

Informe de actualización de resultados del programa de monitorización y estudio del Mar Menor de febrero de 2023



Fotografía: Javier Murcia Requena.

PROGRAMA DE SEGUIMIENTO Y ESTUDIO DEL ESTADO DEL MAR MENOR (proyecto BELICH)

Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC)

NOTA: Los datos presentados y su interpretación deben ponerse en el contexto de informes anteriores disponibles en las páginas web del IEO-CSIC (http://www.ieo.es/es_ES/web/ieo/mar-menor) y del MITECO (<https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/mar-menor/mejora-conocimiento/>).

Queda absolutamente prohibida la publicación de los datos contenidos en este informe sin el consentimiento previo de los autores y de IEO-CSIC.

Fuentes de Financiación:

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

Equipo de trabajo IEO-CSIC:

Dirección y coordinación: Juan M. Ruiz, CO Murcia.

Eugenio Fraile Nuez, CO Canarias (Investigador responsable del GP3 de BELICH)

Marijn Oosterbaan, CO Canarias (contratado DMMEM)

Patricia Pérez Tórtola, CO Murcia (contratada DMMEM)

Rocío García Muñoz, CO Murcia

Pedro Clemente Navarro Martínez, CO Murcia (becario predoctoral Universidad de Murcia)

Judit Jiménez Casero, CO Murcia (becaria predoctoral Universidad de Alicante)

Colaboradores:

José María Cecilia, Universidad Politécnica de Valencia e IP del WP2 del proyecto SMARTLAGOON.

Este informe debe citarse de la siguiente forma:

IEO-CSIC. 2023. Informe de actualización de resultados del programa de monitorización y estudio del Mar Menor de febrero de 2023. IEO-CSIC. http://www.ieo.es/es_ES/web/ieo/mar-menor.

Tambien descargable desde: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/mar-menor/mejora-conocimiento/>

Índice

1. ANTECEDENTES Y OBJETO DEL INFORME	4
<i>Boya piloto de monitorización SMARTLAGOON.....</i>	<i>5</i>
2. CAMPO DE TEMPERATURA DEL MAR MENOR	7
<i>Muestreos in situ (ubicaciones A, B y C, Figura 1).....</i>	<i>7</i>
<i>Serie temporal de temperatura de la boyas de monitorización (SMLG).....</i>	<i>6</i>
<i>Campo de Temperatura superficial del Mar Menor - SST (datos satelitales).....</i>	<i>100</i>
3. CAMPO DE SALINIDAD DEL MAR MENOR.....	144
<i>Muestreos in situ (ubicaciones A, B y C, Figura 1).....</i>	<i>144</i>
4. CLOROFILA A Y EXTINCIÓN DE LA LUZ	155
<i>Muestreos in situ (ubicaciones A, B y C, Figura 1).....</i>	<i>155</i>
<i>Serie temporal de turbidez y extinción de la luz de la boyas de monitorización (SMLG).....</i>	<i>19</i>
<i>Series temporales de Clorofila a del Mar Menor (datos satelitales).....</i>	<i>200</i>
5. CAMPO DE OXÍGENO DISUELTO Y pH DEL MAR MENOR	211
<i>Muestreos in situ (ubicaciones A, B y C, Figura 1).....</i>	<i>211</i>
6. Síntesis y consideraciones finales.....	26
7. Anexo.....	28

1. Antecedentes y objeto del informe

El último informe emitido data del 22 de septiembre de 2022, con los datos del programa de monitorización del IEO-CSIC, correspondiente al proyecto DMMEM. A partir del 2023, estas actividades de monitorización se enmarcan en el proyecto BELICH, financiado por el Marco de Actuaciones Prioritarias para la recuperación del Mar Menor (MAPMM) del MITERD. Como novedad, en 2023 se ha duplicado la frecuencia de muestreo para las variables básicas, pasando de 1/mes a 1/15días. Igualmente, a partir de 2023 se incorporan en estos informes los datos obtenidos con la boya oceanográfica piloto diseñada, desarrollada e instalada por la Universitat Politècnica de València (UPV), Uppsala University y la empresa VIELCA Ingenieros, S.A. en el contexto del proyecto europeo SMARTLAGOON (Grant Agreement Nº 101017861). Esta boya oceanográfica está contemplada como boya piloto del sistema de monitorización planteado en BELCICH en la Tarea 1.1 permitiendo establecer las bases para el mantenimiento, gestión y control del sistema completo de observación oceanográfica planteado en dicha tarea y en la subactuación 8.1 del MAPMM. Es, por tanto, que la tarea 1.1 de BELICH incluye el mantenimiento de esta boya piloto y el control de la calidad de los datos obtenidos de la misma.

El presente informe tiene como objetivo la actualización de los datos obtenidos desde entonces, tanto a partir de los muestreos mensuales (ahora quincenales) en las estaciones monitorizadas desde 2016, como a partir de la boya piloto SMARTLAGOON, instalada precisamente el 14 de octubre de 2022 (ver Figura 1). El informe contiene toda esta información, junto con algunos análisis realizados empleando datos satelitales de temperatura (SST) y de fluorescencia (Clorofila-a). Se muestran e interpretan los datos de un conjunto básico de variables como: temperatura, salinidad, clorofila-a, turbidez (como Kd, coeficiente de extinción de la luz), oxígeno disuelto y pH en relación al estado ecológico del Mar Menor, tanto en el contexto actual (post-colapso - 2016-2023), como a largo plazo (escala temporal decadal), y en línea con los análisis realizados en informes anteriores. Se aportan además datos meteorológicos obtenidos por la boya piloto SMLG y otras fuentes complementarias (SIAM/IMIDA) (ver Anexo de este informe).



Figura 1: Ubicaciones de las estaciones de muestreo y de la boya piloto SMARTLAGOON. A partir de 13/01/2023 la ubicación de la estación B y de la boya coinciden.

Boya piloto SMARTLAGOON

La Figura 2 muestra la boyas de monitorización oceanográfica del proyecto SMARTLAGOON (a partir de ahora boyas piloto *SMLG*). Esta boyas ha sido diseñada para obtener datos de alta resolución a varias profundidades con la intención de identificar episodios de estratificación de la columna de agua. La boyas dispone de una unidad central de procesamiento (*Data Logger*) CR100x de *Campbell Scientific*, que registra y transmite datos de diferentes tipos de sensores en tiempo real mediante el uso de dos tecnologías de comunicaciones basadas en General Packet Radio Service (GPRS) y LoRa. En concreto, la UPV ha diseñado un protocolo de comunicaciones propietario basado en LoRa que permite el envío punto a punto desde la boyas al Centro Oceanográfico de Murcia del IEO-CSIC en San Pedro del Pinatar.



Figura 2: Boya piloto de monitorización SMARTLAGOON.

En la parte subaérea, la boyas de monitorización SMARTLAGOON tiene un sensor *E+E Elektronik EE181* que mide la temperatura y la humedad del aire, además de un anemómetro *RM Young Wind Sentry* para medir la velocidad del viento. La Figura 3 contiene un esquema de la boyas, así como la disposición en la vertical de cada uno de sus sensores.

