIAM (1996-2025) y precipitación diaria en las estaciones de Santiago de la Ribera (TP22) y Los Belones (CA73) (28/02 al 7/03 de 2025).
- Recorridos observacionales por las desembocaduras de las ramblas al sur del Albuñón.
- Muestreo sistemático de agua durante el episodio, incluyendo las fases de pre-avenida, onda de avenida y recesión.
- Analíticas de agua de muestreos realizados por TRAGSATEC en episodios de riada en 2024. Estos datos permiten hacer una estima de aportes de nutrientes mientras no se dispone de las analíticas completas del episodio aquí estudiado.

Conocer el efecto de las riadas en el Mar Menor es un gran reto porque resulta logísticamente complicado y difícil que la realidad se adapte a lo planificado, ya que, a pesar de la calidad de las predicciones a corto plazo, la distribución espacio-temporal de la lluvia con alta resolución es especialmente difícil de prever, sobre todo en episodios de alta intensidad.

Básicamente, existen dos esquemas de muestreo, que no son excluyentes entre sí. Un muestreo en un punto fijo (normalmente la desembocadura de la cuenca) donde se muestrean regularmente todas las fases de la riada, o un muestreo móvil donde se recorren distintos puntos de la red de drenaje muestreando los caudales circulantes. En el primer esquema se obtiene una

buena información de la descarga, pero resulta difícil ligar esta descarga con el origen de los caudales en las distintas zonas de la cuenca. En el segundo esquema se obtiene una buena imagen de la heterogeneidad espacial, pero las características de la muestra pueden estar sesgadas por el momento en que se toman dada la variación temporal en la físico-química del agua a lo largo de la riada. Idealmente, se deben combinar ambas aproximaciones, pero en una cuenca de 1300 km² y con numerosos cauces que desembocan independientemente en el Mar Menor resulta difícil conseguir la exhaustividad. Ante la previsión de un evento de lluvias abundantes se decidió concentrar el muestreo en la desembocadura del Albujién. El objetivo de esta decisión era datar con mayor precisión el desarrollo de una riada en todas sus fases en la subcuenca que contribuye con los volúmenes más importantes a la descarga de agua continental superficial en el Mar Menor. No obstante, se hicieron recorridos observacionales rápidos por todas las ramblas que desembocan al sur del Albujién para conocer cualitativamente su posible actividad. Debido las características particulares del evento, que se describirán a continuación, la decisión resultó contingentemente adecuada, ya que, salvo el Albujién, el resto de las ramblas no descargó o lo hizo mínimamente y los únicos aportes de cierta relevancia, además de los del Albujién, debieron proceder de los entornos urbanizados en la orilla del Mar Menor. Estos aportes no fueron evaluados observacionalmente, pero se estiman indirectamente.

En las muestras de agua obtenidas en el Albujién se ha buscado determinar las siguientes variables:

- Conductividad eléctrica
- pH
- Sólidos en suspensión
- Carbono inorgánico total, carbono orgánico total y nitrógeno total disuelto
- Carbono inorgánico total, carbono orgánico total y nitrógeno total en sólidos en suspensión
- Nitrato y fosfato disuelto
- Análisis elemental de más 20 elementos disueltos, incluyendo la mayoría de los nutrientes y Si
- Análisis elemental de más 20 elementos en sólidos en suspensión, incluyendo la mayoría de los nutrientes y Si
- Análisis de isótopos estables en nitrato, fosfato y carbono disueltos.

En este informe se da cuenta de los resultados disponibles hasta el momento de su redacción: conductividad eléctrica, pH, sólidos en suspensión, carbono inorgánico total, carbono orgánico total y nitrógeno total disuelto.

Para el análisis de los datos se ha recurrido a dividir el período de estudio en dos eventos. El Evento 1 abarca del 28/02/2025 00:00 al 5/03/2025 00:00 y el Evento 2 desde esta fecha y hora hasta el 8/03/2025 00:00. Nótese que arriba se indicó que, en términos hidrológicos, la avenida asociada con el Evento 2 se encontraba todavía con una descarga relativamente elevada respecto al caudal base cuando cesó el muestreo, sin embargo, en términos de descripción del

evento y su impacto sobre el Mar Menor, la no consideración del final de la cola de recesión tiene una importancia mínima.

Características de la lluvia

En la Tabla 1 se muestra la precipitación asociada los dos eventos en el conjunto de las estaciones pluviométricas SAIH en la cuenca vertiente del Mar Menor, así como en toda su periferia en las cuencas del Segura, Guadalentín, Moreras, Azohía, Cabezo Negro (Portús), Benipila y Río Seco (Pilar de la Horadada).

Las lluvias más intensas ocurrieron fuera de la cuenca vertiente al Mar Menor, particularmente en las cuencas de la rambla de Benipila, rambla de la Azohía, rambla del Cabezo Negro (Portús) y parte del Guadalentín. Es decir, por lo que respecta al área inmediata al Mar Menor, la zona más afectada fue el entorno de Cartagena, el cual no desagua al Mar Menor. En la cuenca vertiente al Mar Menor las precipitaciones más intensas se dieron en el área de El Estrecho a La Murta (pueblo). En el resto de la cuenca las precipitaciones fueron abundantes, pero no extremadamente intensas. El dato de 91,3 mm en el Evento 1 en la desembocadura del Albuñón debe ser revisado, porque quizás está sobreestimado. Este esquema básico en cuanto a intensidad y distribución espacial de las precipitaciones se refleja bien en las características de las avenidas que se describirán posteriormente.

Tabla 1. Precipitaciones en 26 estaciones pluviométricas de SAIH de la CHS localizadas en la cuenca vertiente al Mar Menor y su entorno inmediato. Evento 1 del 28/02/2025 al 4/03/2025; Evento 2 del 5/03/2025 al 7/03/2025. Precipitación en mm.

ID	Cuenca	Nombre	Evento 1	Evento 2
06M01P01	Benipila	Benipila	104.9	40.5
06A12P01	Benipila	Canteras	123.2	71.7
06P01P01	Benipila	Cartagena	112.9	70.5
06A11P01	Benipila	Los Patojos	117.4	49.2
06P03P01	Benipila	Perín	119.8	56.5
06A15P01	CabezoNegro	Casas Estrechas	118.5	55.4
01E06P01	Guadalentín	Embalse José Bautista	118.0	48.8
01M01P01	Guadalentín	Majal Blanco	83.4	65.4
01O05P01	Guadalentín	Reguerón en El Palmar	39.2	69.0
06A13P01	LaAzohia	Cedacero	146.6	54.5
06A18P01	MarMenor	Desembocadura Rambla del Albuñón	91.3	22.2
06A03P01	MarMenor	El Albuñón	61.3	47.0
06A04P01	MarMenor	El Estrecho	73.4	80.4
06P05P01	MarMenor	El Mirador	55.0	21.6
06A05P01	MarMenor	Fuente Álamo	21.9	54.9
06A19P01	MarMenor	La Maraña Balsicas	61.8	22.7

06P04P01	MarMenor	La Murta	72.6	46.0
06A01P01	MarMenor	La Puebla	42.7	20.0
06P06P01	MarMenor	La Tercia	45.1	27.8
06A02P01	MarMenor	Pozo Estrecho	61.4	20.2
06A06P01	MarMenor	Rambla de La Murta Los Cegarras	21.4	55.2
06P02P01	MarMenor	Torre Pacheco	47.8	15.8
06A09P01	Moreras	Camposol	84.2	34.7
06L01P01	Río Seco	Río Seco	38.1	26.5
01A03P01	Segura	Murcia	55.0	68.9
01M02P01	Segura	Relojero	40.4	50.4

Es importante poner en contexto la cantidad de precipitación, así como describir su intensidad en relación con las series históricas, ya que esto nos permite encuadrar la importancia relativa de estos eventos concretos para el Mar Menor. Para ello se ha recurrido a dos series históricas: (i) de AEMET se ha escogido la serie diaria de la estación de Pozo Estrecho (E7026) que entre 1960 y 2022 está completa por encima del 99%; (ii) de la red de SIAM de la CARM la estación de El Campillo en Fuente Álamo (CA 91) con datos horarios. De esta manera se puede contrastar las intensidades observadas en los eventos estudiados con series largas locales de distinta resolución temporal.

Para la serie diaria de Pozo Estrecho los datos se han agregado en intervalos de 1 a 8 días naturales (el máximo de tiempo abarcado en este informe). Se ha establecido como umbral de ‘evento lluvioso’ una precipitación ≥ 1 mm en un día y, por consistencia, para las agregaciones de 2, 3, ..., 8 días los umbrales de ‘racha de lluvia’ se han establecido de ≥ 2 mm, ≥ 3 mm, ..., ≥ 8 mm, respectivamente. A partir de esta serie se ha calculado una función de distribución acumulativa empírica de la precipitación (FDAE) en rachas de 1 a 8 días. Dicha FDAE se puede considerar representativa de la cuenca vertiente. Entonces, para cualquier estación del SAIH se puede calcular la precipitación en un día dado, comparar el valor con la FDAE y obtener el percentil de esa precipitación. Cuánto más cercano sea el percentil a 100 más extrema es la precipitación observada. El mismo procedimiento se puede aplicar a los datos agregados de 2, 3, ..., 8 días. El mismo procedimiento se ha aplicado a los datos horarios de la estación de El Campillo en Fuente Álamo, aunque en este caso la serie histórica es más corta (1995-2024).

El resultado de este análisis se muestra en las Figuras 1 a 3. De la observación de estas figuras se obtiene una consecuencia inmediata. Las lluvias a escala diaria han sido abundantes, pero con no muchos lugares y días donde se haya llegado a percentiles por encima de 90, capaces de generar mayor respuesta hidrológica de la cuenca. Conforme se van agregando días de lluvia acumulada (cf. Figuras 1 y 2) las curvas de distribución de percentiles van mostrando mayor concentración de valores altos, es decir, de rachas lluviosas más intensas de baja probabilidad de aparición. Este patrón se podría resumir en que se ha tratado de un episodio con ‘bastante’ lluvia a escala temporal diaria, pero de ‘mucho’ lluvia a escala temporal semanal. Sin duda, esta relación entre intensidades y escalas temporales ha mitigado el impacto del episodio en la hidrología y en términos de daños y afecciones.

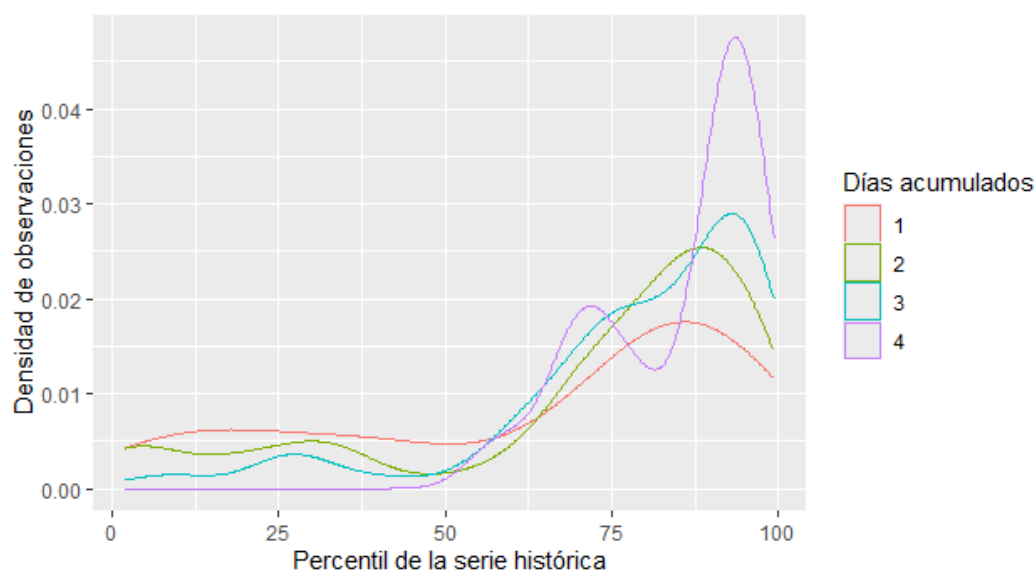


Figura 1. Distribución de la precipitación durante el episodio por percentiles. Percentiles calculados de la serie histórica de Pozo Estrecho. Días acumulados indica la lluvia acumulada en 1 a 4 días

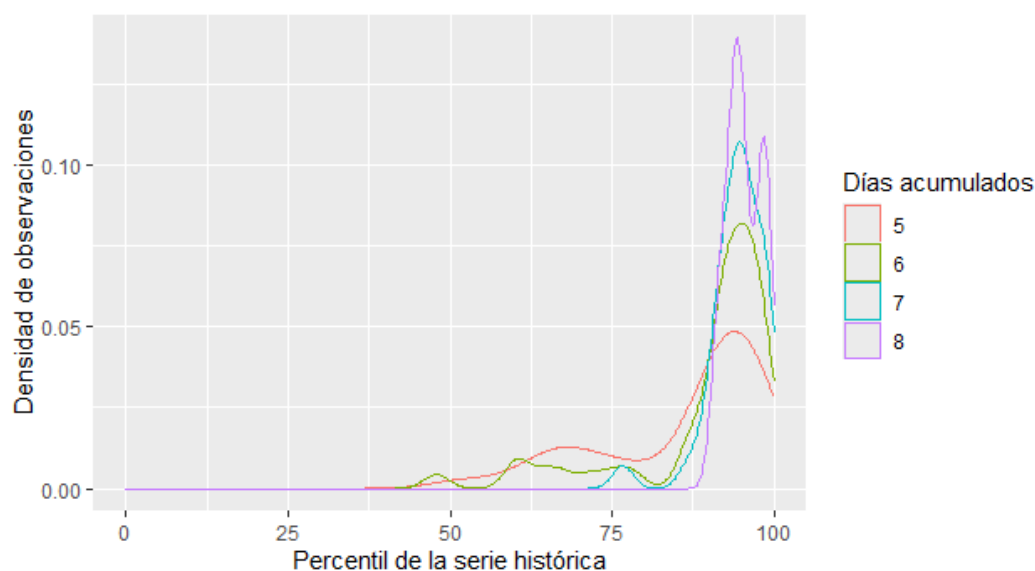


Figura 2. Distribución de la precipitación durante el episodio por percentiles. Percentiles calculados de la serie histórica de Pozo Estrecho. Días acumulados indica la lluvia acumulada en 5 a 8 días.

Los datos horarios corroboran que las intensidades de precipitación a esa escala temporal han sido en general intensas, pero no extremas en general.

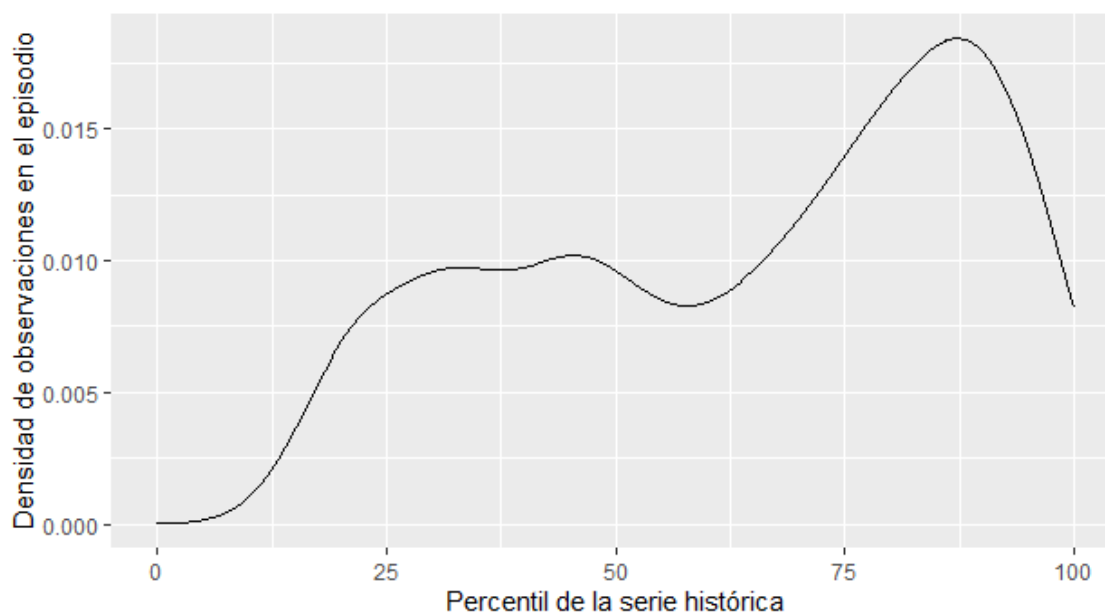


Figura 3. Distribución de la precipitación durante el episodio por percentiles. Percentiles calculados de la serie histórica con resolución horaria de El Campillo en Fuente Álamo.

Respuesta hidrológica

Como se mostró en la Tabla 1, sólo hubo lluvias especialmente intensas a escala diaria y de evento en la parte media de la cuenca de la rambla del Albuñón, mientras que en el resto de la cuenca vertiente del Mar Menor las lluvias fueron más moderadas. La evidencia colectada no es exhaustiva, pero apunta a que prácticamente ningún otro cauce con desembocadura directa al Mar Menor aparte de El Albuñón mostró descarga o esta fue significativa. Fuera de la red drenaje, sin duda los pluviales y viales de los cascos urbanos en la zona litoral sí que produjeron descarga, dado que drenan una superficie bastante impermeabilizada.