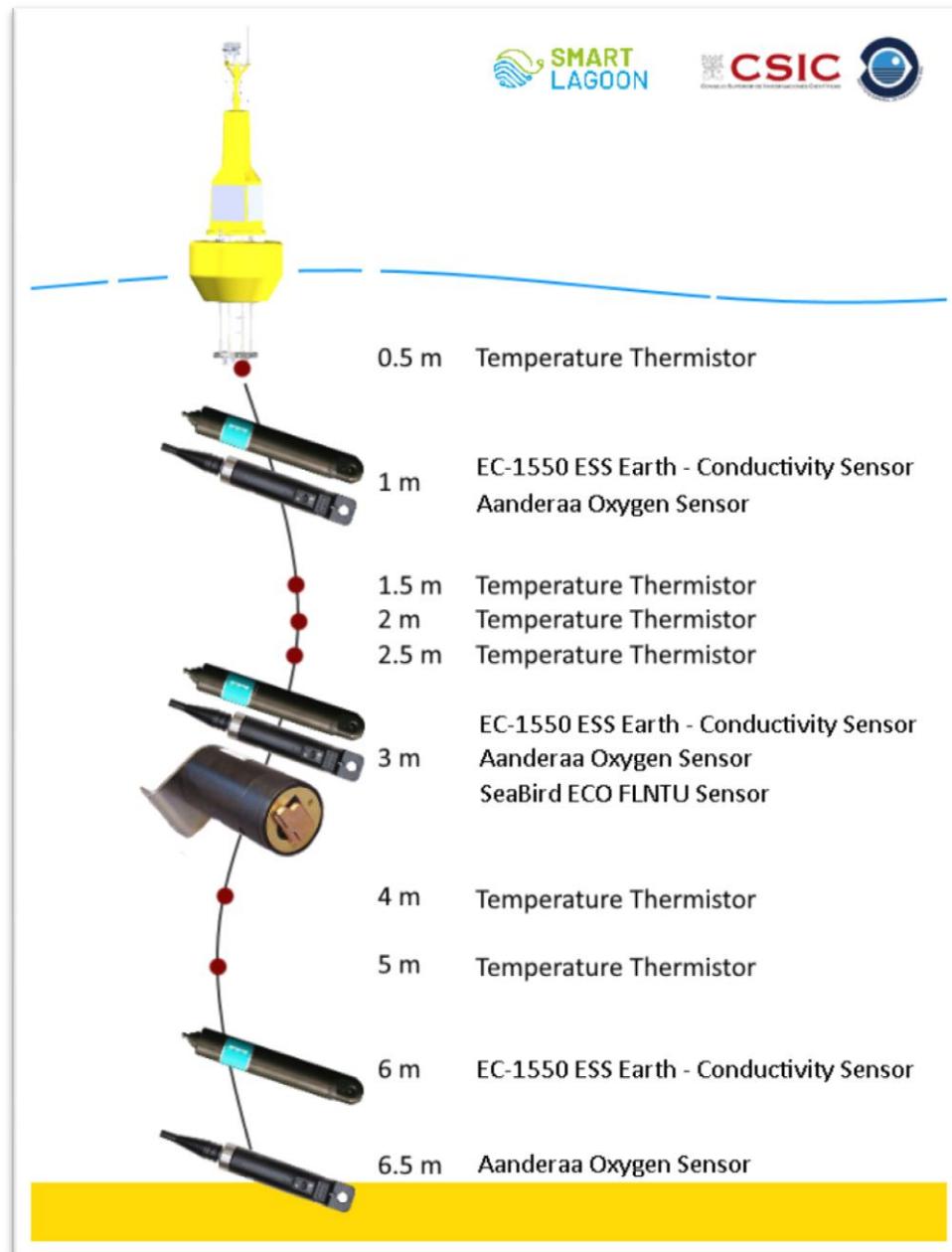


Figura 3: Esquema de los sensores instalados en la boya piloto SMARTLAGOON.

2. Campo de Temperatura del Mar Menor

La temperatura es un factor clave y decisivo en la dinámica del ecosistema lagunar, en particular en su estado actual, más vulnerable tanto a los efectos de los impactos antropogénicos locales como los relacionados con el cambio climático. Por ello, se está trabajando en diferentes y complementarias fuentes de datos que permitan conocer la variación espacio-temporal de esta variable con alta resolución, así como su tendencia a corto, medio y largo plazo. Dichas fuentes son las siguientes:

- 1.- Sensor sumergido a 1,5m: provee series temporales continuas de la variable *in situ* desde 2012.
- 2.- Muestreos *in situ* con sondas multiparamétricas (proyecto DMMEM; proyecto BELICH desde 2023): datos con frecuencia mensual/quincenal desde 2016
- 3.- Perfiles verticales con CTD desde octubre de 2022 (proyecto BELICH)
- 4.-Sensores boyas SMLG: provee datos de temperatura a diferentes profundidades en continuo y tiempo casi-real a diferentes profundidades desde octubre de 2022.
- 5.- Datos satelitales: incrementa la resolución espacial y temporal de las series generadas.

Muestreos *in situ*¹

La figura 4 muestra la serie temporal completa de las temperaturas medias obtenidas durante el transcurso del proyecto DMMEM. Se puede observar un patrón estacional normal con temperaturas mínimas en invierno [10-14°C] y máximas en verano [28-30°C] (más información en la Tabla 1). Algunos aspectos relevantes de la serie temporal, muestran que el invierno de 2023 ha sido considerablemente más frío que el invierno anterior (2022), con una diferencia de -1.5°C, alcanzando temperaturas mínimas alrededor de los 10.6°C.

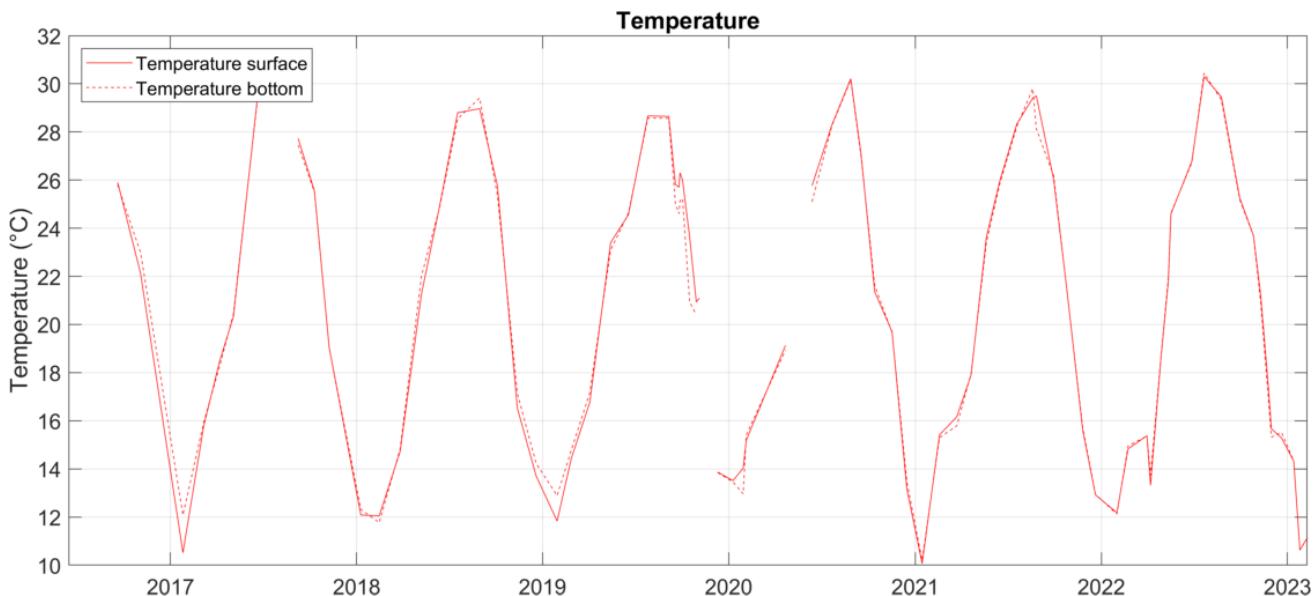


Figura 4: Serie temporal de la temperatura media superficial (línea continua) y temperatura media del fondo (línea discontinua) durante los muestreos *in situ* del proyecto DMMEM en

¹ (ubicaciones A, B y C, Figura 1)

las posiciones A, B y C (ver Figura 1).

Tabla 1: Valores mínimos y máximos de temperatura medidos durante los muestreos cada año.

Temperatura Muestreo (°C)		Superficie				Fondo			
Año	Estación	Mean	Std	Min	Max	Mean	Std	Min	Max
2016	Invierno	---	---	---	---	---	---	---	---
	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---
	Verano	25.9	0.0	25.9	25.9	25.8	0.0	25.8	25.8
	Otoño	22.1	0.0	22.1	22.1	23.0	0.0	23.0	23.0
	Anual	25.2	2.8	22.1	27.5	25.5	2.4	23.0	27.8
2017	Invierno	13.2	3.7	10.5	15.8	14.0	2.7	12.1	16.0
	Primavera	22.9	6.1	18.5	29.8	22.8	6.1	18.3	29.7
	Verano	29.1	1.9	27.7	30.4	29.0	2.1	27.5	30.5
	Otoño	22.3	4.6	19.0	25.5	22.3	4.6	19.0	25.5
	Anual	22.0	6.8	10.5	30.4	22.1	6.5	12.1	30.5
2018	Invierno	13.0	1.5	12.1	14.7	13.0	1.6	11.8	14.8
	Primavera	23.1	2.5	21.3	24.9	23.4	2.0	22.0	24.8
	Verano	28.9	0.1	28.8	29.0	29.0	0.6	28.5	29.4
	Otoño	18.7	6.3	13.7	25.8	18.9	5.8	14.2	25.4
	Anual	19.9	6.8	12.1	29.0	20.0	6.8	11.8	29.4
2019	Invierno	13.1	1.8	11.8	14.4	13.8	1.3	12.9	14.8
	Primavera	21.6	4.2	16.8	24.6	21.6	3.9	17.2	24.6
	Verano	27.0	1.5	25.7	28.7	26.4	2.0	24.6	28.6
	Otoño	21.1	4.5	13.9	26.0	20.1	4.7	13.8	25.2
	Anual	22.1	5.5	11.8	28.7	21.8	5.3	12.9	28.6
2020	Invierno	14.2	0.9	13.5	15.2	13.9	1.3	13.0	15.4
	Primavera	22.5	4.7	19.1	25.8	22.0	4.4	18.9	25.1
	Verano	28.5	1.6	27.1	30.2	28.5	1.6	27.0	30.2
	Otoño	18.1	4.3	13.2	21.4	18.3	4.2	13.5	21.6
	Anual	20.7	6.3	13.2	30.2	20.6	6.3	13.0	30.2
2021	Invierno	13.9	3.3	10.1	16.2	13.8	3.1	10.2	15.8
	Primavera	22.5	4.1	17.9	25.9	22.4	4.0	18.0	25.8
	Verano	28.3	1.6	26.0	29.5	28.1	1.5	26.2	29.8
	Otoño	16.7	4.4	12.9	21.4	16.7	4.3	12.9	21.4
	Anual	20.9	6.7	10.1	29.5	20.8	6.5	10.2	29.8
2022	Invierno	14.1	1.7	12.2	15.4	14.1	1.8	12.1	15.4
	Primavera	21.0	5.3	13.3	26.8	21.1	5.1	13.7	26.7
	Verano	28.3	2.7	25.3	30.3	28.3	2.8	25.2	30.4
	Otoño	18.7	3.7	15.3	23.7	18.5	3.7	15.3	23.7
	Anual	20.4	5.8	12.2	30.3	20.3	5.8	12.1	30.4
2023	Invierno	12.4	1.8	10.6	14.3	12.3	1.7	10.6	14.3
	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---
	Verano	---	---	---	---	---	---	---	---
	Otoño	---	---	---	---	---	---	---	---
	Anual	---	---	---	---	---	---	---	---

Desde octubre de 2022, y con el objetivo de realizar calibraciones y ajustes de deriva de los sensores de la boyas piloto SMLG, se vienen realizado, en la ubicación B (justo al lado de esta boyas), perfiles verticales de conductividad y temperatura con la presión, utilizando un CTD AAQ-RINKO modelo AAQ176. Los resultados de las calibraciones pueden ser consultados en las Figuras 1, 2 y 3 del Anexo de este informe.

Serie temporal de temperatura de la boyas piloto SMLG.

Debido a la reciente instalación de la boyas piloto SMLG en el Mar Menor, los datos suministrados por sus sensores son aún de corta duración, lo que limita en esta fase inicial del proyecto su interpretación y resultados en conjunto. Sin embargo, la corta serie temporal de datos de temperatura (Figura 5) ya muestra algunos procesos interesantes, como el ligero calentamiento de las capas muy superficiales (0.5 metros de profundidad) durante ciertos días (días soleados). Tanto a mitad de noviembre del 2022 como a mitad de enero de 2023, la serie muestra importantes disminuciones de la temperatura en toda la columna de agua, con una anomalía térmica de hasta -2.5°C. La segunda de ellas, segunda mitad de enero de 2023, coincidió con el final de una larga ola de calor (en relación a la temperatura media histórica del mismo mes), como se explicará más adelante en este capítulo.



Figura 5: Serie temporal de temperatura obtenida a cada profundidad por los sensores de la boyas piloto SMLG, calibrados con los datos de CTD obtenidos por el IEO-CSIC.

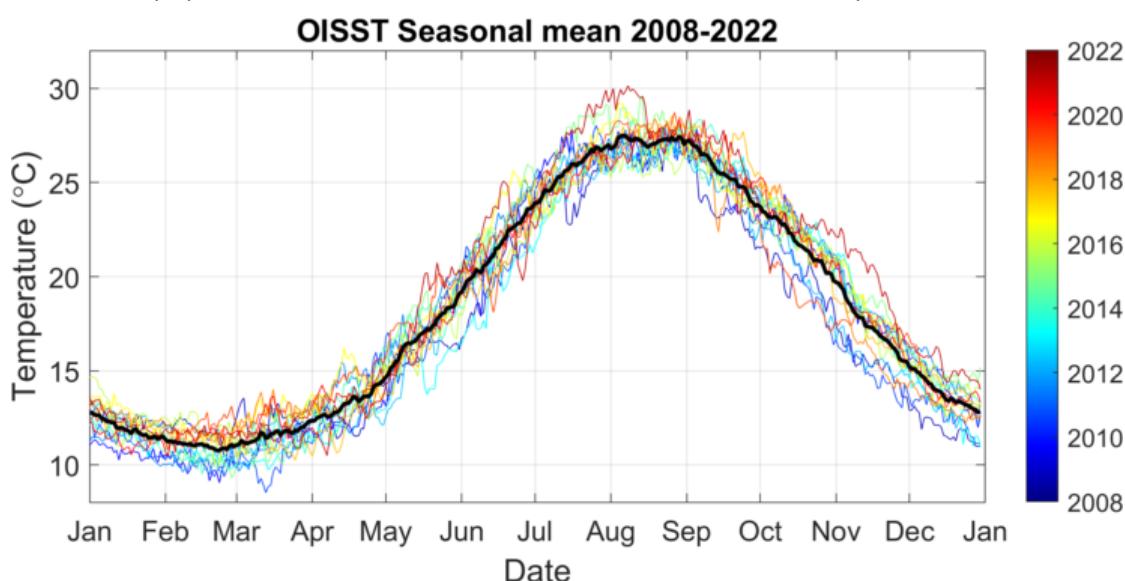


Figura 6: Ciclos estacionales de la temperatura superficial del Mar Menor de los últimos 15 años.

Campo de Temperatura superficial del Mar Menor - SST (datos satelitales)

Con el fin de hacer uso de todas las herramientas disponibles para el control y estudio del Mar Menor, se han estudiado los datos de temperatura superficial del mar (SST) obtenidos a partir de imágenes satelitales para toda la laguna del Mar Menor. La Figura 6 muestra los ciclos estacionales de la SST del Mar Menor durante los últimos 15 años (2008-2022) a partir de datos de satélite de alta resolución espacial [1km x 1km] de la "Mediterranean Sea Ultra High Resolution SST L4 Analysis" (Buongiorno Nardelli et al., 2013). Los datos satelitales han sido calibrados con los datos de temperatura superficial de la boya piloto *SMLG* (Anexo Figura 4).

La Figura 6 muestra claramente como los años más recientes (2018-2022) (rojos-naranjas) han sido más cálidos que los primeros años de la serie temporal (2008-2017) (azules-verdes) y por lo tanto, están por encima/por debajo de la media estacional (negro), respectivamente.

La Figura 7 muestra los datos de temperatura superficial del mar para todo el Mar Menor, SST (azul), así como la tendencia de calentamiento del Mar Menor durante los últimos 15 años (2008-2022). Se aprecia claramente como desde el año 2008, existe una significativa tendencia positiva de calentamiento superficial de las aguas del Mar Menor a una tasa de +0.08°C por año.

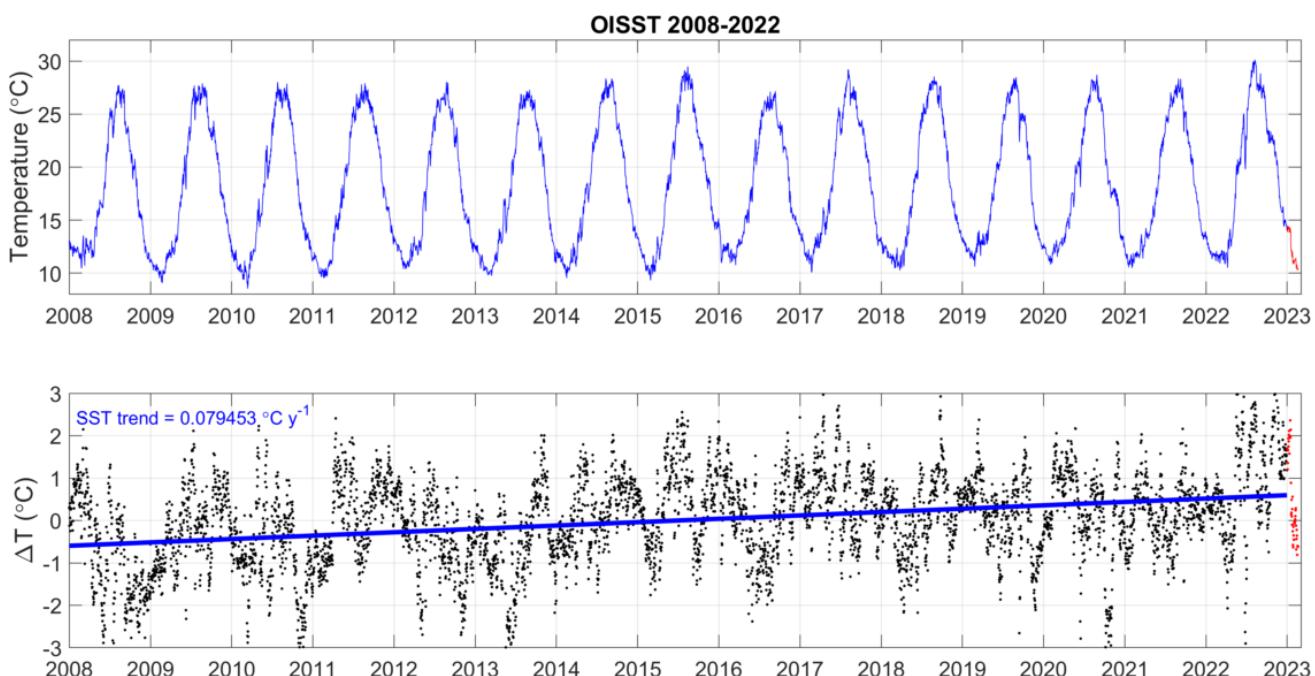


Figura 7: Serie temporal de la temperatura superficial del Mar Menor con datos satelitales desde 2008 – hoy (panel superior). Tendencia de la serie temporal de temperatura superficial del Mar Menor (panel inferior).