Descripción de los episodios en la desembocadura de la rambla del Albuñón

La existencia de dos episodios lluviosos en el marco de una semana separados por un hiato de escasa precipitación dio lugar a dos episodios de avenida netamente separados entre sí y muy similares en desarrollo, pico máximo y volumen total desaguado (Figura 4).

Hasta el 1/03 a las 17:30 el caudal osciló en el rango $50\text{--}110\text{ L s}^{-1}$. A partir de ese momento se produce un paulatino incremento hasta un primer máximo de 800 L s^{-1} el 2/03 a las 9:30. El caudal se estabiliza en la horquilla $600\text{--}800\text{ L s}^{-1}$ hasta la llegada de la primera onda de avenida que hace que el caudal pase de 842 L s^{-1} a las 18:30 a $22.46\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ a las 19:50. Tras el pico comienza la recesión alcanzándose un mínimo de 281 L s^{-1} el 4/03 a las 17:40. Hasta el 5/03 sobre las 16:00 el caudal se mantiene en el entorno de los 300 L s^{-1} . El caudal vuelve a ascender hasta los $1.05\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ el 5/03 a las 22:00. Parte de este incremento puede deberse al vaciado del tanque de

tormentas de Torre Pacheco, que se llenó durante el evento 1. El caudal se mantuvo bastante constante con una tendencia a la baja hasta el 6/03 a las 10:05 cuando se registraban 643 L s^{-1} . En ese momento llega la segunda onda de avenida y se alcanza un máximo de $26.64 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a las 10:45. La recesión ocurre sin alteraciones hasta el final del periodo incluido en este informe, el 8/03 a las 00:00 cuando el caudal era de 605 L s^{-1} .

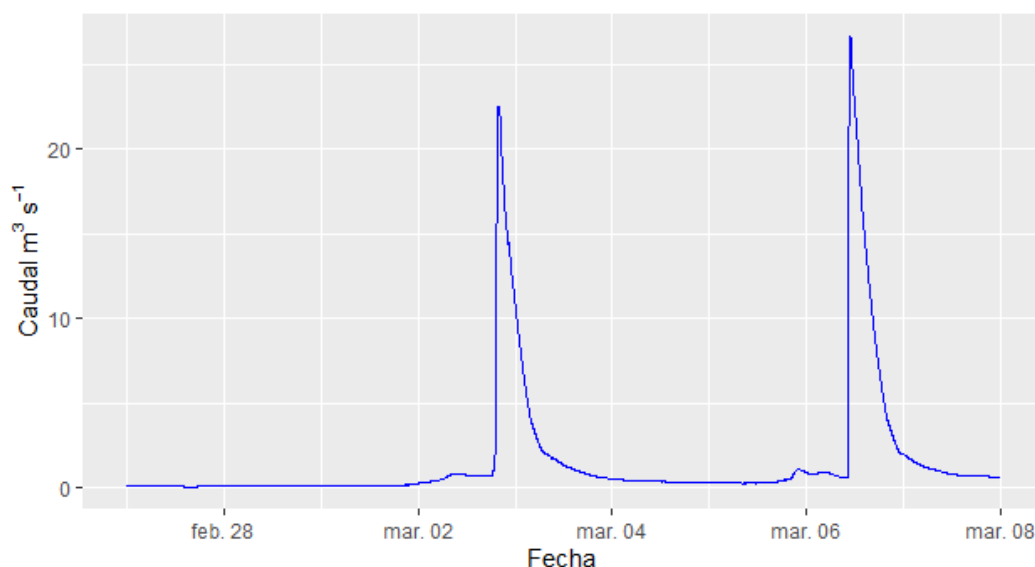


Figura 4. Caudal en la desembocadura de la rambla del Albujón.

En la Figura 5 se muestran la descarga acumulada en la desembocadura desde el comienzo del episodio. La descarga acumulada total fue de 1.24 hm^3 , computando todos los volúmenes desde el comienzo de la ventana temporal de estudio. De ésta 0.53 hm^3 corresponden a la primera avenida, algo más de 0.60 hm^3 a la segunda y algo más de 0.10 hm^3 a la descarga del caudal base original, pequeñas ondas secundarias y el vaciado del tanque de tormentas de Torre Pacheco.

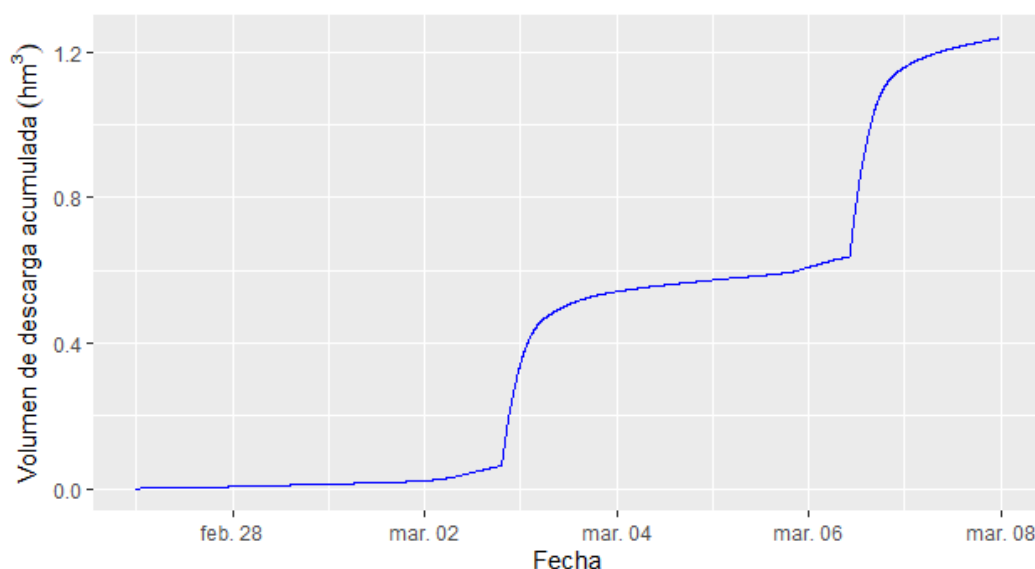


Figura 5. Descarga acumulada en la desembocadura de la rambla del Albujón.

Estructura espacial de la generación de las avenidas

Además del aforo en la desembocadura en la cuenca de la rambla del Albujón existen 5 aforos más en el cauce principal. De aguas arriba a aguas abajo: Fuente Álamo, El Estrecho, El Albujón, Pozo Estrecho y La Puebla. Además, otras dos estaciones están en afluentes: la rambla de la Murta y la rambla de la Maraña. Ésta última no corresponde a la cuenca natural del Albujón, pero sus avenidas importantes son capturadas en parte por el canal D7 que desemboca en la rambla del Albujón cerca de la desembocadura. Con los datos de estos aforos y de los pluviómetros se puede hacer una estima aproximada de las principales zonas de origen de las avenidas que llegan al Mar Menor. Este análisis se ha particularizado para cada uno de los dos eventos.

La información gráfica, en aras a la claridad, se presenta desagregada por cuenca alta, que incluye los aforos de Fuente Álamo, La Murta, El Estrecho y El Albujón, y cuenca baja que incluye los aforos de Pozo Estrecho, La Puebla, La Maraña y Desembocadura

Evento 1

En la cuenca alta (Figura 6) el día 1 de marzo comienza a registrarse caudal en El Estrecho, bastante estable alrededor de los 300 Ls⁻¹ y se registra una pequeña avenida en El Albujón la noche del 1 al 2 con un caudal pico de 2.3 m³s⁻¹. En la tarde del 2 de marzo se registra una avenida mucho más intensa con un caudal máximo de 13:05 m³s⁻¹ a las 14:40 en El Estrecho y de 36.6 m³s⁻¹ a las 16:05 en El Albujón. En Fuente Álamo se registran caudales máximos de 780 Ls⁻¹ a las 14:15. En la rambla de la Murta no hay actividad.

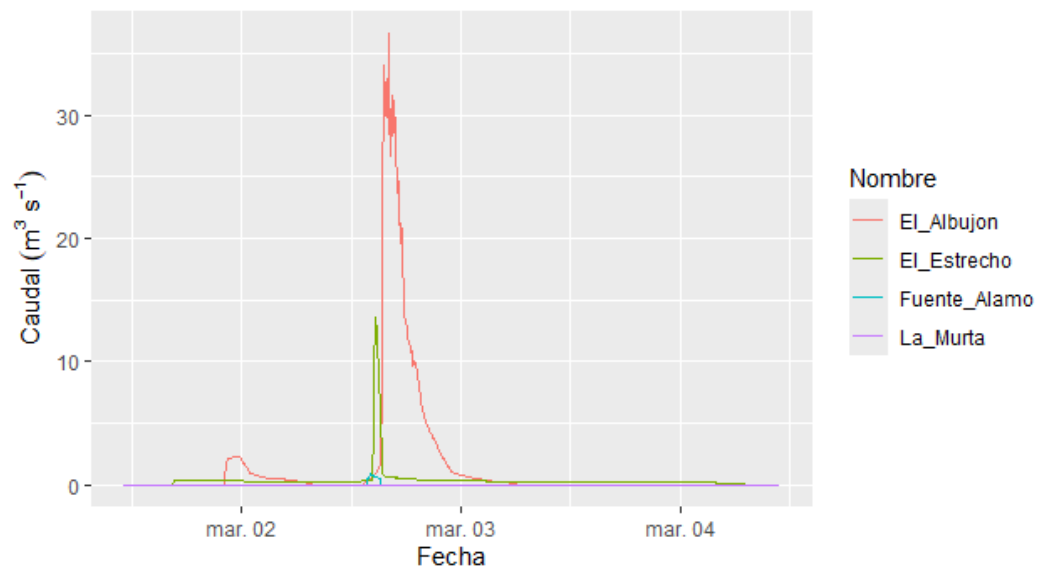


Figura 6. Caudal en estaciones de aforo de la cuenca alta del Albuñón durante el Evento 1.

En la cuenca baja (Figura 7) Pozo Estrecho registra una pequeña onda de avenida en la madrugada del 2 de marzo, con un pico $1.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a las 2:35 y una segunda onda de avenida con un pico de $25.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a las 16:40. En La Puebla se observa un ascenso rápido del caudal desde el mediodía del día 2 con un pico de $19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a las 17:40. En la desembocadura el pico de $22.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se produjo a las 19:50. En la rambla de la Maraña no hay actividad.

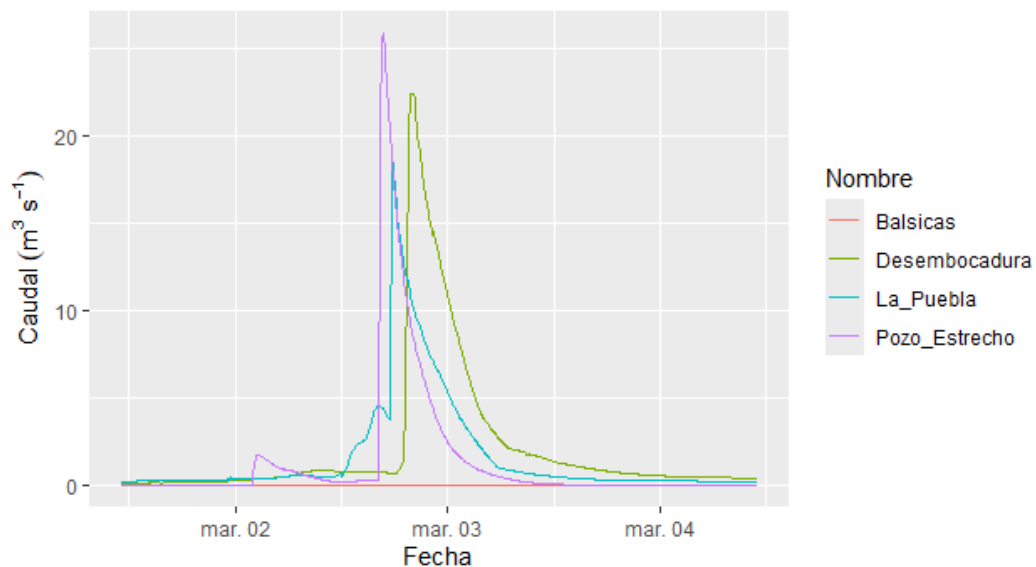


Figura 7. Caudal en estaciones de aforo de la cuenca baja del Albuñón durante el Evento 1.

Evento 2

La estructura espacial del evento 2 es bastante similar a la del evento 1. En la cuenca alta (Figura 8) hay actividad de baja relevancia en Fuente Álamo y la rambla Murta. En la madrugada del 5 al 6 de marzo muestran actividad que se concreta en un pico de avenida de $7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a las 6:35 en El Estrecho. La situación en El Albuñón es bastante más compleja y es evidente la superposición de picos de avenida de distintos orígenes. En cualquier caso, el pico máximo es de $27.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a las 7:50.

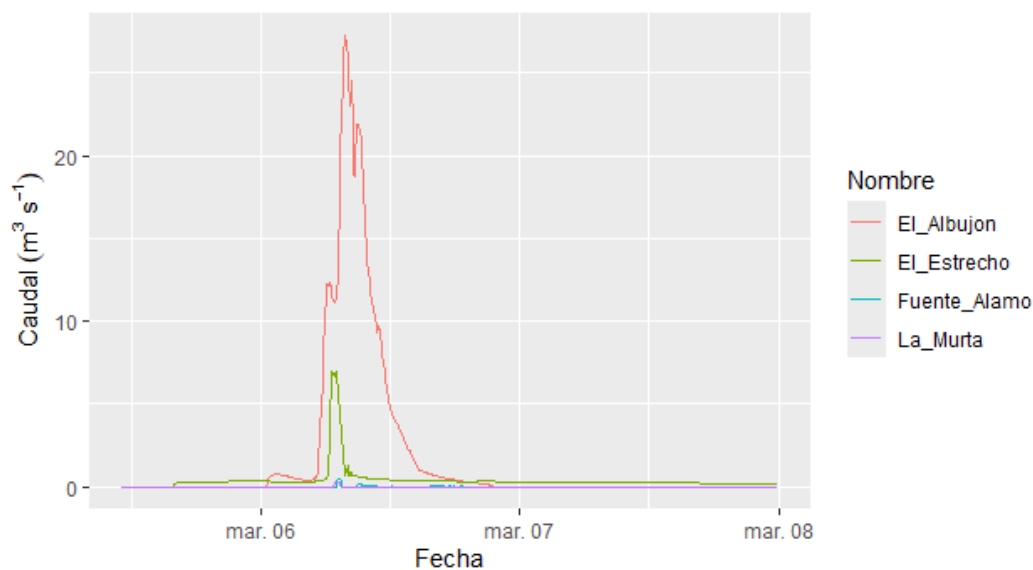


Figura 8. Caudal en estaciones de aforo de la cuenca alta del Albuñón durante el Evento 2

En la cuenca baja las avenidas también son similares a las del evento 1. El caudal máximo se da en Pozo Estrecho con $18.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a las 8:35, en La Puebla con $13.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a las 9:35 y en la desembocadura con $26.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a las 10:45. En La Puebla y sobre todo en la Desembocadura desde el mediodía del 5 se observa un incremento moderado de caudal sin forma de picos de avenida que seguramente está relacionado con la liberación del agua acumulada en el tanque de tormentas de Torre Pacheco y quizás también con efluentes de la depuradora de Los Alcázares.

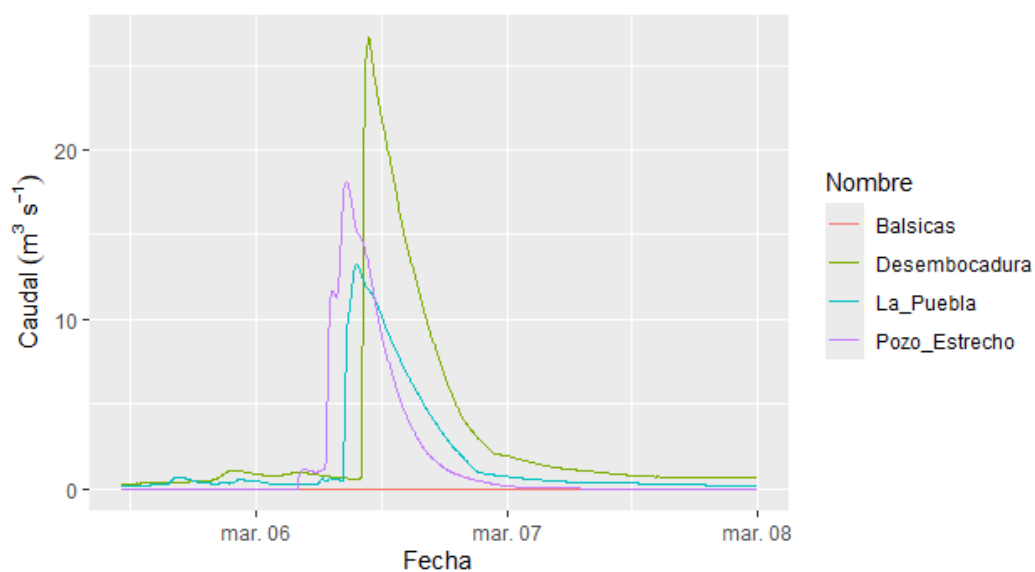


Figura 9. Caudal en estaciones de aforo de la cuenca baja del Albuñón durante el Evento 2.