Se realizó un análisis de olas de calor utilizando datos satelitales desde 2008, calibrados con los obtenidos por la boya SMLG, de acuerdo con los criterios establecidos por Hobday et al. (2016). Durante los años 2016-17, cuando el Mar Menor sufrió dos episodios muy intensos de "sopa verde", tuvieron lugar varias olas de calor marinas (consultar informe de septiembre de 2021). En el año 2021, ocurrió un episodio de mortalidad de fauna masiva, aunque no se observó ninguna ola de calor extensiva, como se muestra en la Figura 8.

En el año 2022, aproximadamente un tercio de los días alcanzaron temperaturas de ola de calor, algunos de los cuales incluso se clasificaron como olas fuertes (Categoría II, *Strong*). Una vez que se dispongan de series temporales de temperatura más largas provenientes de nuestro sistema de monitorización del Mar Menor, boyas piloto SMLG y el resto de plataformas, se podrá realizar dicho estudio con datos de nuestros sensores, en lugar de con datos satelitales.

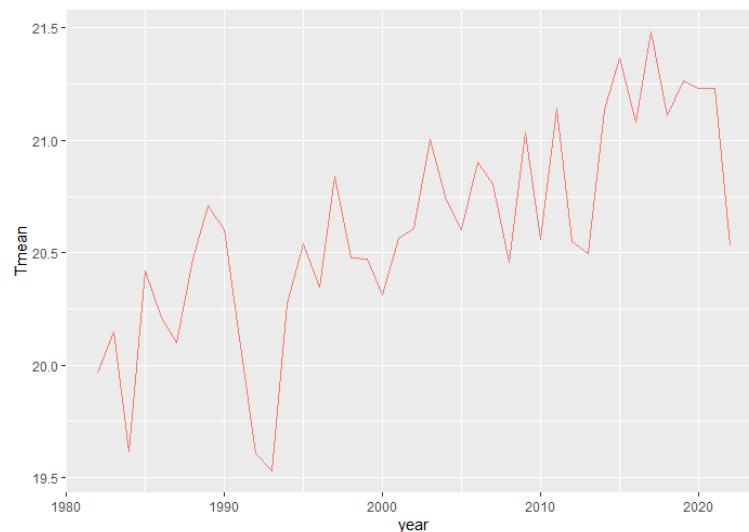
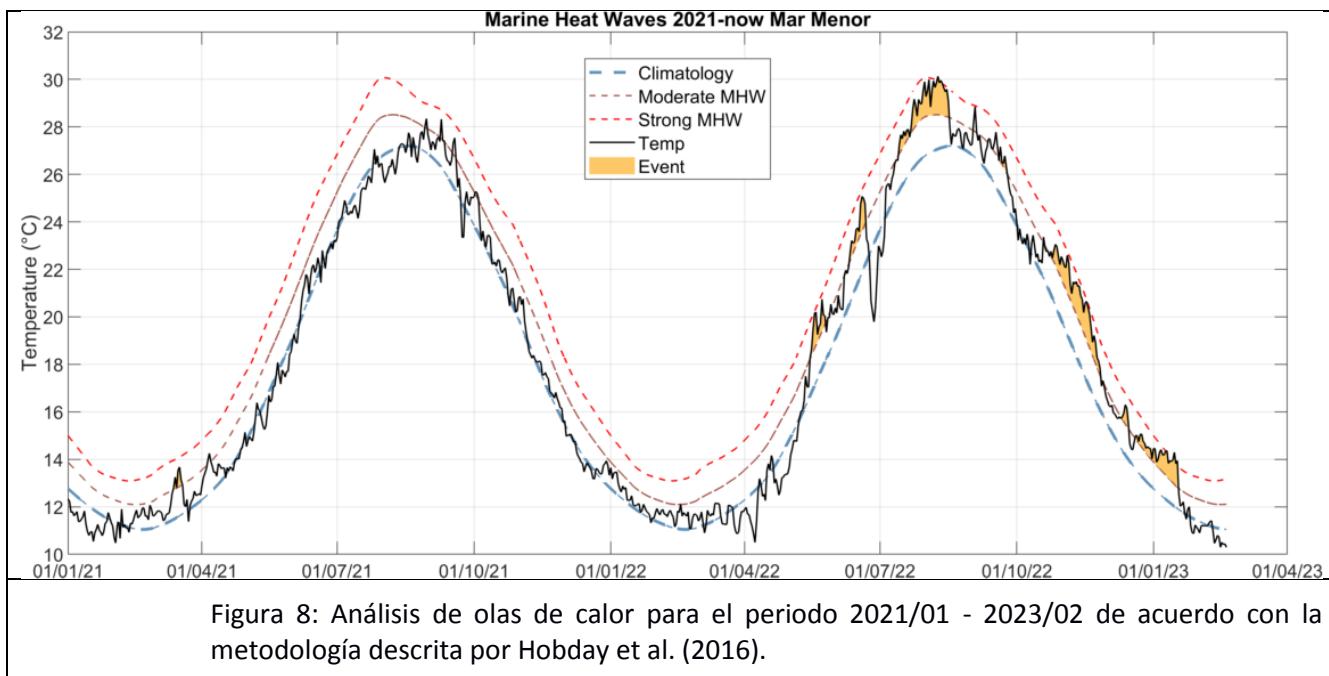


Figura 9. Temperatura media anual 1982-2022

Tabla 2. Resumen de los eventos de olas de calor (mhw) durante el periodo 1982 y 2022: número de olas de calor (nº de eventos), suma de días al año bajo mhw (días totales), intensidad media (I_{mean}) e intensidad acumulada (I_{cum}). Se han seleccionado cuatro categorías entre 0 y 1 tras estandarizar cada variable respecto a su valor máximo: en blanco [0 – 0,25), amarillo [0,25 – 0,50), naranja suave [0,50 – 0,75) y naranja fuerte [0,75 – 1].

Year	Events	Total days	I_{mean}	I_{cum}
1982	0	0	0,00	0,00
1983	1	11	1,61	17,74
1984	0	0	0,00	0,00
1985	1	25	1,98	49,48
1986	1	9	1,22	10,99
1987	0	0	0,00	0,00
1988	0	0	0,00	0,00
1989	1	5	1,23	6,13
1990	1	7	1,20	8,42
1991	1	20	2,01	40,19
1992	0	0	0,00	0,00
1993	0	0	0,00	0,00
1994	1	6	1,05	6,27
1995	1	5	1,48	7,40
1996	0	0	0,00	0,00
1997	5	43	1,70	69,35
1998	0	0	0,00	0,00
1999	1	9	1,36	12,26
2000	0	0	0,00	0,00
2001	0	0	0,00	0,00
2002	1	6	1,53	9,17
2003	2	35	1,94	65,59
2004	2	14	1,90	26,61
2005	3	25	1,94	47,17
2006	3	24	1,83	44,72
2007	1	6	1,55	9,33
2008	1	6	1,43	8,57
2009	1	17	2,27	38,53
2010	1	7	1,93	13,51
2011	2	16	1,74	26,93
2012	0	0	0,00	0,00
2013	1	5	1,57	7,84
2014	3	38	1,66	64,59
2015	6	89	1,91	173,78
2016	3	21	1,43	29,70
2017	6	71	1,74	133,91
2018	3	35	1,65	61,49
2019	4	45	1,74	78,11
2020	6	71	1,74	126,35
2021	4	23	1,48	33,99
2022	2	60	2,47	143,83