Caudales acumulados

Para entender mejor la procedencia de los aportes se han construido los hidrogramas de caudal acumulado a lo largo de todo el periodo de estudio en El Albuñón, La Puebla y la Desembocadura (Figura 10).

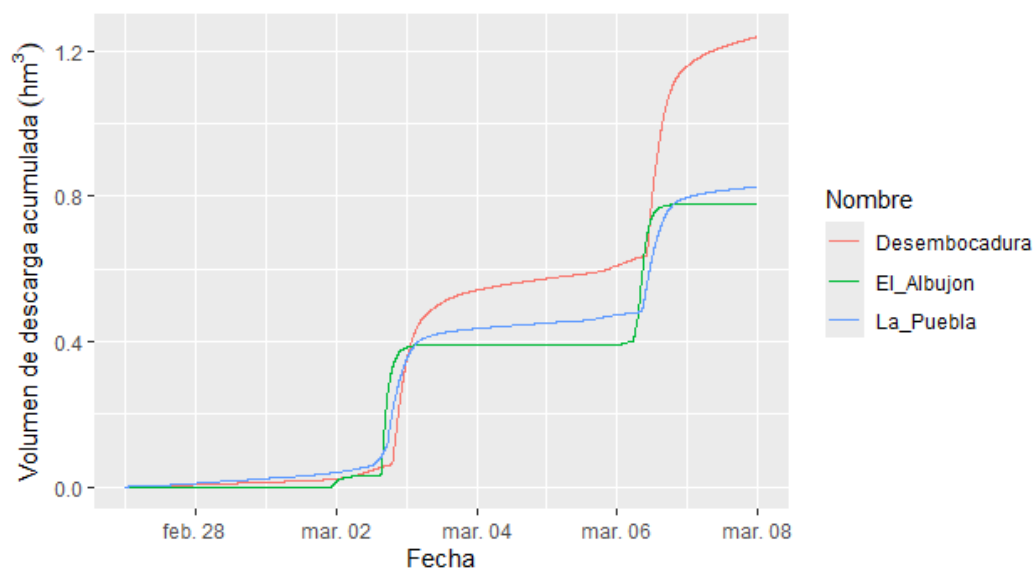


Figura 10. Caudal acumulado en tres estaciones de aforo de la cuenca baja del Albuñón durante el periodo de estudio.

Otras entradas de agua dulce

Las entradas de agua dulce al Mar Menor pueden impactar el ecosistema tanto por los sedimentos que transportan como por su capacidad para disminuir la salinidad del Mar Menor. Además de la descarga a través de la red de drenaje existen dos entradas de agua dulce durante los eventos lluviosos. Por un lado, está la precipitación directa del agua de lluvia, por el otro, las entradas desde los entornos urbanizados en la costa que tienen grandes superficies impermeables y carecen de pluviales como Los Nietos o cuyos pluviales o parte de ellos vierten directamente al mar como San Javier. Las entradas de lluvias aportan cantidades bajas de solutos, mientras que la escorrentía de entornos urbanizados puede aportar solutos y sólidos en suspensión.

Para hacer una estima aproximada de estas entradas se han utilizado los datos de tres estaciones meteorológicas en cada extremo del Mar Menor y lo más cerca posible de la costa (Tabla 2).

Tabla 2. Precipitaciones en 3 estaciones pluviométricas de SAIH de la CHS y SIAM localizadas en o cerca de la costa del Mar Menor. Precipitación en mm.

Estación	28/02	01/03	02/03	03/03	04/03	05/03	06/03	07/03	Total
Los Belones	0.0	49.4	4.1	0.0	0.0	15.6	2.9	0.6	72.0
Santiago de la Ribera	0.0	32.3	10.4	0.0	0.0	17.4	2.8	0.0	62.9
Desembocadura del Albuñón	6.3	69.1	15.9	0.0	0.0	21.5	0.6	0.0	113.4
Media	2.1	50.3	10.1	0.0	0.0	18.2	2.1	0.2	82.8

La superficie urbanizada adyacente al Mar Menor (excluida La Manga) se ha estimado en 1800 ha. Con una precipitación media de 82.8 mm y un coeficiente escorrentía efectiva hacia el Mar Menor de estas zonas impermeabilizadas del 25 al 50%, la entrada de agua sería de 0.37 hm³ a 0.74 hm³. Existe una gran incertidumbre sobre estos valores, pero no parecen descabellados.

El Mar Menor tiene una superficie de 135.5 km² por lo que el agua recibida directamente de la lluvia supone 11.1 hm³. Por tanto, en términos de endulzamiento del Mar Menor el aporte directo de la lluvia es un orden de magnitud más importante que el recibido de la cuenca vertiente, incluso teniendo en cuenta la escorrentía de las zonas urbanizadas y posibles entradas de algunas ramblas que no hayan sido reportadas.

Contextualización del evento y síntesis

Mientras que la información climática se extiende más de 60 años, no ha existido un control continuo del caudal del Albuñón hasta finales de 2020. Desde esa fecha hasta el momento ha habido varias avenidas. El 21/09/2021 hubo una avenida comparable a cualquiera de los dos

eventos aquí reflejados, alcanzando un caudal pico de cerca de $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Marzo de 2022 fue extremadamente lluvioso y hubo ocho avenidas hasta mayo, pero la mayor de ellas no superó un caudal pico de $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Sin embargo, la descarga agregada fue alta ya que el caudal base se mantuvo muy alto por más de dos meses. Las riadas de octubre de 2022 no superaron los $8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Otras riadas posteriores han sido menos importantes. En resumen, en cuanto a aforos registrados en el Albuñón desde 2021 éste es el evento más relevante, excepto el de marzo-mayo de 2022, que sin alcanzar picos de descarga tan altos mantuvo descargas elevadas de manera sostenida por un periodo bastante más prolongado.

No obstante, se deben hacer dos consideraciones para contextualizar completamente el evento. En primer lugar, la distribución espaciotemporal de la lluvia y de su intensidad ha concentrado toda la descarga en el Albuñón. En otras situaciones muchas más ramblas se activan y producen descarga por todo el litoral del Mar Menor que resulta mucho más difícil de cuantificar. No se debe pensar que el análisis del impacto de este tipo de fenómenos debe focalizarse en el aforo del Albuñón. En segundo lugar, la comparación con el episodio de la DANA de 2019 permite apreciar mejor la intensidad del impacto de este episodio. Conforme a las estimaciones realizadas entonces la descarga global (con todos los cauces activos más allá del Albuñón) fue de $60\text{-}70 \text{ hm}^3$. Es decir, el episodio aquí estudiado representa un 1.5-2 % del tamaño del evento de 2019.

De la primera evaluación de los hidrogramas de toda la cuenca y de los hidrogramas acumulados en tres puntos clave la conclusión preliminar es que las avenidas de ambos eventos se han originado en una zona que vierte agua al tramo de la rambla entre El Estrecho y El Albuñón. Aguas arriba de El Estrecho los caudales son muy reducidos, los hidrogramas en el Albuñón son los más complejos indicando una sucesión de avenidas, que se va laminando aguas abajo, lo que sugiere que no hay aportes destacados aguas abajo. Además, los caudales acumulados cambian poco de El Albuñón a La Puebla.

El dato más discordante es el gran incremento de caudal acumulado final entre La Puebla y la Desembocadura, de más de 0.3 hm^3 . Un caudal de ese volumen parece que sólo podría ser aportado en esa zona por el canal D7 y la evidencia fragmentaria y circunstancial es que no parece muy probable que fuera así. Una posible explicación es que la curva de gasto en el aforo de Desembocadura esté sobreestimando el caudal. Para recabar información se entrevistará a personas en las inmediaciones del canal D7 y se revisarán los datos del aforo de Desembocadura.

El aporte de otras ramblas distintas de El Albuñón ha sido muy reducido y el de entornos urbanos es muy difícil de cuantificar, pero una aproximación grosera sugiere entre un cuarto y la mitad de lo recibido por El Albuñón. Con diferencia, la principal fuente de endulzamiento del Mar Menor durante el episodio ha sido la precipitación directa sobre la laguna.

Características fisicoquímicas de la descarga

Descomposición de las avenidas en fases

Durante los dos eventos se muestreó continuamente el caudal con el fin de caracterizar físico-químicamente el agua y poder calcular la descarga en el Mar Menor de nutrientes y otros compuestos producida por el episodio. En total, se tomaron 33 muestras entre los dos eventos (Figura 11), de las cuales se muestran los resultados de 32 de ellas. Las muestras se distribuyeron entre todas las fases de la avenida. Las definiciones de las fases son las siguientes:

- Caudal base: es el caudal no afectado por la escorrentía de las precipitaciones; en general proviene del agua subterránea, aunque en el caso de la cuenca vertiente del Mar Menor el grado de forzamiento humano es tan grande que en el 'caudal base' puede haber contribuciones diversas; para este trabajo no se han obtenido muestras propiamente referidas al caudal base, aunque sus características físico-químicas son similares a las de la fase pre-avenida.
- Pre-avenida: el caudal se puede estar incrementado a causa de la lluvia, pero no muestra un incremento súbito, sino más bien de forma lineal; estos incrementos de caudal se generan por la lluvia sobre el propio cauce y por sistemas que responden rápido a la lluvia como los pluviales urbanos; no es una fase reconocida en la segmentación clásica de un hidrograma, pero es pertinente aquí dadas las características peculiares de la cuenca vertiente del Mar Menor.
- Ascendente: cuando se produce la llegada de la onda de avenida se observa un incremento súbito del caudal.
- Pico: el máximo de la onda de avenida.
- Recesión: descenso paulatino del caudal mucho más lento que la fase ascendente, hasta alcanzar un caudal más o menos estable.

Esta segmentación es especialmente adecuada cuando la avenida se ha generado relativamente lejos del punto de observación lo que permite que el hidrograma se regularice. En puntos más cercanos a las áreas de generación de escorrentía los hidrogramas pueden tener formas más complejas debido a la agregación de flujos de distintos orígenes que alcanzan el cauce en distintos momentos (cf. hidrograma del aforo de El Albujón en la Figura 8). La segmentación de los eventos se muestra en la Tabla 3. Entre el evento 1 y 2 no hubo un retorno al caudal base pre-episodio, pero resulta complicado distinguir entre la fase pre-avenida del segundo evento y la recesión del primero. Se ha establecido convencionalmente este límite en un caudal inferior o superior a 800 L s^{-1} , basado en algunas observaciones directas. La distinción por fases de una avenida es importante a la hora de estimar cargas de nutrientes y otros compuestos pues, como se verá, hay grandes diferencias en las características físico-químicas del agua en una y otra fase.

Tabla 3. Delimitación temporal de las fases de avenida en los dos eventos del episodio estudiado.

Evento	Fase	Inicio	Final
Pre-episodio	Caudal base	28/02 00:00	01/03 16:30
Evento 1	Pre-avenida	01/03 16:30	01/03 18:50
Evento 1	Ascendente	02/03 18:50	02/03 19:50
Evento 1	Pico	02/03 19:50	02/03 20:10
Evento 1	Recesión	02/03 20:10	03/03 17:35
Evento 2	Pre-avenida	03/03 17:35	06/03 10:10
Evento 2	Ascendente	06/03 10:10	06/03 10:40
Evento 2	Pico	06/03 10:40	06/03 10:50
Evento 2	Recesión	06/03 10:50	07/03 11:25

Descripción de la evolución de las variables físico-químicas a lo largo de las avenidas y aportes al Mar Menor

En el momento de redactar este informe se dispone de información sobre las siguientes variables: sólidos en suspensión (SS), conductividad (CE), pH, carbono orgánico total (COT), carbono inorgánico total (CIT), nitrógeno total (NT). COT, CIT y NT referido a cantidades disueltas en el agua. En todas las variables existen diferencias notables entre las distintas fases.

Los sólidos en suspensión son mínimos en pre-avenida (Figura 11), alcanzan un máximo en la fase ascendente y el pico y descienden en la recesión.

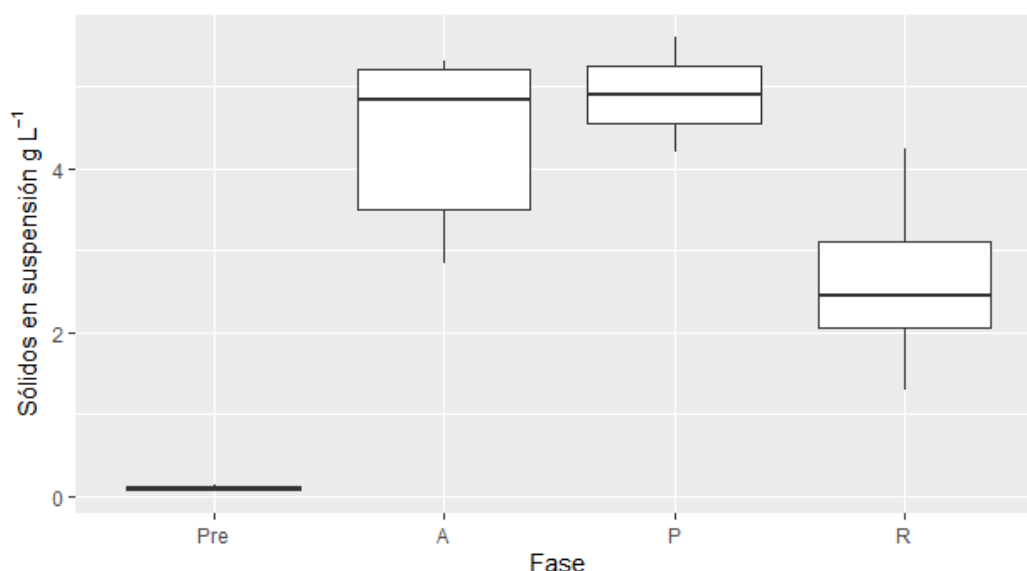


Figura 11. Concentración de sólidos en suspensión en las distintas fases de las avenidas. Pre, pre-avenida; A, fase ascendente; P, pico de la avenida; R, recesión.

En el pH las diferencias son menores, incrementándose desde la pre-avenida al pico de crecida, para descender ligeramente durante la recesión a un nivel similar a la fase ascendente (Figura 12).

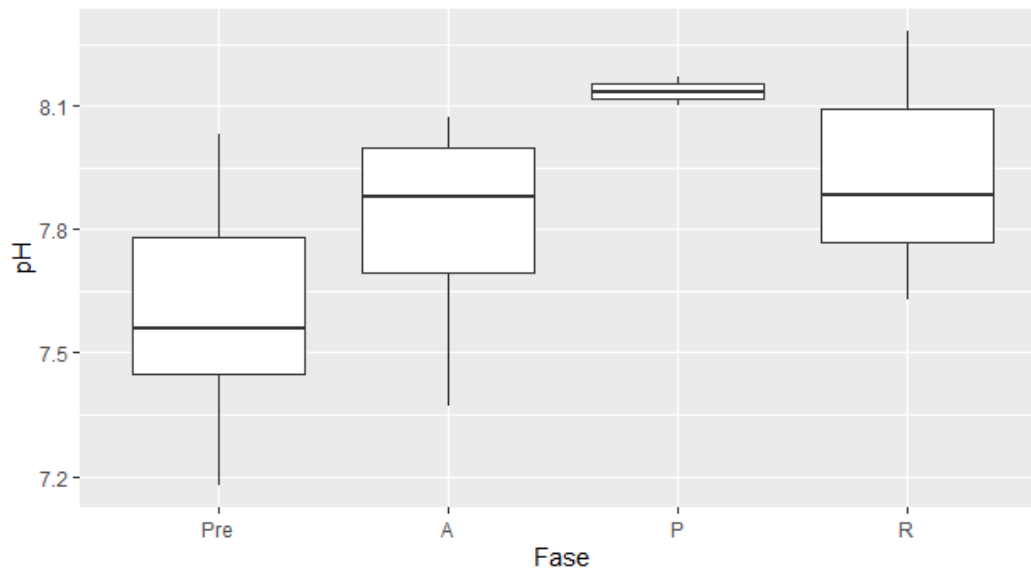


Figura 12. pH en las distintas fases de las avenidas. Pre, pre-avenida; A, fase ascendente; P, pico de la avenida; R, recesión.

La conductividad eléctrica (Figura 13) desciende bruscamente desde la pre-avenida a la fase ascendente y aun ligeramente más durante el pico y la recesión, con valores inferiores a 1 ds m^{-1} . Los valores de conductividad durante la pre-avenida son altos, pero más bajos de los típicos del agua subterránea de $6-8 \text{ ds m}^{-1}$, próximos a los que se suele encontrar en caudal base, lo que es buen indicador que los caudales circulantes en la pre-avenida ya eran característicamente diferentes del caudal base habitual.