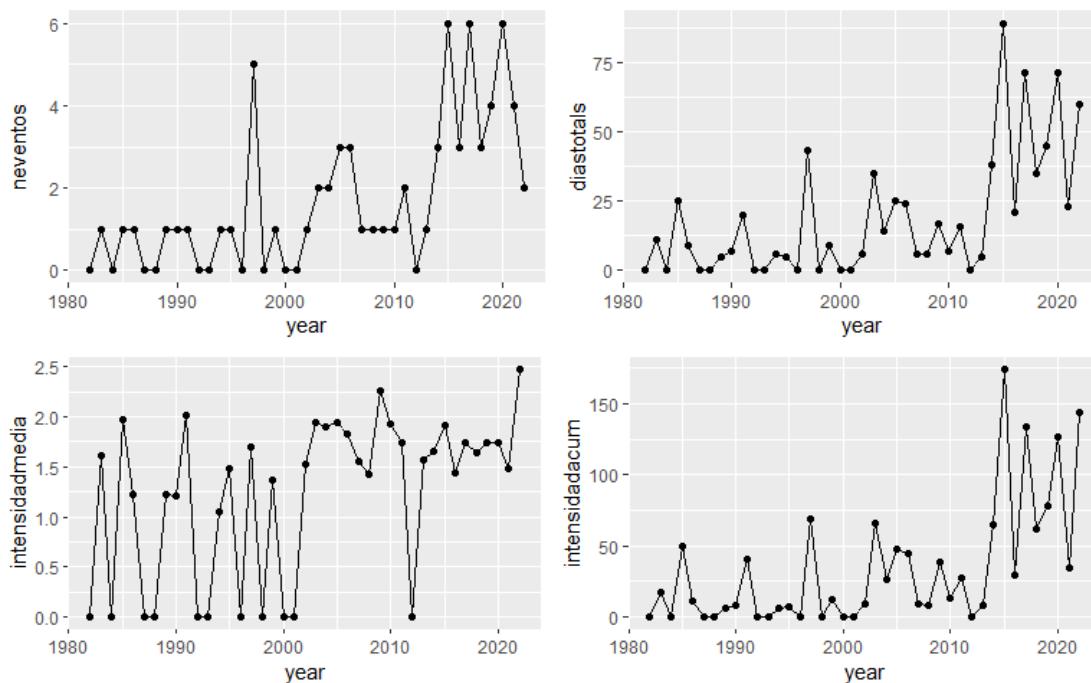


Figura 10. Desglose métricas mhw 1982-2022.

En línea con lo anterior, se ha realizado un segundo análisis de olas de calor a partir de otras series temporales de temperatura diaria a escala temporal más larga (periodo 1982-2022; ver Figuras 9 y 10 y Tabla 2), obtenidas a partir de los registros de temperatura superficial del agua (SST) de satélite disponibles en Copernicus Mediterranean Sea – High Resolution L4 Sea Surface Temperature Reprocessed 0.05 deg. resolution (<https://doi.org/10.48670/moi-00173>). Para mejorar la precisión de los datos, la serie temporal de SST fue calibrada con mediciones in situ de temperatura a través de sensores Hobo Water Temp Pro v2 colocados a 1-1.5m en el puerto de Lo Pagán. A esta serie temporal se ha aplicado también el análisis de olas de calor marinas (*mhw = marine heat waves*) basado en Hobday et al. (2016). Debido a la diferencia entre fuentes de datos los dos análisis de olas de calor realizadas pueden arrojar resultados diferentes, por lo que solo pueden emplearse para comparar años dentro de cada serie.

Se observa un claro aumento total del orden de 2 grados de la temperatura media del Mar Menor en las últimas tres décadas (ver Figura 12). Esta clara tendencia se debe tanto al incremento de olas de calor como de su intensidad y duración (ver Figura 13), especialmente a partir de 2014 (ver Tabla 2), cuando parece producirse un cambio brusco en la mencionada tendencia.

Estos resultados sugieren que el calentamiento del agua de la albufera se ha acelerado en los últimos años y, en combinación con el exceso de nutrientes, podría estar relacionado con los mecanismos disruptivos que han conducido al colapso ecosistémico y su actual estado alterado. Si esta tendencia persiste, teniendo en cuenta que el estado actual del ecosistema es más vulnerable, se podría estar llegando a los umbrales de tolerancia de ciertas especies a esta variable, lo que podría desencadenar nuevos episodios disruptivos a corto y medio plazo del ecosistema lagunar.

3. Campo de Salinidad del Mar Menor

Muestreos *in situ*

La Figura 51 combina la visualización de la serie temporal de la salinidad media (obtenida en puntos A, B y C; Figura 1), junto con los datos de precipitación diaria procedente de la estación meteorológica de San Javier Aeropuerto (AEMET). A los datos de precipitación se le aplicó una media móvil de una semana para ilustrar el patrón temporal de lluvia en el periodo considerado. La salinidad se mantiene en los mismos rangos que los observados tras los intensos eventos (DANA) que tuvieron lugar en 2019 y principios de 2020, no superando el valor de 43.2 (ver Tabla 2). A ello parecen contribuir los no tan intensos, pero muy frecuentes eventos de lluvias ocurridos a partir de 2021. En comparación, la tendencia plurianual de esta variable si mostró una recuperación a valores medios superiores a 45 tras las lluvias torrenciales de 2017, pero en estos años el régimen de precipitaciones fue considerablemente menos intenso que el del periodo 2021-2023. A pesar de todo, los datos de salinidad de superficie y fondo mostrados en la Figura 51 no reflejan, en el periodo 2021-23, ningún tipo de estratificación halina (ver Tabla 2).

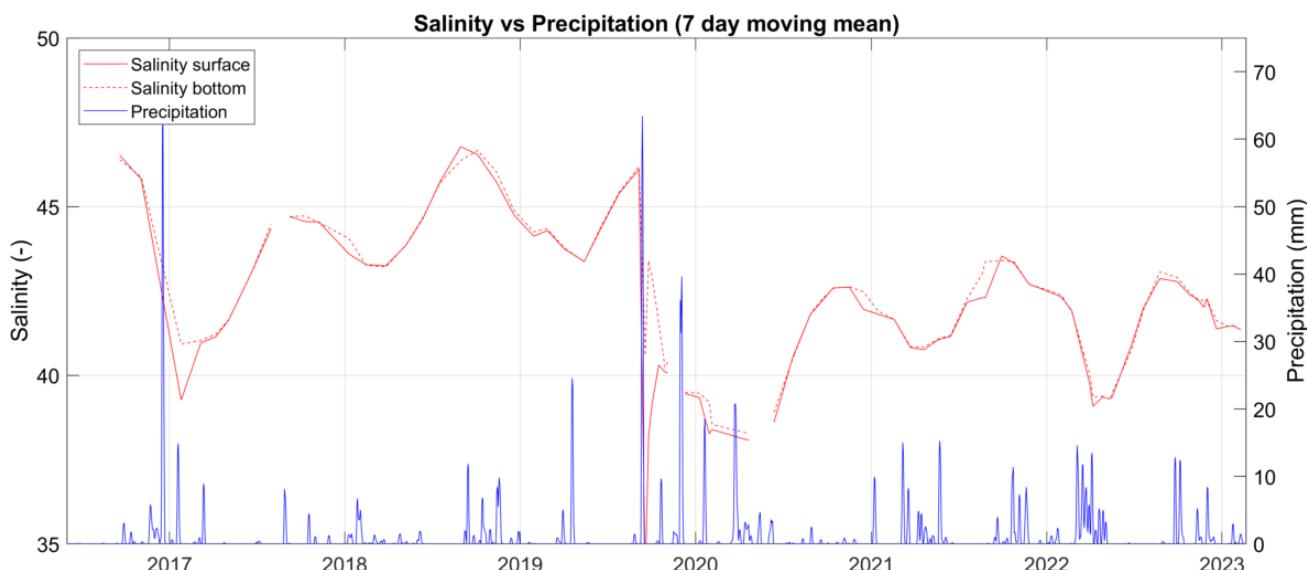


Figura 51: Serie temporal de la salinidad promedio en superficie (rojo continuo) y fondo (rojo discontinuo) en las posiciones A, B y C de los muestreos del proyecto DMMEM. Datos de precipitación en el aeropuerto de San Javier obtenidos de la AEMET (azul).

Tabla 2: Valores mínimos y máximos de salinidad medidos durante los muestreos cada año.