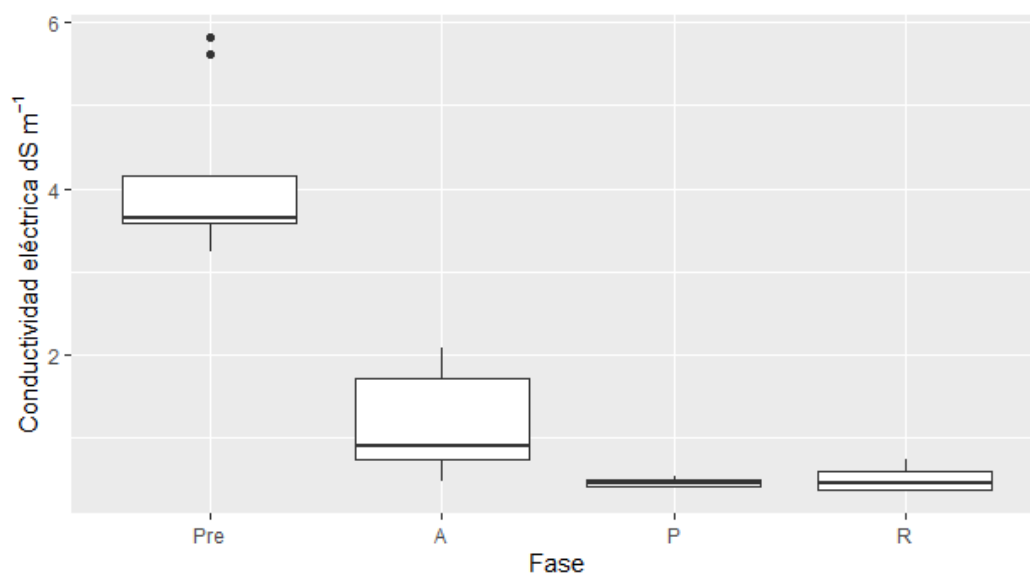


Figura 13. Conductividad eléctrica en las distintas fases de las avenidas. Pre, pre-avenida; A, fase ascendente; P, pico de la avenida; R, recesión.

El carbono orgánico total disuelto (Figura 14) asciende desde el momento de pre-avenida al pico de crecida para descender bruscamente en la recesión.

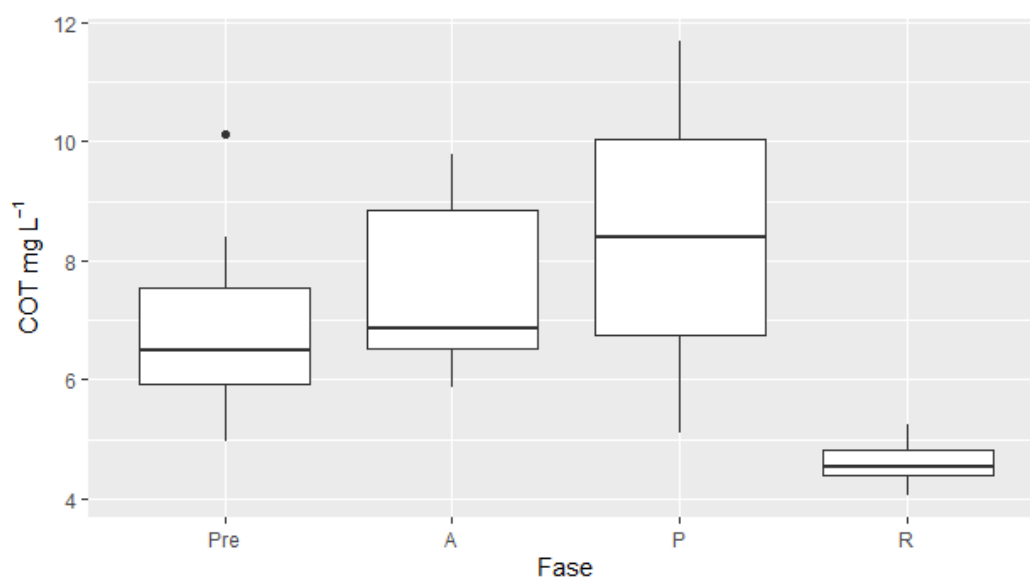


Figura 14. Concentración de carbono orgánico total disuelto en las distintas fases de las avenidas. Pre, pre-avenida; A, fase ascendente; P, pico de la avenida; R, recesión.

La concentración de carbono inorgánico total (Figura 15) se comporta de manera similar a la conductividad eléctrica descendiendo desde valores máximos en pre-avenida a mínimos en el pico de crecida y la recesión.

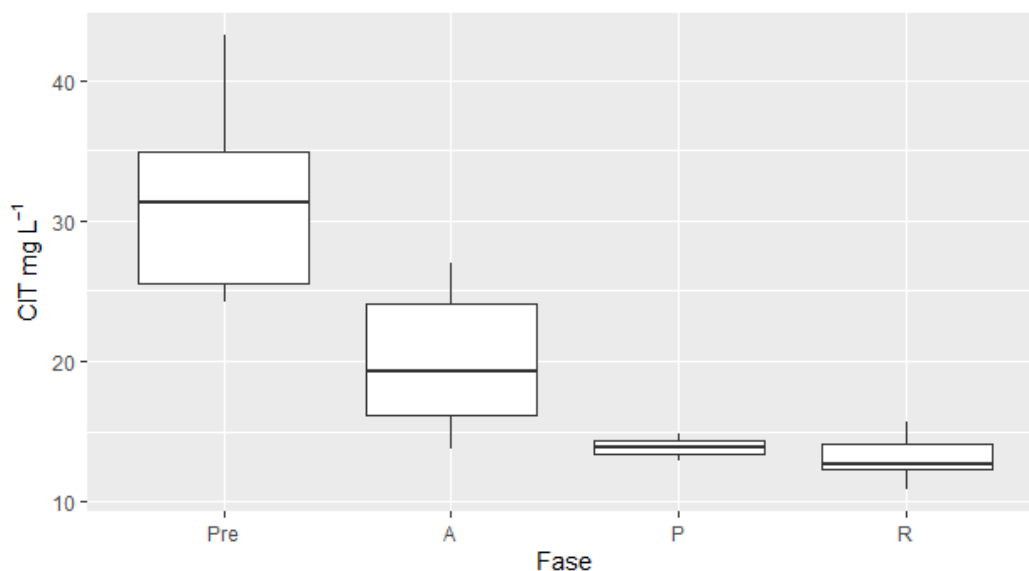


Figura 15. Concentración de carbono inorgánico total disuelto en las distintas fases de las avenidas. Pre, pre-avenida; A, fase ascendente; P, pico de la avenida; R, recesión.

Finalmente, el nitrógeno total disuelto (Figura 16) sigue un esquema parecido a la conductividad eléctrica y el carbono inorgánico, valores máximos en pre-avenida, descenso rápido durante la fase ascendente y mínimos en el pico y la recesión.

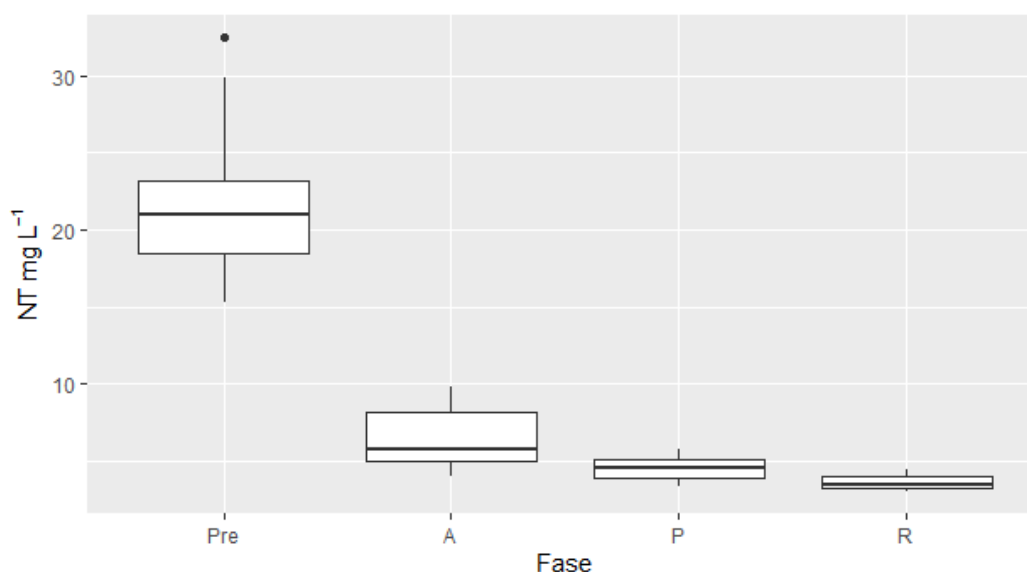


Figura 16. Concentración de nitrógeno total disuelto en las distintas fases de las avenidas. Pre, pre-avenida; A, fase ascendente; P, pico de la avenida; R, recesión.

La estima de las cargas de las variables físico-químicas de una riada es compleja y necesita tener en cuenta tanto las distintas fases de la riada como variaciones que existen dentro de una fase de riada. Por ejemplo, durante la recesión la concentración de sedimentos desciende con el caudal. Cuando se disponga de las analíticas concretas se realizará esta estima de mayor complejidad; para este informe inicial hemos tomado una aproximación provisional simplificada. En primer lugar, se han agregado los dos eventos de avenida, aun sabiendo que cada evento tiene sus propias características y se ha aplicado para calcular la carga a una concentración media por variable y fase. En segundo lugar, para mostrar el efecto de calcular las cargas con mayor complejidad, para los sedimentos en suspensión las cargas se han calculado también calculando una relación lineal entre concentración de sedimentos y caudal durante la recesión y aplicando esa relación a toda la recesión.

La descarga en cada una de las fases a la hora de estimar las entradas en el Mar Menor de los distintos compuestos se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Volumen de agua en cada fase de los dos eventos de avenida.

Evento	Fase	Volumen (hm ³)
Evento 1	Pre-avenida	0.091
Evento 1	Ascendente	0.037
Evento 1	Pico	0.027
Evento 1	Recesión	0.400
Evento 2	Pre-avenida	0.064
Evento 2	Ascendente	0.033
Evento 2	Pico	0.024
Evento 2	Recesión	0.515

Los valores medios de concentración por fase y variable físico química se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Concentración media de variables físico-químicas por fase de la avenida.

Fase	[SST] g L ⁻¹	[COT] mg L ⁻¹	[CIT] mg L ⁻¹	[NT] mg L ⁻¹
Pre-avenida	0.09	6.88	31.0	22.10
Ascendente	4.35	7.61	20.1	6.55
Pico	4.90	8.39	13.9	4.55
Recesión	2.63	4.62	13.0	3.67

En la Tabla 6 se muestran los aportes al Mar Menor de las variables físico-químicas disponibles a la hora de escribir este informe. Estas estimas están basadas en los valores medios de la Tabla 5. Los aportes mostrados en Mg o toneladas métricas.

Tabla 6. Aportes por avenida de sólidos en suspensión y carbono orgánico, carbónico inorgánico y nitrógeno totales disueltos en agua.

Evento	Fase	Volumen (hm ³)	SST (Mg)	COT (Mg)	CIT (Mg)	NT (Mg)
Evento 1	Pre-avenida	0.091	8.2	0.6	2.8	2.0
Evento 1	Ascendente	0.037	161.0	0.3	0.7	0.2
Evento 1	Pico	0.027	132.3	0.2	0.4	0.1
Evento 1	Recesión	0.4	1052.0	1.8	5.2	1.5
Evento 2	Pre-avenida	0.064	5.8	0.4	2.0	1.4
Evento 2	Ascendente	0.033	143.6	0.3	0.7	0.2
Evento 2	Pico	0.024	117.6	0.2	0.3	0.1
Evento 2	Recesión	0.515	1354.5	2.4	6.7	1.9
Total		1.2	2974.8	6.3	18.8	7.5

La estima de la carga de sedimentos teniendo en cuenta una evolución a lo largo de la recesión proporciona un valor menor que la estima basada en valores medios por fase. Dependiendo de cómo se calcule esa evolución la estima de la carga de sedimentos es de entre 1900 y 2400 Mg, es decir menor que la estima simple basada en valores medios por fase, y probablemente más realista. Un cálculo similar para otras variables puede afectar las estimas, pero probablemente en menor medida. Los datos analíticos de otras variables son de compuestos *disueltos* en agua que se ven menos afectados por el caudal que es mucho más importante para determinar la capacidad de transporte de sedimentos.

Para entender mejor las cifras se ha procedido a calcular el aporte en porcentaje de cada una de las fases en cada variable (Tabla 7). Los aportes mayores en volumen se dan en la recesión dada la gran proporción de la descarga que ocurre en esa fase. Sin embargo, los sólidos en suspensión están especialmente representados en la ascensión y el pico, mientras que el carbono inorgánico y el nitrógeno destacan en la pre-avenida, particularmente la descarga de nitrógeno en esta fase es casi la mitad del total a pesar de representar sólo el 13% del volumen de agua. El carbono orgánico total muestra moderadamente mayor descarga relativa en las fases iniciales de la avenida (pre-avenida, ascensión y pico).

Tabla 7. Porcentaje de cada fase de la avenida respecto al aporte total.

Fase	Volumen (%)	SST (%)	COT (%)	CIT (%)	NT (%)
Pre-avenida	13.0	0.5	17.1	25.5	45.8
Ascendente	5.9	10.2	8.5	7.5	6.1
Pico	4.3	8.4	6.8	3.8	3.1
Recesión	76.8	80.9	67.6	63.2	44.9

Finalmente, en términos de impacto sobre el Mar Menor estas entradas suponen 4.88 g de sólidos en suspensión, 0.03 g de CIT, 0.01 g de COT y 0.01 g de NT por m³, aunque lógicamente estos aportes no se distribuyen homogéneamente por la laguna.

Basado en valores obtenidos por TRAGSATEC en otras riadas en 2024 y aplicándolos a los volúmenes de descarga de este episodio la descarga de nitrato disuelto sería de 28 Mg y la de fósforo total disuelto de 2 Mg.

Discusión de características y volumen de los aportes

Es un fenómeno bien conocido la variación de las variables físico-químicas a lo largo de la evolución de una avenida. Datar estas variaciones es importante a la hora de proporcionar medidas precisas de aportes al Mar Menor.

El patrón de variación muestra que antes de la llegada de las ondas de avenida se había producido un incremento de caudal sin producir arrastres (valores de SST muy bajos) y con un agua de características parecidas al acuífero que alimenta una parte importante del caudal base: práctica ausencia de sólidos en suspensión, alta conductividad, alta concentración de carbono inorgánico (probablemente bicarbonato en su mayor parte), y alto contenido en nitrógeno. Antes del episodio el caudal oscilaba entre 50 y 80 L s⁻¹, los periodos de pre-avenida muestran caudales un orden de magnitud superior. El origen de ese incremento de caudal debe ser estudiado en profundidad ya que el mero aporte de la lluvia o de escorrentías ‘suaves’ deberían haber supuesto una dilución más importante de la observada. Se sabe que entre la primera y la segunda avenida se produjo la descarga del tanque de tormentas de Torre-Pacheco, pero es necesario conocer como respondió la depuradora de Los Alcázares y hasta qué punto las redes de pluviales, carreteras, etc., vierten al cauce, porque parece probable que mucho del incremento venga de estas fuentes.

Las estimaciones de aportes son aún fragmentarias ya que no se dispone aún de los datos de fosfato y disuelto y los nutrientes y carbono orgánico transportados en el sedimento, ni tampoco del aporte de la escorrentía urbana. En cualquier caso, los datos apuntan a un impacto global moderado de estos aportes en el Mar Menor que localmente puede ser más importante en el entorno de la desembocadura del Albujón y en zonas litorales adyacentes a entornos urbanos.

Sistema de Monitorización oceanográfica

Objetivo del informe

El presente informe científico-técnico resume los resultados del sistema de monitorización oceanográfica del Mar Menor durante los episodios de lluvias ocurridas a principios de marzo de 2025. El objetivo es diagnosticar el impacto de estas precipitaciones en la laguna salada con vistas a evaluar sus consecuencias por las administraciones públicas responsables de su gestión.

Fuentes de datos

Los resultados presentados en este informe se han obtenido a partir de dos fuentes de datos principales. En primer lugar, se han empleado los muestreos *in situ* efectuados por el Centro Oceanográfico de Murcia (IEO-CSIC) desde 2016, con una periodicidad que varía de mensual a quincenal. Estos muestreos se llevan a cabo en cuatro estaciones (A, B, C y M. Figura 17).



Figura 17. Ubicación de las estaciones de monitorización en tiempo real; A, B, C, Mareógrafo (est. 4), El Estacio (est. 5), y Marchamalo (est. 6). Y de muestreo *in situ* (A, B, C y M). Mostrada sobre una imagen de satélite Sentinel2 obtenida el 03/08/2023.

En segundo lugar, se han recopilado los datos recogidos en tiempo casi real durante el episodio de lluvias por el sistema de monitorización del proyecto BELICH, recientemente implementado en los puntos A, B y C—coincidentes con las ubicaciones del muestreo *in situ*—y en las golas de El Estacio y Marchamalo (Figuras 19 y 20). Este sistema se complementa con una estación meteorológica y un mareógrafo, ambos instalados en la base militar de San Javier (Figura 21).



Figura 19: Disposición y localización de las 3 boyas, 5 montes submarinos y el mareógrafo en el Mar Menor.

Configuración boya con lander

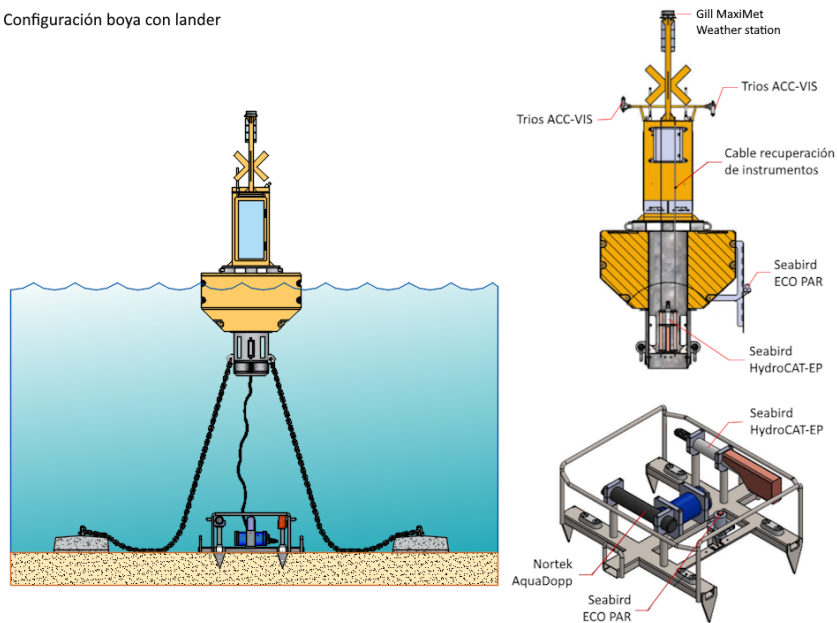


Figura 20: Esquema boya y lander (fondeo) de las estaciones de monitorización A, B, y C. Las estaciones de El Estacio y Marchamalo (5 y 6) solo tienen la parte profunda (lander).

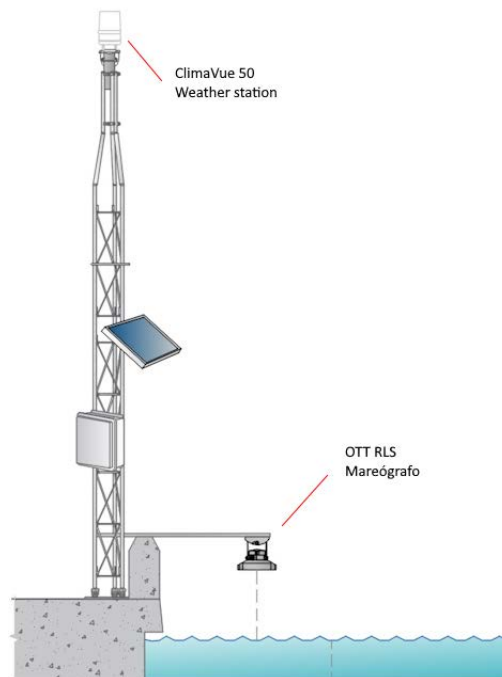


Figura 21: Esquema de los sensores instalados en la estación 4 en la base militar de San Javier.

Resultados

A continuación, se presenta 1) un análisis y descripción de las principales variables atmosféricas que caracterizaron el episodio de lluvias registrado entre el 28 de febrero y el 6 de marzo. Posteriormente, se analiza 2) el intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo adyacente durante dicho episodio. Por último, se realiza 3) un análisis del efecto combinado de ambos factores en las condiciones físico-químicas de la columna de agua del Mar Menor, empleando para ello los datos obtenidos a través del sistema dual de monitorización—oceanográfica e *in situ*—.

Caracterización del evento de precipitaciones

La Figura 22 muestra la cantidad de precipitación registrada por la estación meteorológica del mareógrafo ubicada en la base militar de San Javier. Se identifican dos periodos de intensas lluvias, separados por un intervalo de dos días.

- Primer episodio: tuvo su inicio en la madrugada del 1 de marzo de 2025 y finalizó en la tarde del 2 de marzo, con una duración de 36 horas y un acumulado total de 35,43 l/m².
- Segundo episodio: comenzó en la madrugada del 5 de marzo de 2025 y tuvo una duración de 24 horas, registrándose 25,47 l/m².
- Total acumulado: se registraron 60,89 l/m² de precipitación en el transcurso de una semana.

Esta cantidad de agua podría haber generado un incremento aproximado de 6 cm en el nivel del agua del Mar Menor.

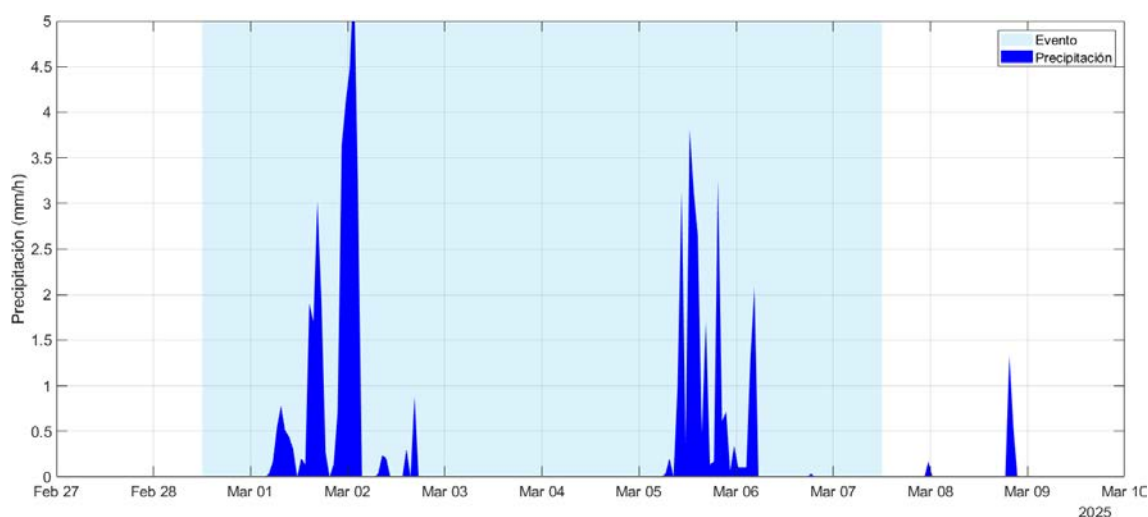


Figura 22: Precipitaciones registradas por la estación meteorológica del proyecto BELICH ubicada en San Javier.

El viento registrado en la estación meteorológica mostró una predominancia de vientos fuertes provenientes del sureste. Durante el período comprendido entre el 28 de febrero y el 3 de marzo de 2025, la velocidad media del viento fue de 12,80 m/s y la dirección media fue de 110° (Figura 23).

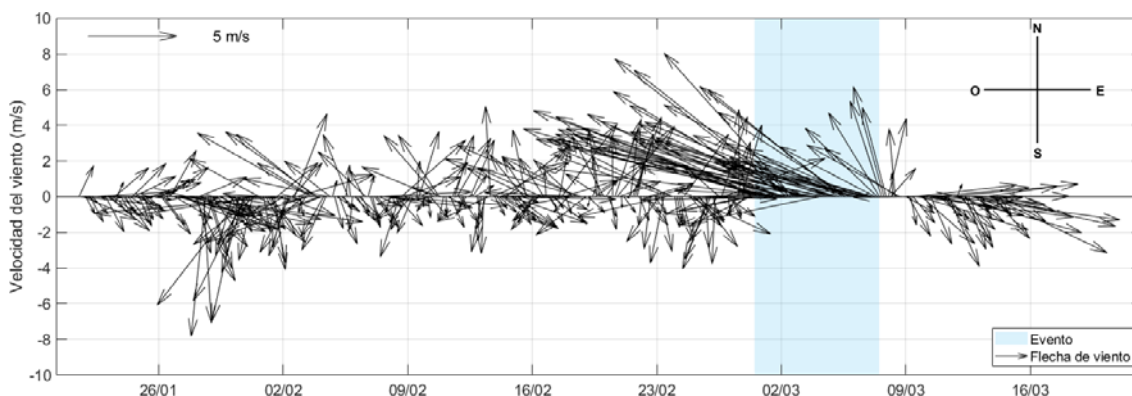


Figura 23: Velocidad y dirección del viento registrada por la estación meteorológica de San Javier.

La Figura 24 muestra los patrones de viento diarios habituales las semanas anteriores al acontecimiento, con viento débil del norte por las mañanas y vientos más fuertes del sur de hasta 5 m/s por las tardes. La componente oeste-este varía durante este periodo, pero se mantiene por debajo de 5 m/s en casi todas las ocasiones. El 28 de febrero llega un viento muy fuerte del este sureste, con vientos de hasta 15 m/s procedentes de la dirección del mar Mediterráneo. Este viento no disminuye hasta el 7 de marzo, provocando una marejada.

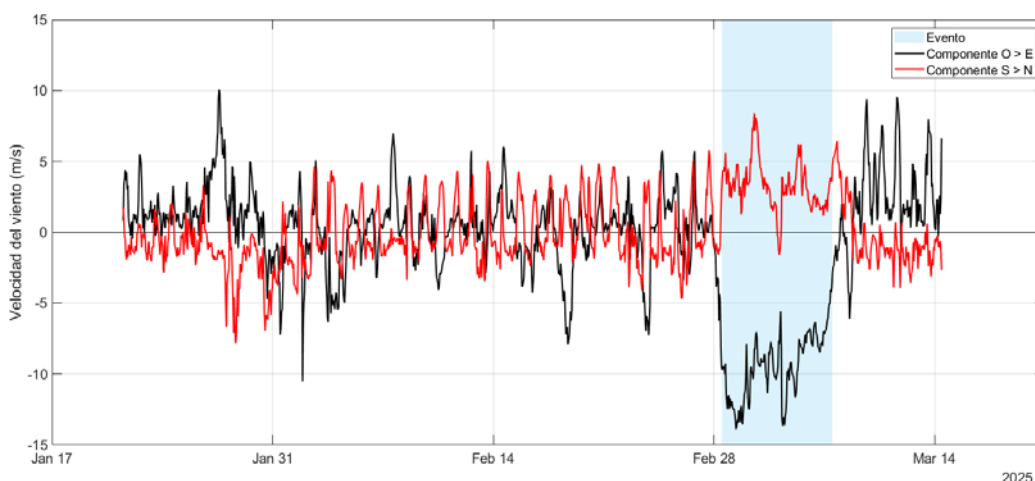


Figura 24: Componentes de la velocidad del viento de oeste a este (negro) y de sur a norte (rojo). Con el evento mostrando un patrón claramente diferenciado.

Caracterización del intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo adyacente

En las golas de El Estacio y Marchamalo, la corriente marina ha sido registrada mediante el correntímetro Nortek Aquadopp, instalado en el monte-submarino del sistema de monitorización. Gracias a los datos de corriente y a la batimetría de los canales, se ha estimado la cantidad de agua (y su salinidad) que ha fluido a través de estos durante el período de lluvias (Figuras 25 y 26). Se distingue claramente entre las aguas con salinidad alrededor de 38 del Mediterráneo entrando, y aguas más salinas saliendo.

A partir de estas estimaciones de caudal, el balance neto de agua entre el 28 de febrero y el 2 de marzo de 2025 indica una entrada de:

- 12.422.823 m³ de agua a través de El Estacio.
- 3.875.286 m³ de agua a través de Marchamalo.

En total, la entrada de agua por estas golas podría haber generado un aumento aproximado de 12 cm en el nivel del mar.

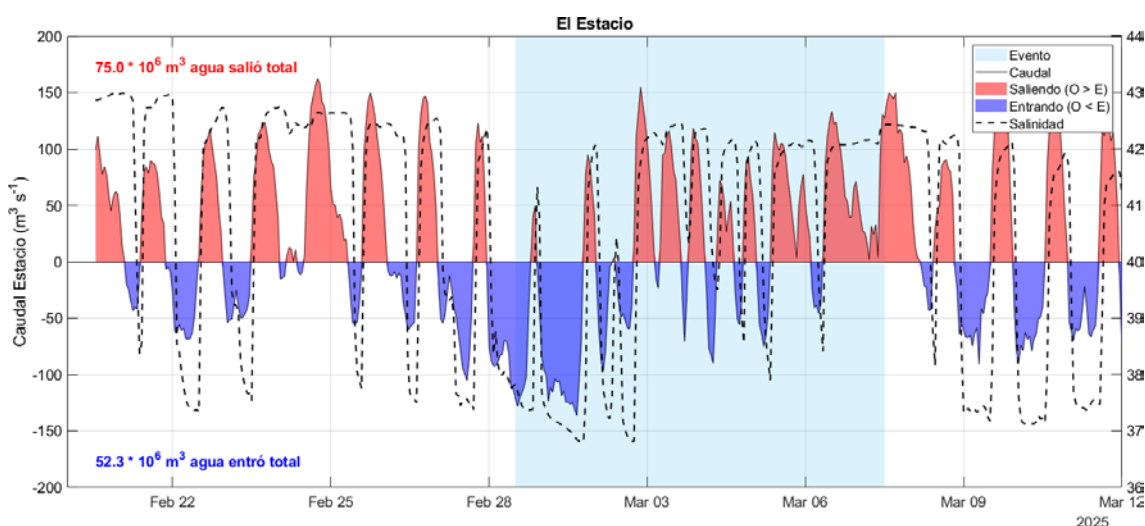


Figura 25: Caudal de agua que entra (azul) y sale (rojo) por el canal de El Estacio. La línea negra discontinua muestra la salinidad.

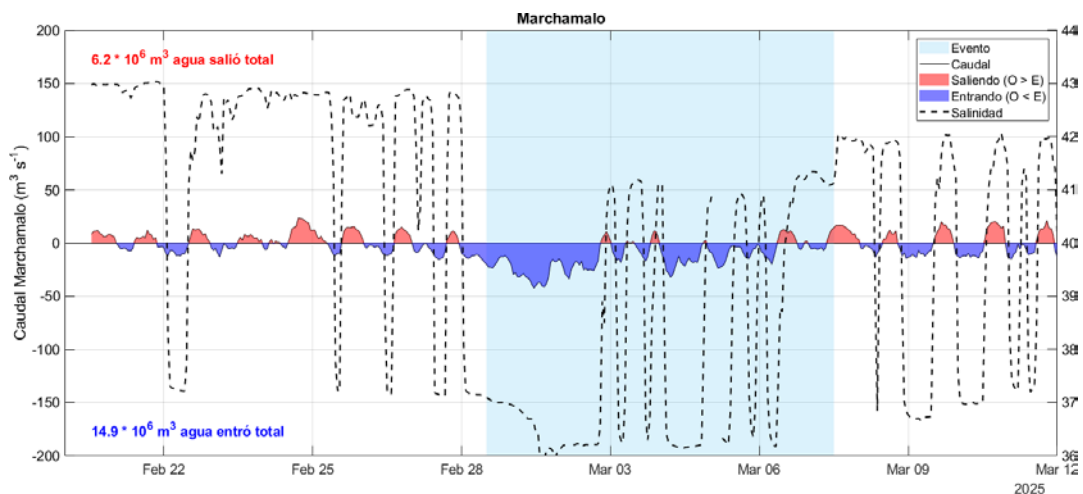


Figura 26: Caudal de agua que entra (azul) y sale (rojo) por el canal de Marchamalo. La línea negra discontinua muestra la salinidad.

La Figura 27 muestra la variación del nivel del Mar Menor registrada por el mareógrafo de San Javier. Se observa que el primer periodo analizado (1 de marzo de 2025) estuvo acompañado de un aumento del nivel del agua de 21,15 cm, mientras que tras el segundo periodo (5 de marzo) se registró un incremento de 4,4 cm.

Estas subidas pueden explicarse, en parte, por la entrada de agua a través de las golos (Estacio y Marchamalo) y las precipitaciones registradas en la laguna, tal como se ha mencionado anteriormente. La mayor contribución a la subida del nivel del mar proviene de la entrada a través de las golos (12 cm), seguido de la entrada de precipitaciones en la laguna (8 cm). El resto del aumento del nivel del mar probablemente se deba a la influencia de los fuertes vientos del noroeste, que coincidieron con los episodios de lluvia, así como a la entrada de aguas terrestres y de la Encañizada.

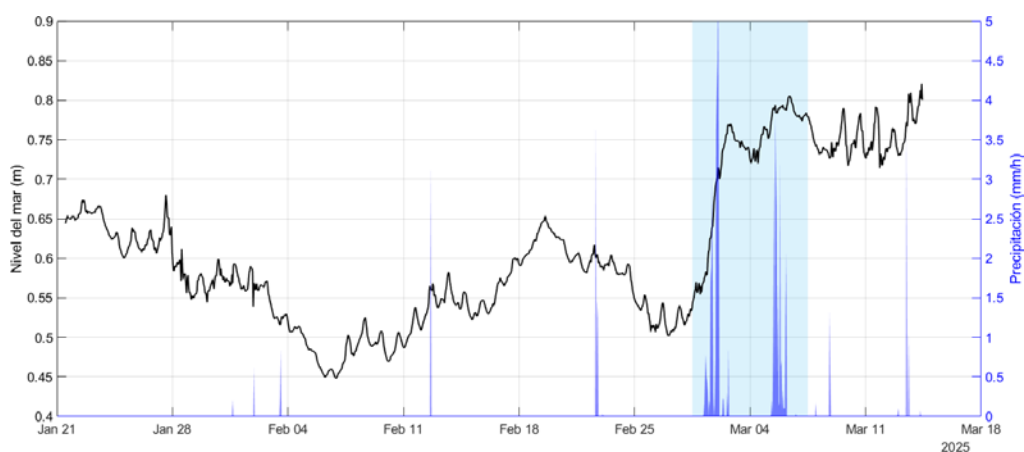


Figura 27. Nivel del mar y precipitación por hora registrados por el mareógrafo y la estación meteorológica situados en San Javier.