Salinidad Muestreo (-)		Superficie				Fondo			
Año	Estación	Mean	Std	Min	Max	Mean	Std	Min	Max
2016	Invierno	---	---	---	---	---	---	---	---
	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---
	Verano	46.5	0.0	46.5	46.5	46.4	0.0	46.4	46.4
	Otoño	45.8	0.0	45.8	45.8	45.9	0.0	45.9	45.9
	Anual	45.3	1.5	43.6	46.5	45.3	1.5	43.6	46.4
2017	Invierno	40.1	1.2	39.3	41.0	41.0	0.1	40.9	41.0
	Primavera	42.0	1.0	41.1	43.1	42.0	1.0	41.2	43.1

	Verano	44.5	0.3	44.3	44.7	44.6	0.2	44.5	44.7
	Otoño	44.6	0.0	44.5	44.6	44.6	0.1	44.5	44.7
	Anual	42.7	2.0	39.3	44.7	42.9	1.7	40.9	44.7
2018	Invierno	43.4	0.2	43.2	43.6	43.5	0.5	43.2	44.1
	Primavera	44.2	0.6	43.9	44.6	44.3	0.6	43.9	44.7
	Verano	46.3	0.7	45.7	46.8	46.0	0.5	45.7	46.4
	Otoño	45.7	0.9	44.7	46.5	45.9	0.9	44.9	46.7
	Anual	44.8	1.3	43.2	46.8	44.9	1.3	43.2	46.7
2019	Invierno	44.2	0.1	44.1	44.3	44.3	0.1	44.3	44.3
	Primavera	43.8	0.5	43.4	44.4	43.8	0.5	43.4	44.4
	Verano	40.4	5.2	33.9	46.1	43.8	2.2	40.6	46.2
	Otoño	39.8	0.5	39.1	40.3	40.9	1.3	39.5	42.9
	Anual	41.4	3.4	33.9	46.1	42.9	2.0	39.5	46.2
2020	Invierno	38.7	0.6	38.3	39.3	39.1	0.5	38.5	39.5
	Primavera	38.3	0.4	38.1	38.6	38.6	0.4	38.3	38.9
	Verano	41.5	0.8	40.5	42.1	41.5	0.9	40.5	42.2
	Otoño	42.4	0.4	42.0	42.6	42.6	0.1	42.5	42.6
	Anual	40.4	1.9	38.1	42.6	40.6	1.8	38.3	42.6
2021	Invierno	41.4	0.5	40.8	41.8	41.5	0.6	40.8	41.9
	Primavera	41.0	0.2	40.8	41.2	41.0	0.2	40.8	41.2
	Verano	42.6	0.6	42.2	43.5	43.0	0.5	42.3	43.4
	Otoño	42.9	0.4	42.6	43.3	42.9	0.4	42.6	43.4
	Anual	42.0	0.9	40.8	43.5	42.2	1.0	40.8	43.4
2022	Invierno	41.3	1.4	39.8	42.3	41.4	1.2	40.0	42.4
	Primavera	39.6	0.8	39.1	40.9	39.7	0.6	39.3	40.8
	Verano	42.5	0.5	42.0	42.9	42.6	0.6	41.9	43.1
	Otoño	42.1	0.4	41.4	42.4	42.2	0.4	41.6	42.6
	Anual	41.2	1.4	39.1	42.9	41.4	1.4	39.3	43.1
2023	Invierno	41.4	0.1	41.2	41.5	41.4	0.1	41.3	41.5
	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---
	Verano	---	---	---	---	---	---	---	---
	Otoño	---	---	---	---	---	---	---	---
	Anual	---	---	---	---	---	---	---	---

4. Clorofila α y Extinción de la luz

Muestreos in situ

La clorofila α es una variable indicadora de la abundancia y dinámica de la comunidad fitoplanctónica en la columna de agua. Desde mayo 2016 se toman muestras de agua (en estaciones A, B y C; Figura 1) en las que se mide la concentración de Clorofila α en el laboratorio del IEO-COMU mediante métodos analíticos por espectrofotometría (proyecto DMMEM; proyecto BELICH desde 2023). A partir de 2023 esta variable se determina también a partir de un sensor de fluorescencia de un CTD del equipo del IEO-COMU, calibrado con las mediciones *in situ*. La turbidez de la columna de agua se estima como coeficiente de extinción de la luz (Kd), a partir de valores de irradiancia PAR obtenidos mediante un fotómetro LiCor sumergible, tanto en superficie como en el fondo.

En 2022, la concentración de clorofila *a* ha mostrado un comportamiento bastante variable en la laguna del Mar Menor, alcanzando sus valores medios² niveles de 5 mg/m³ en diferentes momentos (p.e. abril y mayo de 2022; Figura 62). Estos valores medios máximos se alcanzan siempre en la parte central y sur de la laguna, mientras que en la parte norte se han mantenido siempre por debajo de 2.9 mg/m³. En la cubeta sur la tendencia de esta variable fue claramente ascendente hasta mayo, con un incremento neto de 3.6 veces respecto a la media de enero de 2022, pero esta dinámica ascendente se truncó drásticamente en junio, donde se registran valores medios similares a los de enero (0.74-0.88 mg/m³). A finales de septiembre se ha registrado un leve incremento en esta zona hasta valores medios entorno a 1.5 mg/m³.

En general, los valores medios mensuales observados en este último periodo son similares a los reportados en meses de años anteriores en los que no se produjo *bloom* fitoplanctónico (p.ej. 2018 y 2020). Desde otoño de 2022 los valores medios han descendido gradualmente en toda la laguna y se encuentran estabilizados por debajo de valores medios mensuales de 1 mg/m³.

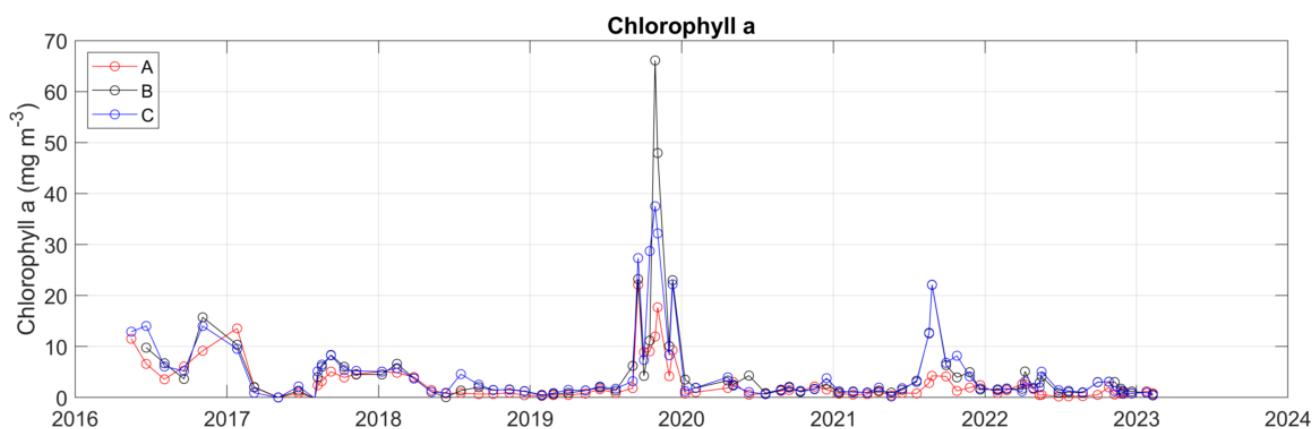


Figura 62: Serie temporal de Clorofila *a* de los muestreos del proyecto DMMEM en las ubicaciones A, B y C de la Laguna del Mar Menor.

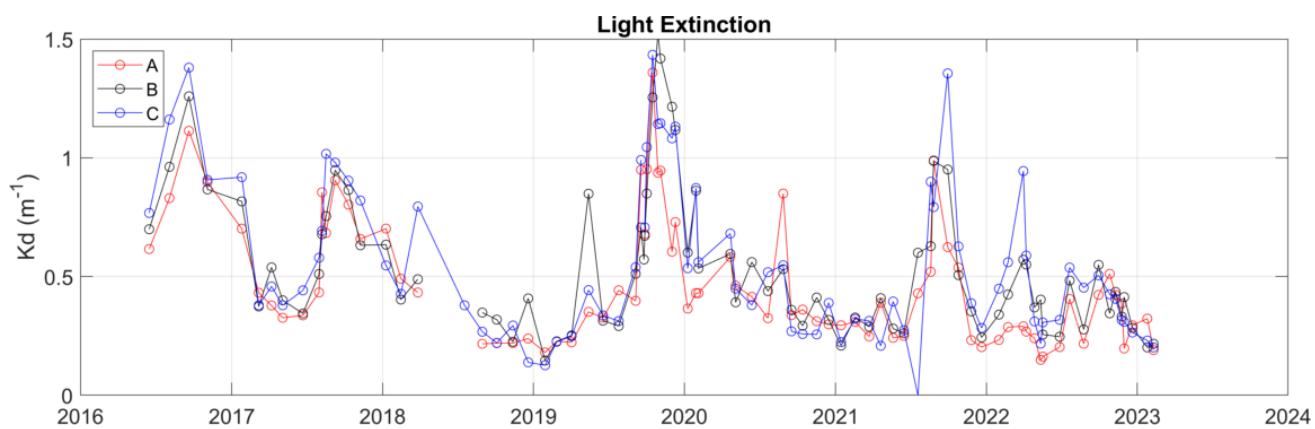


Figura 73: Serie temporal completa de la extinción de la luz para los muestreos del proyecto DMMEM en las ubicaciones A, B y C.

² Hace referencia a la media muestral, es decir, la obtenida en un sitio y evento de muestreo determinados.