El nivel del agua subió rápidamente en todas las estaciones, como se puede observar en la Figura 28. En cuanto disminuyó el viento, el nivel del agua volvió a un nivel más bajo en todas las estaciones, excepto por el mareógrafo de San Javier. Puesto que en ese momento el forzamiento por vientos había cesado, esto podría atribuirse a la entrada de aguas continentales en la laguna por el litoral de esta zona.

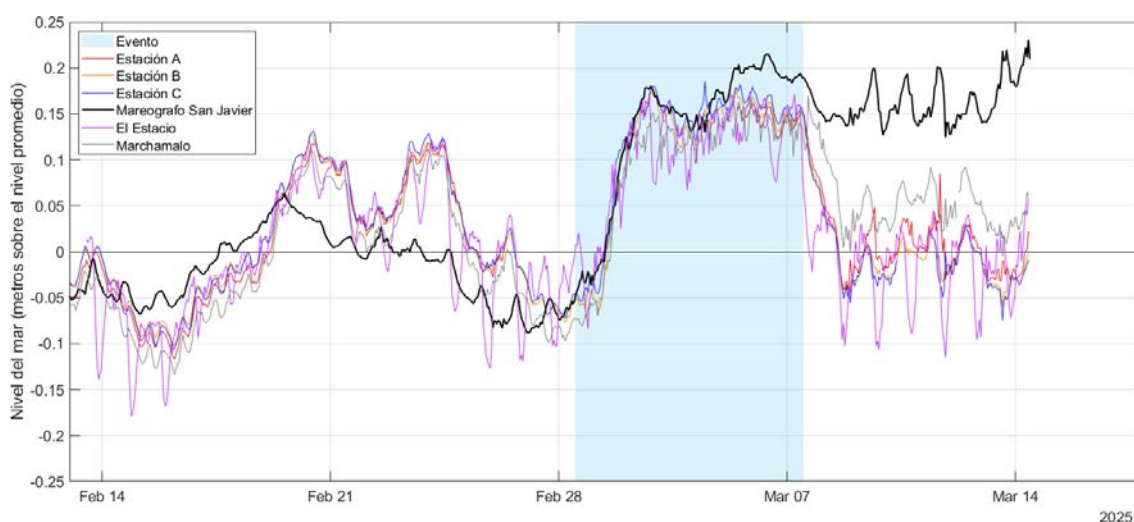


Figura 28. Nivel del mar en todas las estaciones.

La dinámica observada en el intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo adyacente determina las condiciones físico-químicas del agua que entra o sale del Mar Menor en cada una de las fases del episodio de lluvias (Figuras 29, 30, 31, 32 y 33).

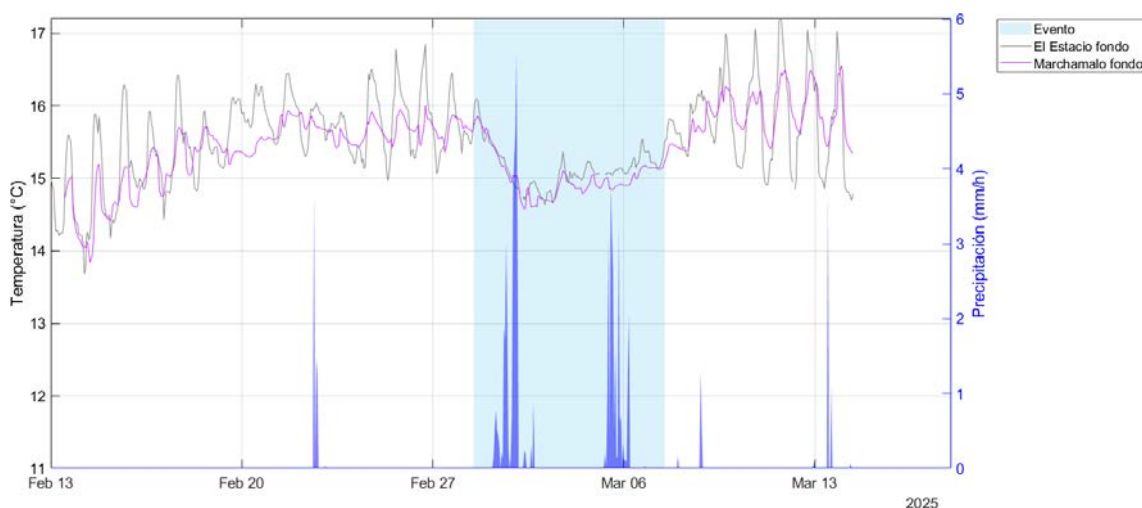


Figura 29. Temperatura registrada en los montes submarinos situados en El Estacio y Marchamalo (gris).

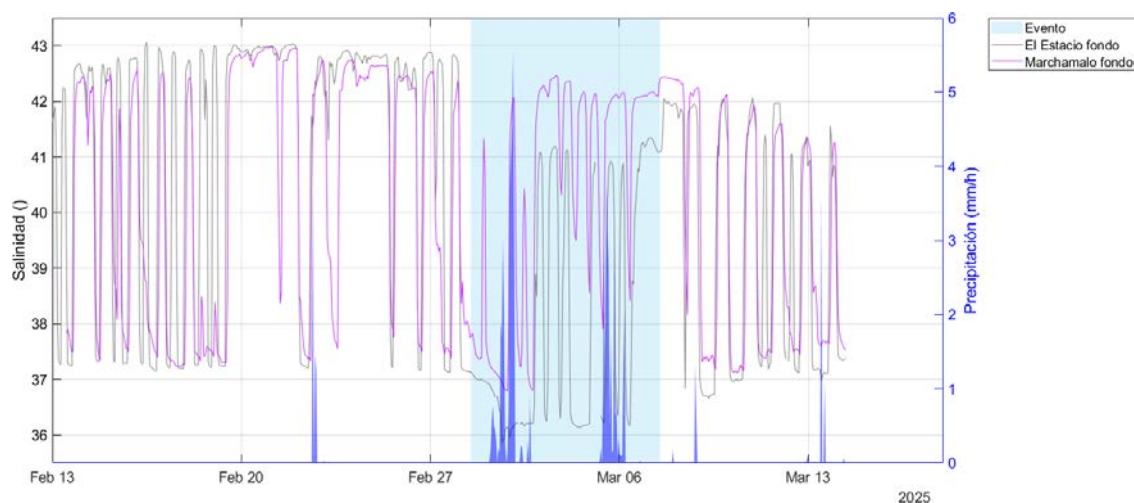


Figura 30. Salinidad registrada en los montes submarinos situados en El Estacio (rosa) y Marchamalo (gris). En el eje vertical derecho se muestran los milímetros de precipitación por hora registrados por la estación meteorológica de San Javier.

Los elevados valores de turbidez observados a partir del 28 de febrero (Figura 31) se atribuyen a la resuspensión y movilización de sedimentos en las golas a consecuencia de los fuertes vientos del este sureste, con rachas de hasta 15 m/s (Figura 24). La bajada en los niveles de oxígeno (Figura 32), parecen estar relacionados con esta resuspensión de sedimentos hipóxicos/anóxicos característicos del canal de la gola. Relacionado con estas turbulencias se observan unos picos de incremento de la clorofila a (Figura 33), aunque podrían reflejar más bien interferencias con los sólidos en suspensión, tal y como se ha comprobado en otros ámbitos.

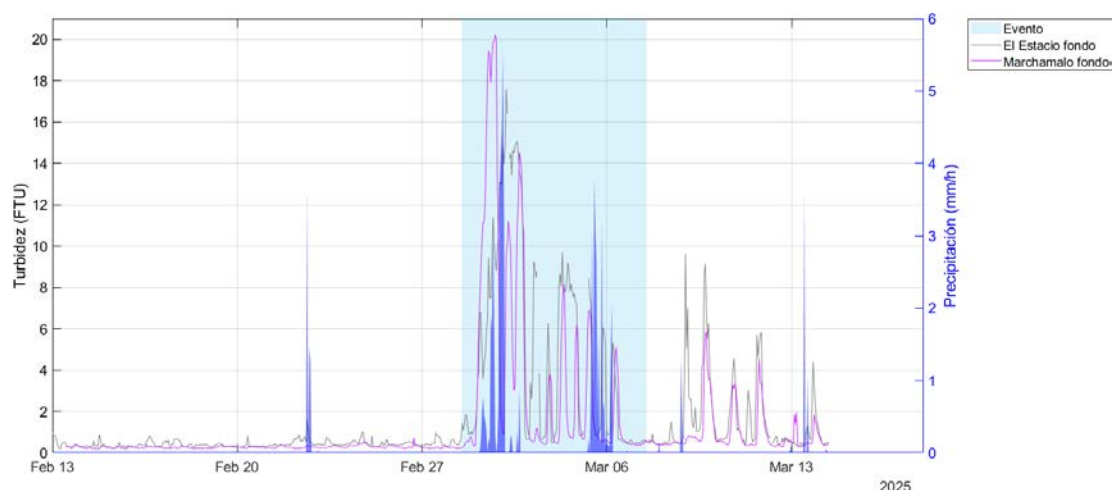


Figura 31. Turbidez registrada en los montes submarinos situados en El Estacio (rosa) y Marchamalo (gris). En el eje vertical derecho se muestran los milímetros de precipitación por hora registrados por la estación meteorológica de San Javier.

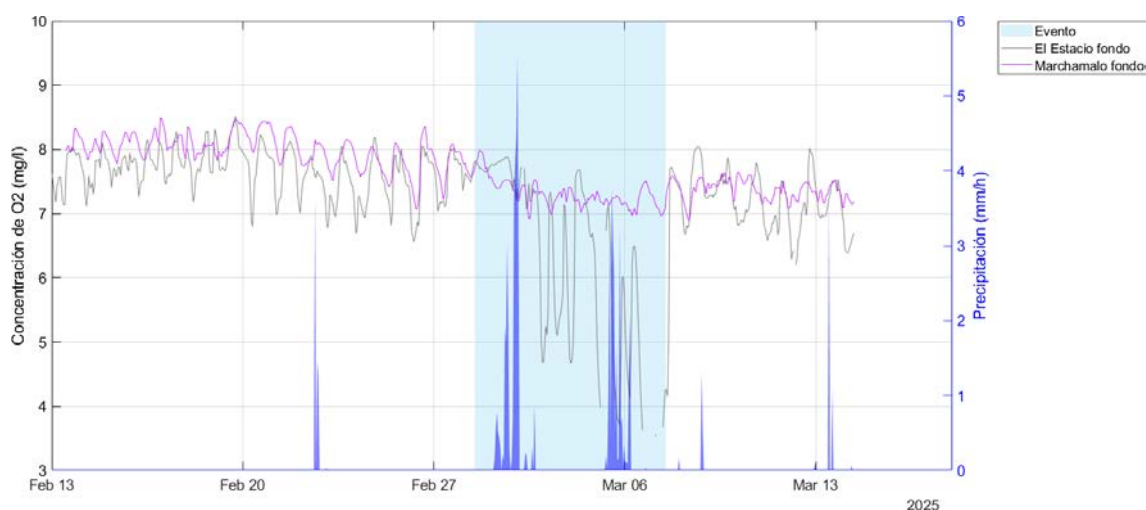


Figura 32. Concentración de oxígeno registrada en los montes submarinos situados en El Estacio (rosa) y Marchamalo (gris). En el eje vertical derecho se muestran los milímetros de precipitación por hora registrados por la estación meteorológica de San Javier.

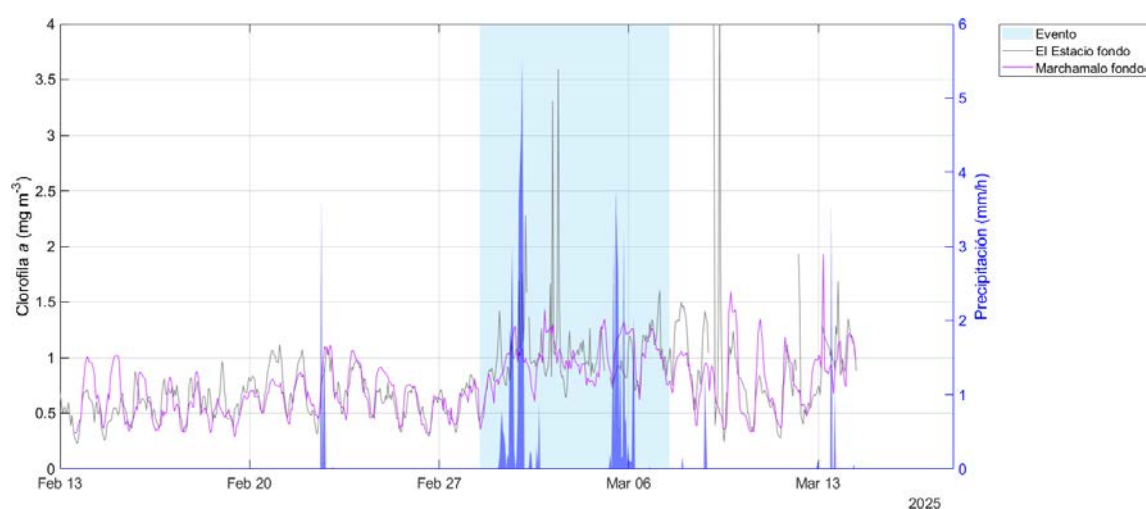


Figura 33. Clorofila a (Fluorescencia) registrada en los montes submarinos situados en El Estacio (rosa) y Marchamalo (gris). En el eje vertical derecho se muestran los milímetros de precipitación por hora registrados por la estación meteorológica de San Javier.

Efectos en la columna de agua del Mar Menor

Temperatura

Tras el primer episodio de lluvias (con una duración de 36 horas entre el 1 y el 2 de marzo y un acumulado total de 35,43 l/m²) se observó un descenso en la temperatura del agua del Mar Menor en todas las estaciones oceanográficas, tanto en superficie como en el fondo (Figura 34). Esta bajada de temperaturas generalizada remitió a lo largo de los días siguientes al

primer y mayor evento de lluvias y en la actualidad se han recuperado los valores observados con anterioridad. Si bien las lluvias pudieron jugar algún papel en lo sucedido, es probable que cambios tan sustanciales en la dinámica termal observados durante este periodo, tanto en superficie como en fondo, se deban más bien al agua entrada de agua mediterránea, ligeramente más fría, que tuvo lugar durante ese mismo periodo (ver Figuras 25 y 26 en consonancia con Figura 29).

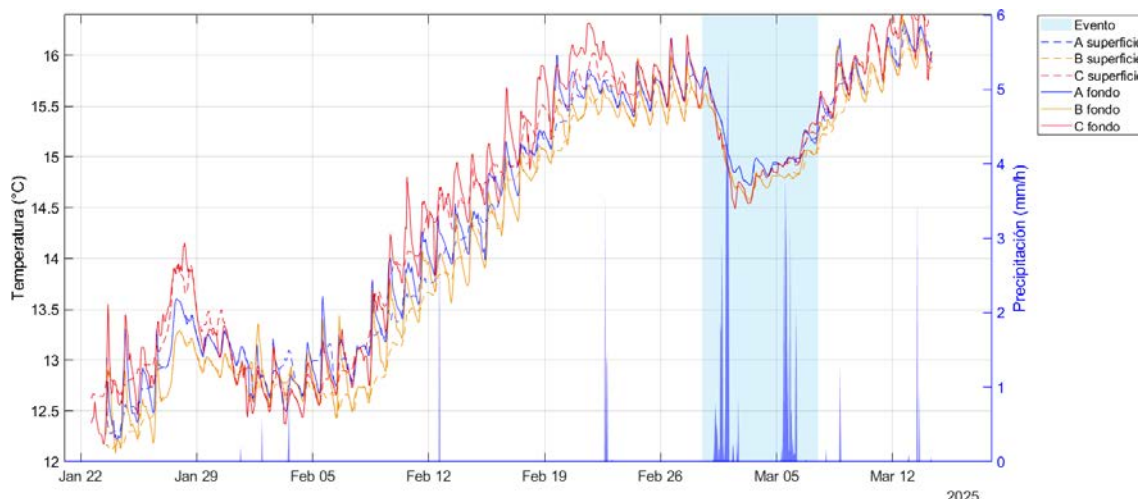


Figura 34. Temperatura registrada en las boyas de las zonas A, B y C. Se muestran, mediante líneas continuas, los datos del sensor de superficie (0,8 m) y, mediante líneas discontinuas, los del sensor de fondo (5,5–6,2 m). La estación A se representa en rojo, la estación B en amarillo y la estación C en azul. En el eje vertical derecho se muestran los milímetros de precipitación por hora registrados por la estación meteorológica de San Javier.

En la Figura 35 se presenta la serie histórica de temperatura promedio en superficie (0,5m) y fondo (4m) en el Mar Menor durante los últimos 10 años. Los valores alcanzados durante el periodo de lluvias no suponen un valor extremo en la historia reciente del Mar Menor, ejerciendo una repercusión despreciable en los procesos biológicos y ecológicos de la laguna.

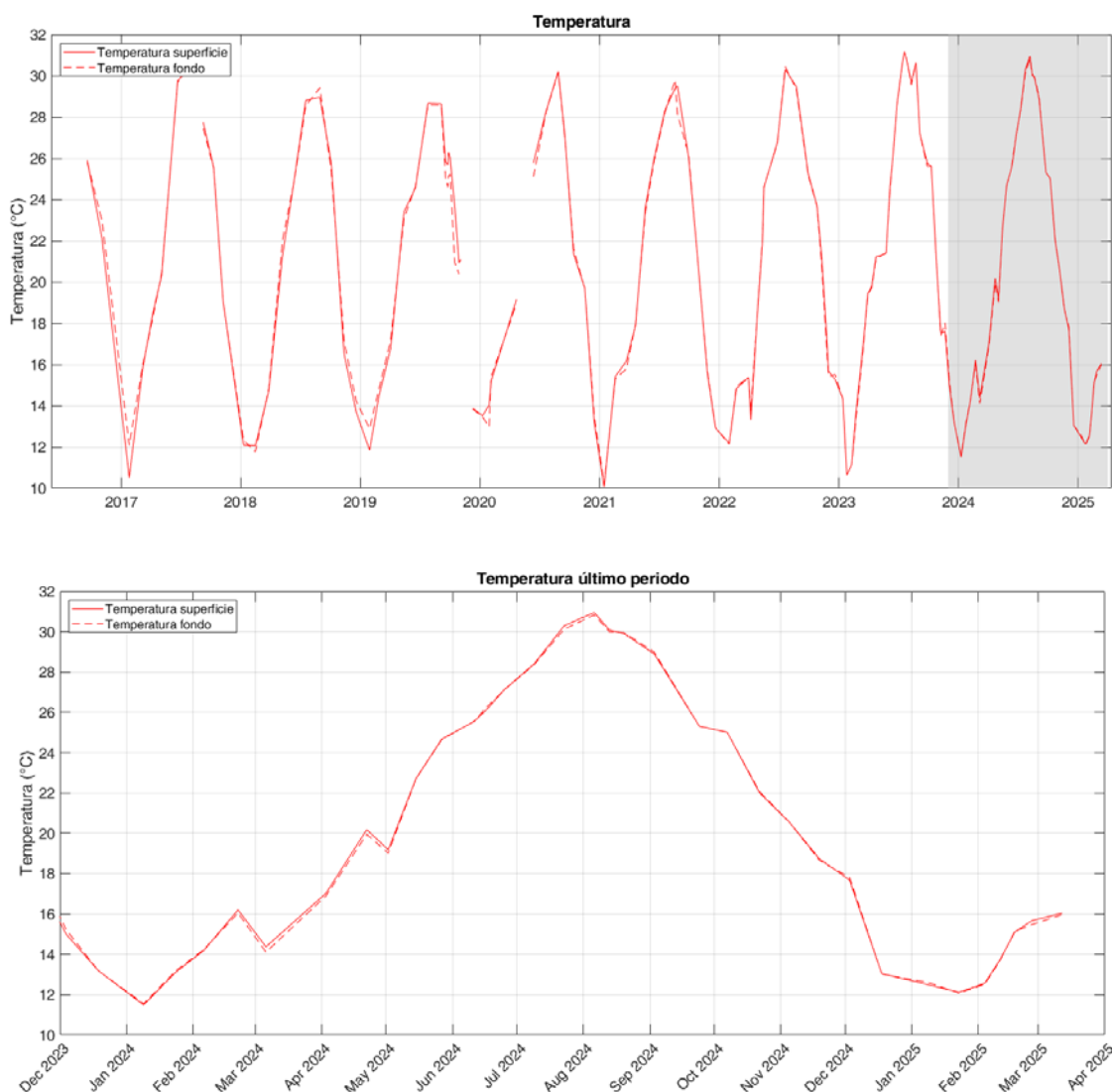


Figura 35. Datos de temperatura promedio en superficie (0,5m; rojo continuo) y en 4 metros de profundidad (rojo discontinuo) en las estaciones A, B, C y M (Figura 17) de los muestreos del proyecto DMMEM y BELICH durante los últimos 10 años (arriba) y durante el último año natural (abajo).

Salinidad

En la Figura 36 se puede observar cómo las lluvias bajaron la salinidad del agua de la laguna. Esta bajada fue mucho más acentuada en la estación A (situada en la parte central de la cubeta norte), tanto en superficie como en el fondo, debido probablemente, no tanto al efecto de las lluvias, sino a la gran entrada de agua mediterránea detectada en la gola de El Estacio en ese mismo periodo (Figura 25).

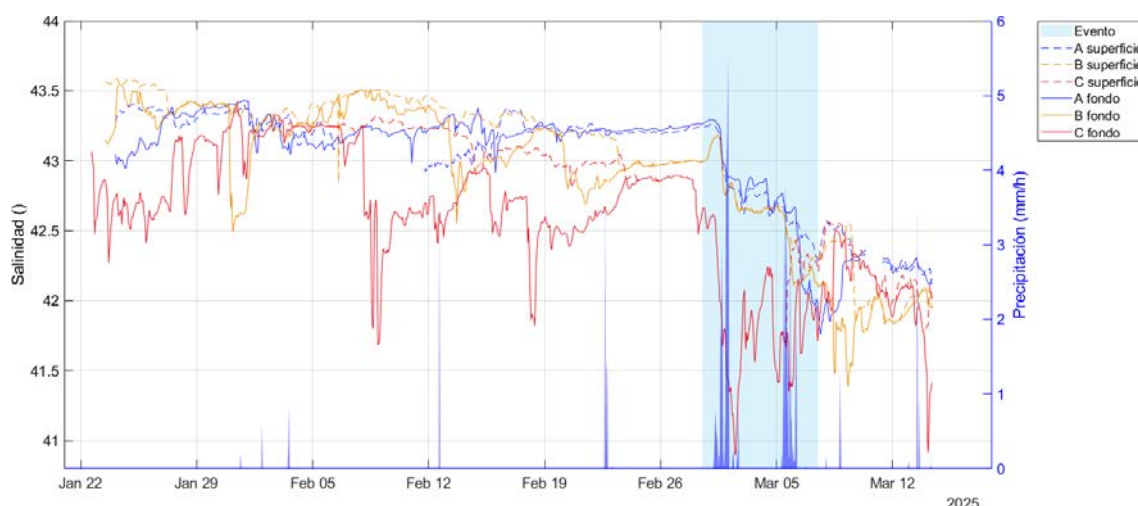


Figura 36. Salinidad registrada en las boyas de las zonas A, B y C. Se muestran, mediante líneas continuas, los datos del sensor de superficie (0,8 m) y, mediante líneas discontinuas, los del sensor de fondo (5,5–6,2 m). La estación A se representa en rojo, la estación B en amarillo y la estación C en azul. En el eje vertical derecho se muestran los milímetros de precipitación por hora registrados por la estación meteorológica de San Javier.

Atendiendo a la serie histórica (Figura 37), observamos que los valores de salinidad, si bien son inferiores a los alcanzados en este mismo periodo del pasado año, no suponen un valor extremo en la historia reciente del Mar Menor, y no se acercan a los observados en otros episodios extremos de lluvias torrenciales (por ej. otoño 2019 o primavera de 2022).

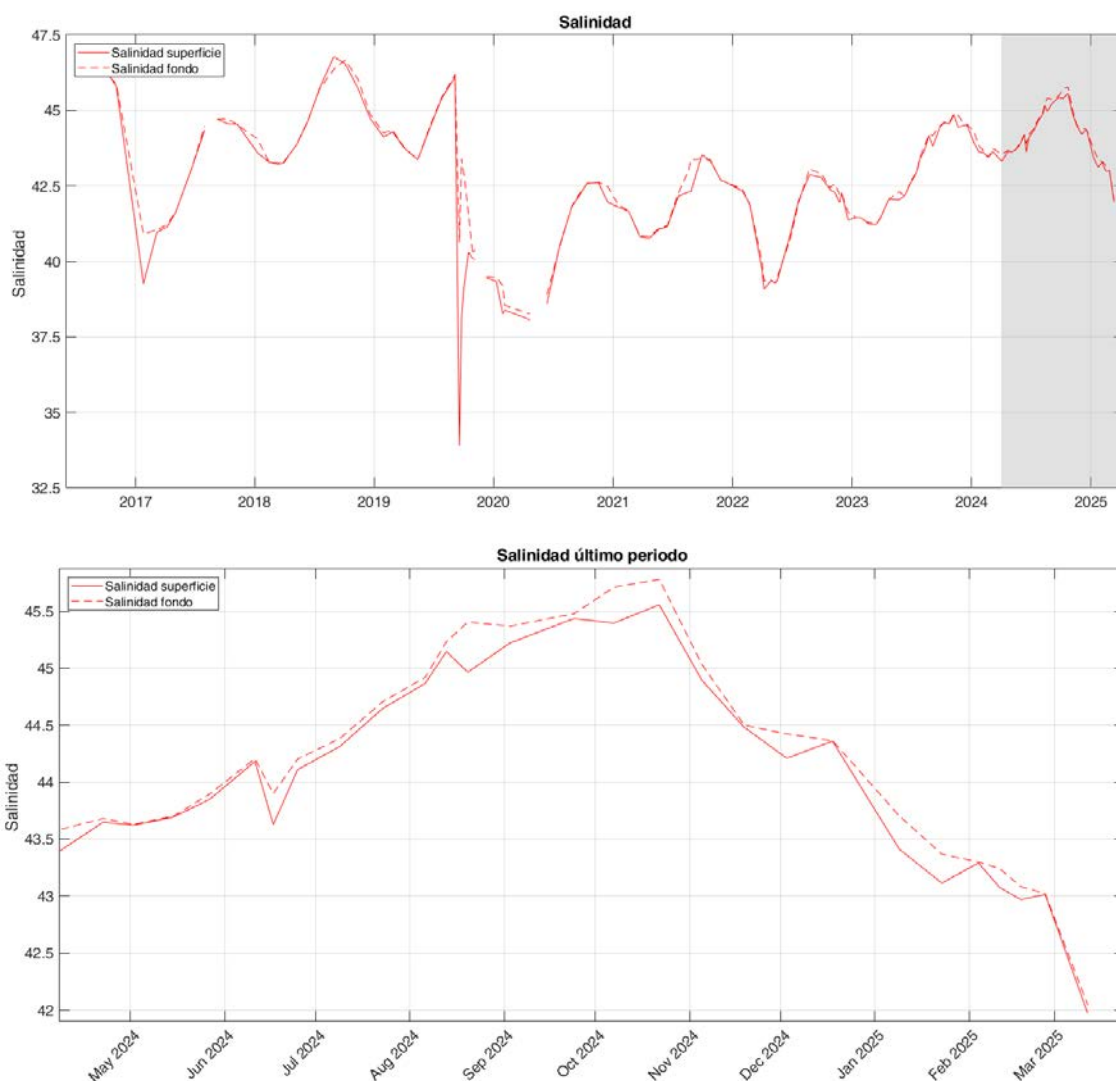


Figura 37: Datos de salinidad promedio en superficie (0,5m; rojo continuo) y en 4 metros de profundidad (rojo discontinuo) en las estaciones A, B, C y M (Figura 17) de los muestreos del proyecto DMMEM y BELICH durante los últimos 10 años (arriba) y durante el último año natural (abajo).

Concentración de oxígeno

La Figura 38 muestra la respuesta de la concentración de oxígeno en las aguas del Mar Menor al episodio de lluvias. Se observa una clara disminución respecto a los valores detectados con anterioridad a lo largo del mes de febrero, sufriendo una bajada de entre 0.5 y 2 mg/l dependiendo de la estación oceanográfica considerada, si bien en ningún caso estos valores llegan a ser preocupantes, manteniéndose en todos los casos por encima de 6.5 mg/l, tanto en superficie como en fondo.

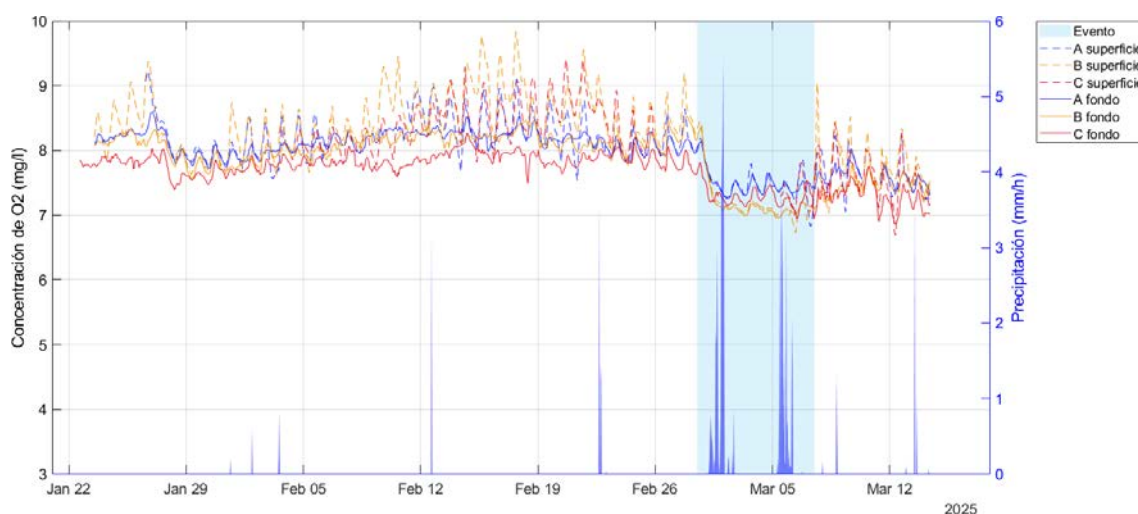


Figura 38. Concentración de oxígeno registrada en las boyas de las zonas A, B y C. Se muestran, mediante líneas continuas, los datos del sensor de superficie (0,8 m) y, mediante líneas discontinuas, los del sensor de fondo (5,5–6,2 m). La estación A se representa en rojo, la estación B en amarillo y la estación C en azul. En el eje vertical derecho se muestran los milímetros de precipitación por hora registrados por la estación meteorológica de San Javier.

Si atendemos a la serie histórica (Figura 39), al igual que observamos con las variables anteriores, la concentración de oxígeno alcanzada no supone un valor extremo en la historia reciente del Mar Menor, y no se acerca a los observados en otros episodios extremos de lluvias torrenciales (por ej. otoño 2019).

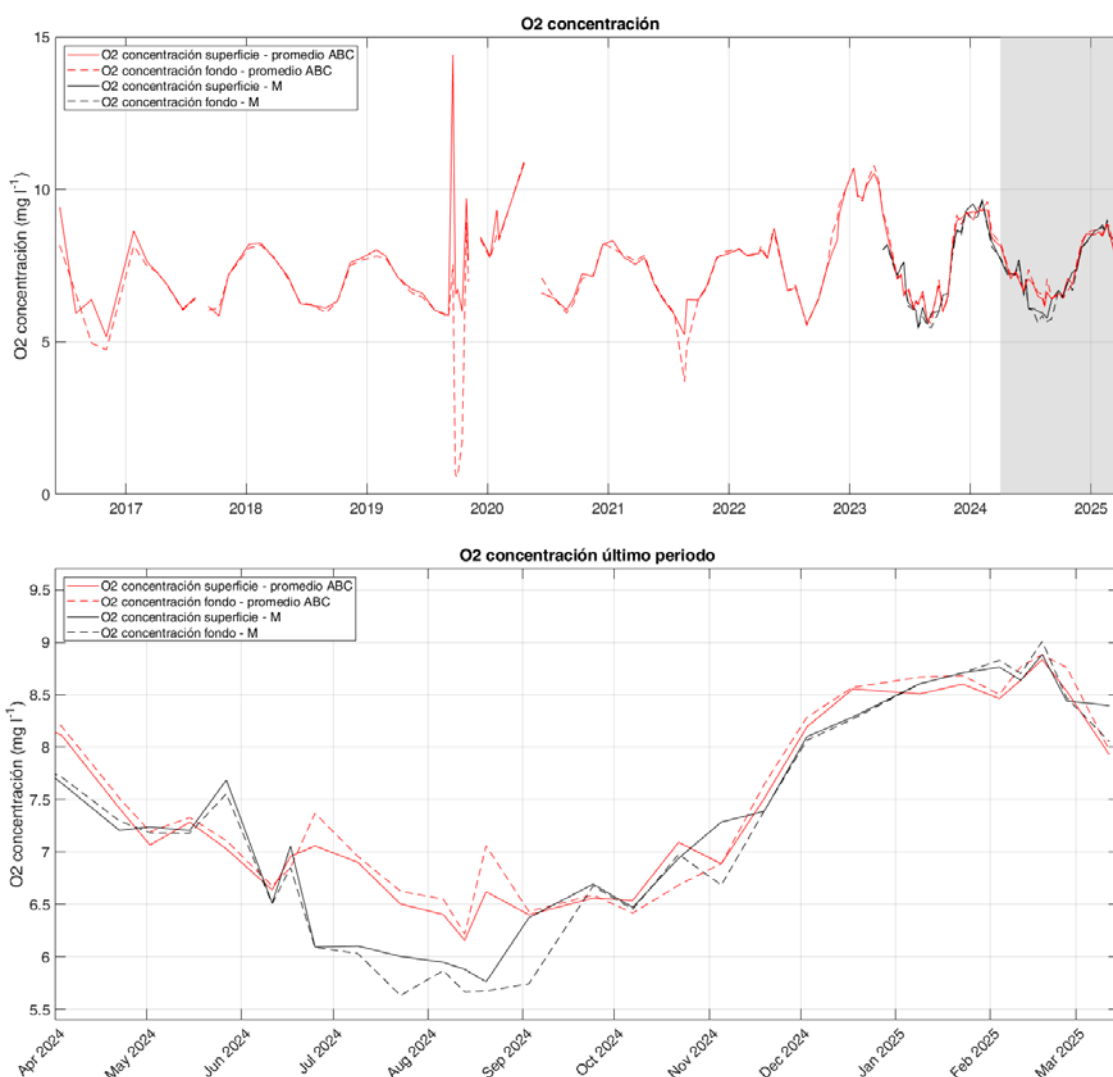


Figura 39: Series temporales promedio de oxígeno disuelto de la superficie (0,5m; rojo continuo) y en 4 metros de profundidad (rojo discontinuo) en las estaciones A, B, C y M (Figura 17) de los muestreos del proyecto DMMEM y BELICH durante los últimos 10 años (arriba) y durante el último año natural (abajo).