La turbidez de la columna de agua, deducida a partir del coeficiente de extinción de la luz, o K_d (ver Figura 73) muestra una dinámica general similar a la clorofila a , pero con una variabilidad distinta (ver Tabla 3). Si bien los máximos de clorofila a se mantienen por debajo de los observados en eventos anteriores de la serie temporal, los máximos de turbidez alcanzan valores medios muy elevados en toda la laguna y propios de aguas turbias (0.5 m^{-1}), muy similar en magnitud al registrado durante el *bloom* fitoplanctónico de verano de 2021. Este estado altamente fluctuante de la turbidez del agua puede responder a múltiples factores, no quedando limitado a las precipitaciones o la propia evolución de la concentración de clorofila a , como se muestra en las series temporales obtenidas por los sensores de la boya piloto SMLG (ver Figura 86). Esto indica que otros factores que afectan a las propiedades ópticas de la columna de agua deben estar implicados (p.ej. material particulado, tanto orgánico como inorgánico; procesos de degradación de la materia orgánica, etc.).

Entender e interpretar el desacoplamiento entre la clorofila a y la turbidez de la columna de agua no es algo trivial, siendo clave para entender los factores que gobiernan la transparencia de la columna de agua a escala lagunar, que a su vez determina la disponibilidad de luz para los productores primarios, tanto planctónicos como bentónicos. Entre otros factores y procesos, dicho desacoplamiento podría explicarse por cambios en la dominancia de los diferentes grupos taxonómicos y funcionales del fitoplancton, o por la propia descomposición de la biomasa fitoplanctónica y de los macrófitos y/o por la proliferación de componentes microbianos y zooplanctónicos no fotosintéticos. Todo esto da una idea de la complejidad de los procesos implicados y de la dificultad de la interpretación de los indicadores empleados. **Unos valores bajos de clorofila a (y de turbidez) no significan que los procesos de eutrofización de la laguna no estén operando, por lo que hay que ser muy cauto a la hora de diagnosticar el estado del ecosistema lagunar en base a variables como las concentraciones de clorofila a o la transparencia del agua.**

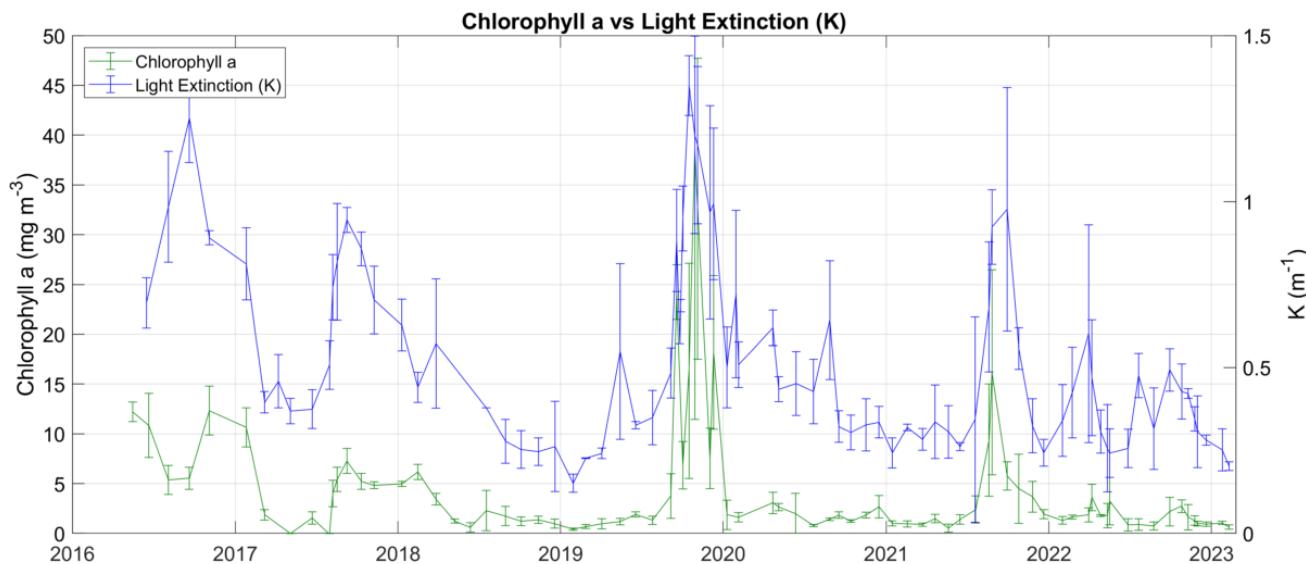


Figura 84: Comparación de las series temporales de clorofila a y de extinción de la luz promedio de las ubicaciones A, B y C de la laguna del Mar Menor.

Coincidiendo con los máximos de turbidez de 2021 y 2022, se han registrado varios episodios en los que los valores medios de irradiancia PAR en el fondo (4m como profundidad promedio) han sido muy próximos a los niveles críticos para el crecimiento fotosintético de los macrófitos bentónicos (11%-5% respecto a la irradiancia superficial, %lo; ver Figura 15). Este resultado contribuiría a explicar la ausencia de síntomas de recuperación de las

praderas de la angiosperma marina *Cymodocea nodosa* en el Mar Menor, tras el colapso de las comunidades vegetales bentónicas en 2016.

Tabla 3: Valores mínimos y máximos de clorofila *a* y extinción de la luz medidos durante los muestreos cada año.

4m profundidad		Clorofila <i>a</i> (mg/m ³)				Extinción de luz Kd (m ⁻¹)			
Año	Estación	Mean	Std	Min	Max	Mean	Std	Min	Max
2016	Invierno	---	---	---	---	---	---	---	---
	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---
	Verano	5.46	0.11	5.38	5.54	1.12	0.19	0.98	1.25
	Otoño	12.33	0.00	12.33	12.33	0.89	0.00	0.89	0.89
	Anual	9.26	3.52	5.38	12.33	0.95	0.23	0.69	1.25
2017	Invierno	6.24	6.20	1.86	10.63	0.60	0.30	0.39	0.81
	Primavera	0.77	1.10	0.00	1.55	0.40	0.05	0.37	0.46
	Verano	4.15	3.13	0.00	7.27	0.75	0.18	0.51	0.94
	Otoño	5.02	0.28	4.83	5.22	0.78	0.11	0.70	0.86
	Anual	4.07	3.37	0.00	10.63	0.63	0.22	0.37	0.94
2018	Invierno	4.86	1.36	3.45	6.16	0.55	0.10	0.44	0.63
	Primavera	0.92	0.44	0.61	1.23				
	Verano	2.01	0.39	1.74	2.29	0.33	0.07	0.28	0.38
	Otoño	1.18	0.19	0.98	1.35	0.25	0.01	0.25	0.26
	Anual	2.40	1.87	0.61	6.16	0.38	0.15	0.25	0.63
2019	Invierno	0.55	0.18	0.42	0.69	0.19	0.05	0.15	0.23
	Primavera	1.36	0.49	0.97	1.91	0.37	0.16	0.24	0.55
	Verano	9.77	12.59	1.31	24.24	0.59	0.20	0.35	0.88
	Otoño	20.00	13.02	6.84	38.52	1.10	0.16	0.95	1.35
	Anual	11.03	12.87	0.42	38.52	0.69	0.39	0.15	1.35
2020	Invierno	1.74	0.16	1.62	1.86	0.58	0.13	0.50	0.72
	Primavera	2.56	0.54	1.99	3.06	0.50	0.10	0.43	0.62
	Verano	1.35	0.54	0.78	1.85	0.46	0.16	0.32	0.64
	Otoño	1.91	0.72	1.24	2.67	0.32	0.02	0.30	0.33
	Anual	1.91	0.67	0.78	3.06	0.47	0.14	0.30	0.72
2021	Invierno	0.94	0.06	0.87	1.00	0.28	0.04	0.24	0.32
	Primavera	1.15	0.53	0.53	1.49	0.30	0.04	0.26	0.34
	Verano	8.43	5.89	2.39	16.16	0.73	0.29	0.34	0.98
	Otoño	3.37	1.30	1.93	4.48	0.37	0.16	0.24	0.56
	Anual	3.85	4.47	0.53	16.16	0.45	0.26	0.24	0.98
2022	Invierno	1.60	0.28	1.30	1.86	0.46	0.13	0.34	0.60
	Primavera	2.26	1.14	0.85	3.61	0.31	0.09	0.24	0.47
	Verano	1.27	0.79	0.75	2.18	0.43	0.10	0.32	0.49
	Otoño	1.52	0.74	0.94	2.73	0.36	0.07	0.28	0.43
	Anual	1.72	0.86	0.75	3.61	0.37	0.10	0.24	0.60
2023	Invierno	0.79	0.23	0.62	1.05	0.23	0.02	0.20	0.25
	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---
	Verano	---	---	---	---	---	---	---	---
	Otoño	---	---	---	---	---	---	---	---
	Anual	---	---	---	---	---	---	---	---