Turbidez

En la Figura 40 se muestran los valores de turbidez alcanzados durante el periodo de lluvias en las zonas profundas del Mar Menor. Los datos registrados en la estación oceanográfica B mostraron una respuesta rápida y al alza de turbidez en el fondo, por la cual los valores registrados con anterioridad ascendieron de valores de entre 0,5 y 1,5 FTU a valores superiores a 25 FTU.

La extrema turbidez encontrada en B puede deberse a un sumatorio de causas. Si bien su mayor cercanía a la desembocadura de la Rambla del Albujón debe ejercer una gran influencia,

otros factores como la expansión de la mancha hacia el centro de la laguna pudieron maximizar dicho efecto.

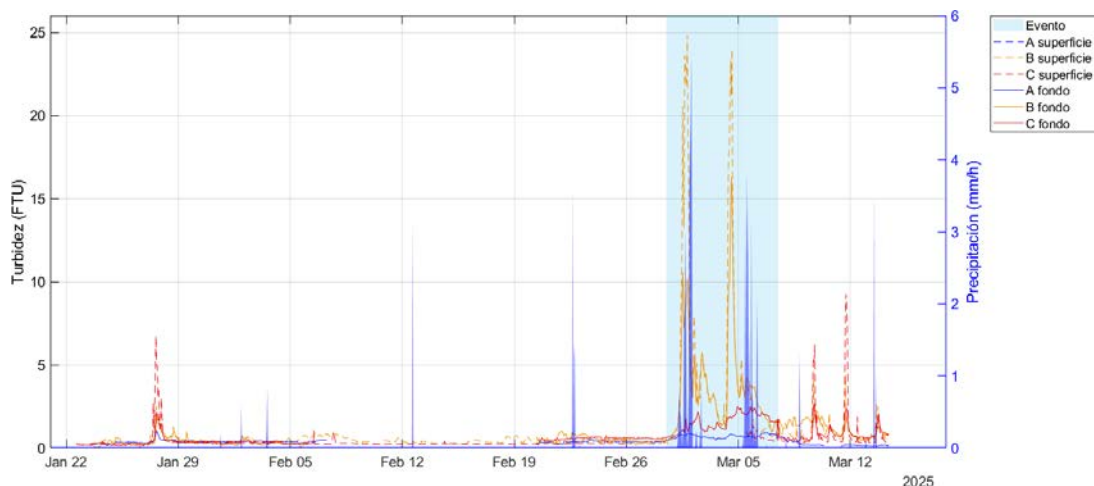


Figura 40. Turbidez registrada en los montes submarinos (5,5–6,2 m) de las boyas de las zonas A, B y C. La estación A se representa en rojo, la estación B en amarillo y la estación C en azul. En el eje vertical derecho se muestran los milímetros de precipitación por hora registrados por la estación meteorológica de San Javier.

Clorofila

Las boyas oceanográficas detectaron valores elevados de clorofila a en las aguas del Mar Menor inmediatamente después del inicio de las lluvias (Figura 41), especialmente en la estación B (las estaciones A y C se vieron sensiblemente menos afectadas).

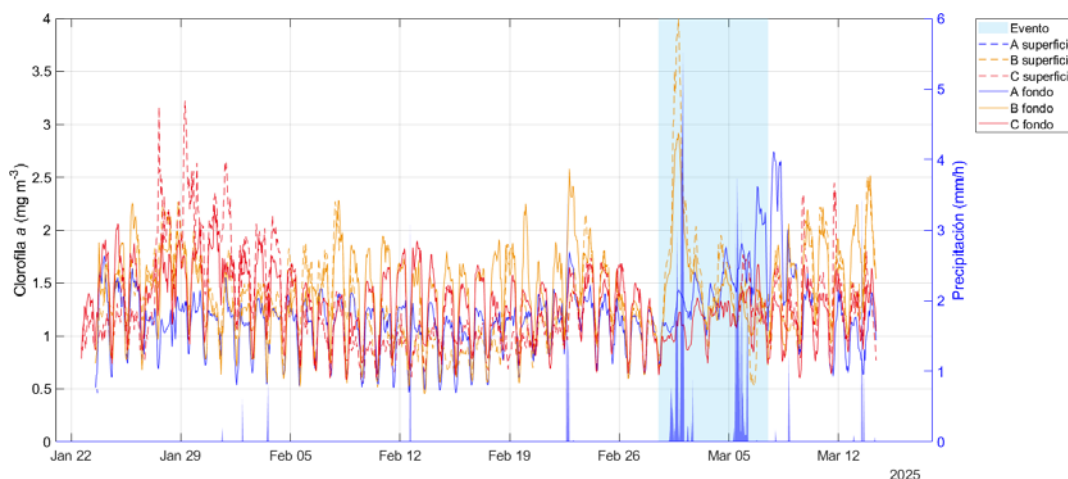


Figura 41. Clorofila a registrada en los montes submarinos (5,5–6,2 m) de las boyas de las zonas A, B y C. La estación A se representa en rojo, la estación B en amarillo y la estación C en azul. En el eje vertical derecho se muestran los milímetros de precipitación por hora registrados por la estación meteorológica de San Javier.

En la línea de lo mostrado por las demás variables de estudio, los valores de clorofila *a* en las aguas del Mar Menor no llegaron a los extremos observados en episodios extremos previos, como los ocurridos durante pasados eventos de sopa verde (Figura 42).

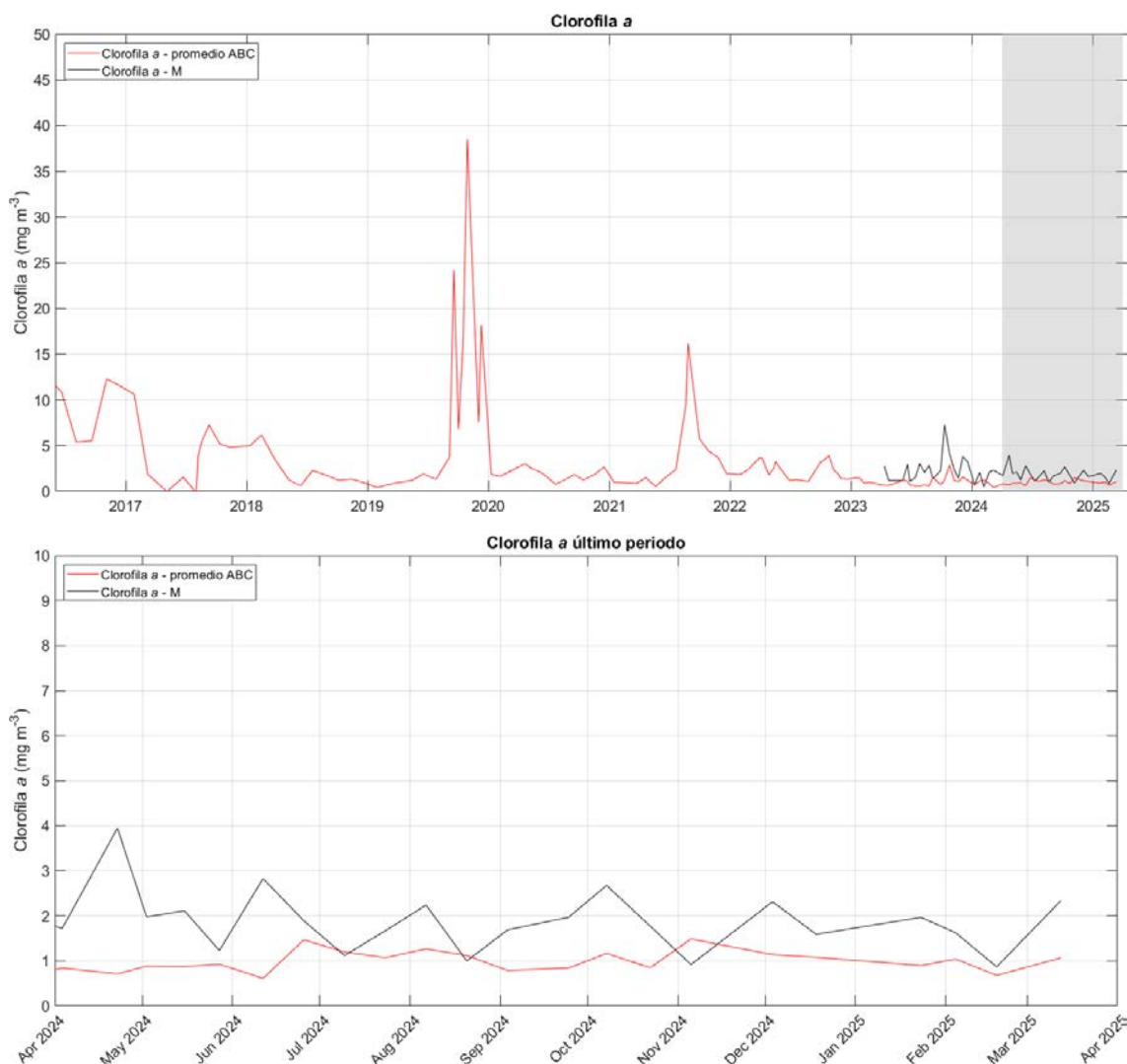


Figura 42: Series temporales promedio de clorofila *a* de la superficie (0,5m; rojo continuo) y en 4 metros de profundidad (rojo discontinuo) en las estaciones A, B, C y M (Figura 17) de los muestreos del proyecto DMMEM y BELICH durante los últimos 10 años (arriba) y durante el último año natural (abajo).

Extinción de la luz

En consonancia con lo observado con la turbidez (Figura 40), la cantidad de luz PAR que llegó al fondo del Mar Menor mostró una disminución acusada durante el episodio de lluvias (Figura 43, línea azul discontinua). Este descenso estuvo motivado, por un lado, por una disminución de la radiación solar incidente resultado de un cielo parcial o totalmente cubierto por nubes, y,

por otro lado, por la entrada de material particulado en suspensión de origen continental que llegó a la laguna, como muestra el incremento significativo del coeficiente de extinción de la luz estimado a partir de los valores de luz PAR (K_d , línea negra continua en Figura 43). De acuerdo con los valores de K_d se trata de un episodio de turbidez extrema con una duración de unos 6 días, tras los cuales se recuperan los valores de luz en el fondo. Aunque la reducción de la luz es extrema, no se prevé que la duración del episodio sea suficiente para causar algún efecto negativo sobre los organismos fotosintéticos.

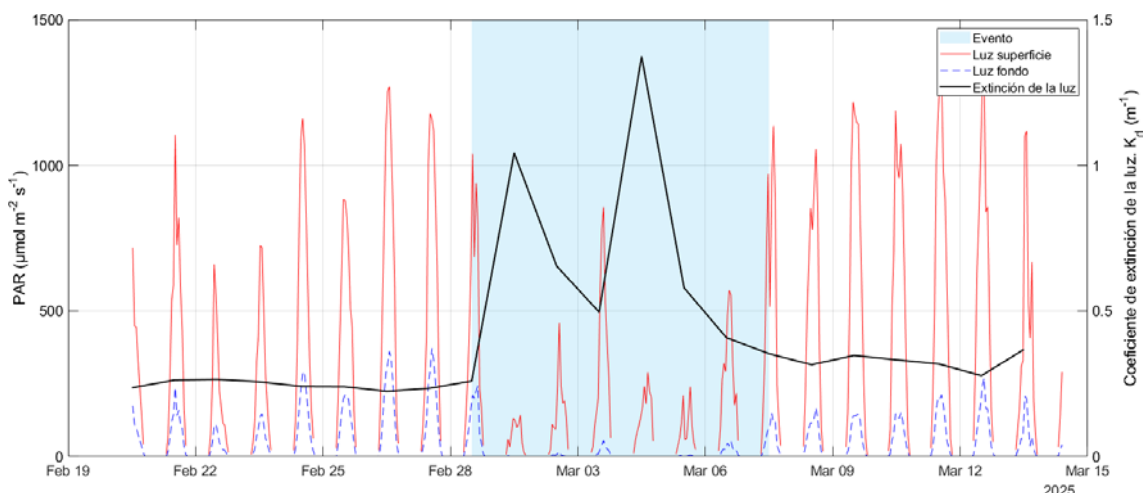


Figura 43. Luz PAR registrada en estación B en agua superficial y en el fondo (0.5 m y 6 m), y el coeficiente de extinción de la luz (K_d).

Estratificación de la columna de agua

Durante el transcurso completo del intenso periodo de lluvias, se realizó un seguimiento a tiempo real de lo acontecido en las aguas del Mar Menor a través del sistema de monitorización oceanográfica. Sin embargo, tras finalizar el evento, el equipo del proyecto BELICH realizó un muestreo *in situ* (12 marzo 2025) a fin de caracterizar el perfil físico-químico completo de la columna de agua del Mar Menor en las localidades de estudio A, B, C y M, mediante el uso de una sonda multiparamétrica modelo JFE AAQ176. Los resultados se muestran en la Figura 44.

El principal objetivo de tal muestreo, y los subsiguientes que se realizaran para evaluar los efectos a largo plazo de las lluvias, es detectar cualquier indicio de estratificación en la columna de agua del Mar Menor, así como la aparición de un potencial *bloom* fitoplanctónico que amenacen la integridad ecológica de la laguna.

En los perfiles colectados durante el muestreo *in situ* no se observó ningún indicio de estratificación en la columna de agua en ninguna de las variables de interés en este tipo de procesos, como son la temperatura o la salinidad (Figura 44A-B). Así mismo los niveles de

oxígeno, clorofila y turbidez (Figura 44C-E) registraron valores dentro de la normalidad y en concordancia con los observado en los muestreos previos, lo que dispuso cualquier indicio de alarma.

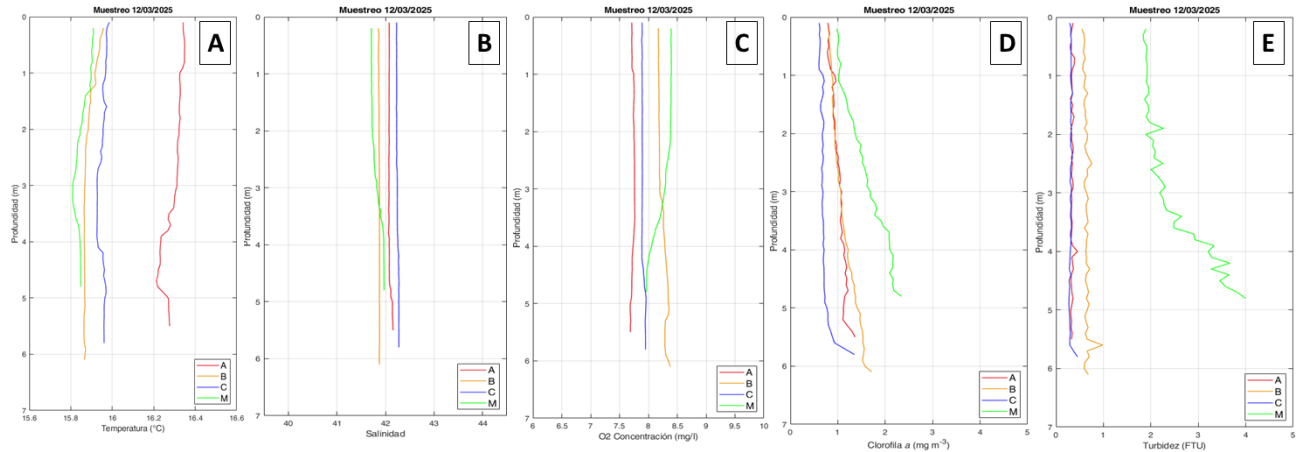


Figura 44. Perfiles verticales de temperatura (A), salinidad (B), concentración de oxígeno (C), clorofila a (D) y turbidez (E) en la columna de agua del Mar Menor en las estaciones A, B, C y M (Figura 17) obtenidos durante el muestreo in situ realizado el 12 marzo de 2025.