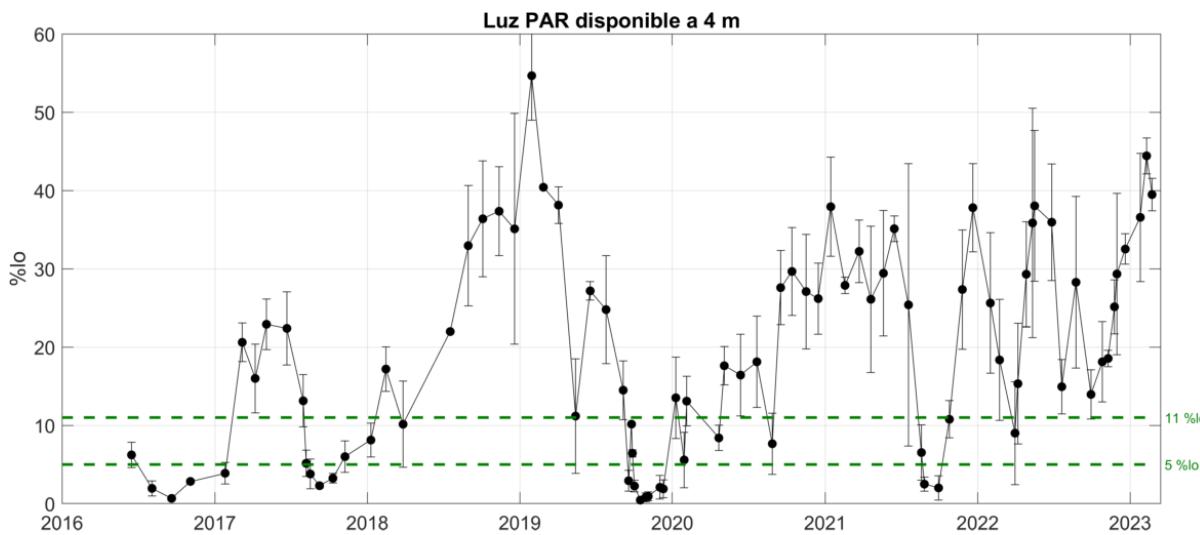


Figura 95: Evolución del porcentaje de radiación PAR que atraviesa la superficie del agua y que alcanza la profundidad de 4 metros. Los niveles de 11% y 5% son críticos para el crecimiento fotosintético de la vegetación bentónica.

En lo que llevamos de 2023, la disponibilidad de luz en el fondo ha ido aumentando progresivamente, de forma paralela a la reducción del kd y de la concentración de clorofila *a* en el agua, lo que se traduce en un periodo de aguas muy transparentes en la laguna durante los últimos meses.

Los equipos del IEO-CSIC realizan un seguimiento muy exhaustivo de la dinámica y distribución de las praderas marinas en la albufera laguna combinando métodos de buceo autónomo, video submarino arrastrado e imagen de satélite. Igualmente se realiza un seguimiento del estado y funcionalidad de las praderas someras supervivientes. No obstante, a pesar de estos episodios prolongados en los que la disponibilidad de luz es óptima para el desarrollo de los macrófitos, **se ha comprobado que estas praderas no son capaces, al menos por ahora, de colonizar las zonas más profundas de 3 m. La limitación de luz en episodios de turbidez podría ser un factor que explicase esta incapacidad, pero se están investigando otros factores. La identificación de estos factores limitantes es fundamental previamente a cualquier actuación de restauración asistida mediante trasplantes.**

Serie temporal de turbidez y extinción de la luz de la boya piloto SMLG.

El coeficiente de extinción de la luz (Kd) y la turbidez NTU (unidad nefelométrica de turbidez) son dos medidas diferentes para expresar la reducción de la luz en la columna de agua a consecuencia del incremento de concentraciones de partículas fotosintéticas y no fotosintéticas. El Kd mide la tasa a la cual la luz se extingue en la columna de agua (con base 1 m), mientras que la turbidez (NTU) mide la proporción de luz dispersada o *backscatter*. La boya SMLG mide la concentración de clorofila *a* (a partir de fluorescencia) y turbidez NTU a una profundidad de 3 metros (ver Figura). De momento, estos dos parámetros de la boya no están calibrados con muestras *in situ* (determinadas espectrofotométricamente), pero se puede comparar entre ellos en términos relativos.

En general, se observa que la clorofila *a* varía diariamente con valores que aumentan durante el día y disminuyen al atardecer, siguiendo los ciclos de actividad nictemeral de los organismos fotosintéticos del plancton. A finales de octubre de 2022, la playa piloto SMLG reportó un pico de turbidez que claramente correspondía con un pico de clorofila *a* en la laguna. Durante la segunda semana de noviembre de 2022 se produjo un fuerte pico de clorofila *a* y turbidez que podría estar relacionado con precipitaciones próximas, aunque estas precipitaciones se registraron posteriormente en la estación meteorológica de AEMET en San Javier, con un pequeño desfase temporal. A partir del siguiente episodio de precipitación intensa, la concentración de clorofila *a* aumentó, bajando lentamente hasta los niveles actuales. El 17 de enero se registró un pico de turbidez aislado, pero que no parece estar inducido por fitoplancton y tampoco por lluvias fuertes. Estos resultados muestran el elevado poder de este tipo de tecnologías para visualizar y comprender los procesos que gobiernan el estado del ecosistema lagunar y los factores implicados.

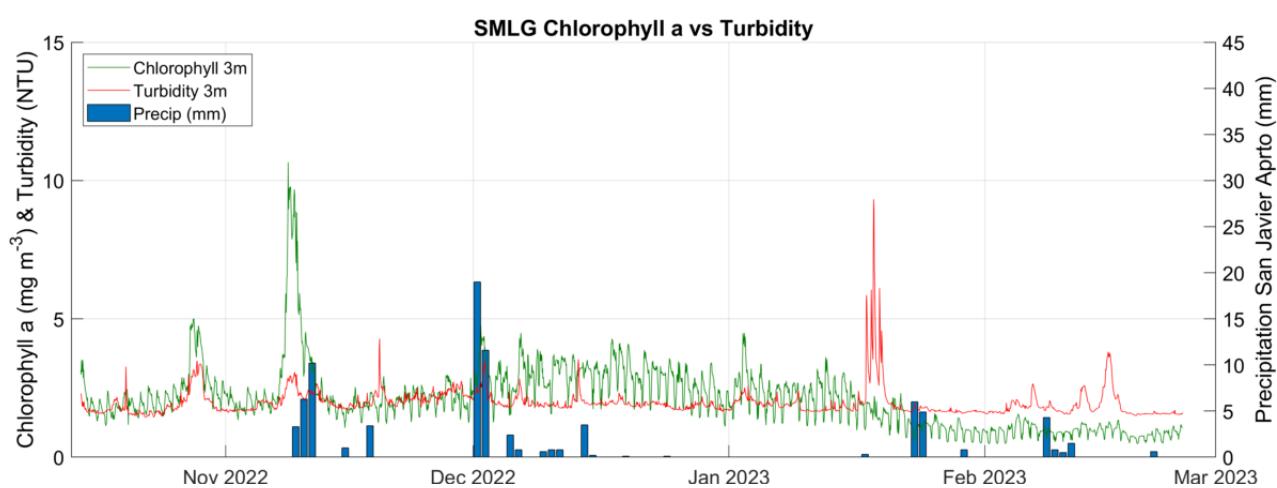


Figura 16: Series temporales completas de clorofila *a* y turbidez NTU de la playa piloto SMLG, comparado con las precipitaciones registradas por AEMET en el aeropuerto de San Javier.

Series temporales de Clorofila *a* del Mar Menor (datos satelitales)

Usando datos de varios satélites, Buongiorno Nardelli et al. (2018) crearon un conjunto de datos de clorofila *a* (Mediterranean Sea Ocean Colour Plankton MY L4 daily gapfree observations and climatology and monthly observations) desde el año 2016 hasta hoy. La Figura muestra los datos de clorofila *a* con una resolución espacial de 300x300m dentro Mar Menor. Con estos datos, se puede calcular un valor promedio mensual de la concentración de clorofila *a* para toda la laguna del Mar Menor.

Los datos satelitales de clorofila *a* han sido calibrados (ver Figura 5-6 del Anexo) con los datos de clorofila *a* de los muestreos in situ del proyecto DMMEM en las ubicaciones A, B y C.

La Figura 17 muestra la serie temporal de datos de clorofila *a* de la *Mediterranean Sea Ocean Colour Plankton MY L4 daily gapfree observations and climatology and monthly observations* (azul), calibrados con los datos de clorofila del proyecto DMMEM (rojo) y el promedio mensual de los datos de clorofila *a* de la playa piloto SMLG (negro).

Los valores satelitales de clorofila *a* promedios por mes cuadran relativamente bien con los valores de clorofila *a* del muestreo *in situ* del proyecto DMMEM, pero debido a la heterogeneidad de la dinámica del desarrollo fitoplanctónico y al desacoplamiento de la clorofila *a* con la turbidez, este archivo de datos satelitales mensuales debe ser y será reemplazado por un algoritmo propio creado por el IEO-Málaga en el contexto del proyecto BELICH.

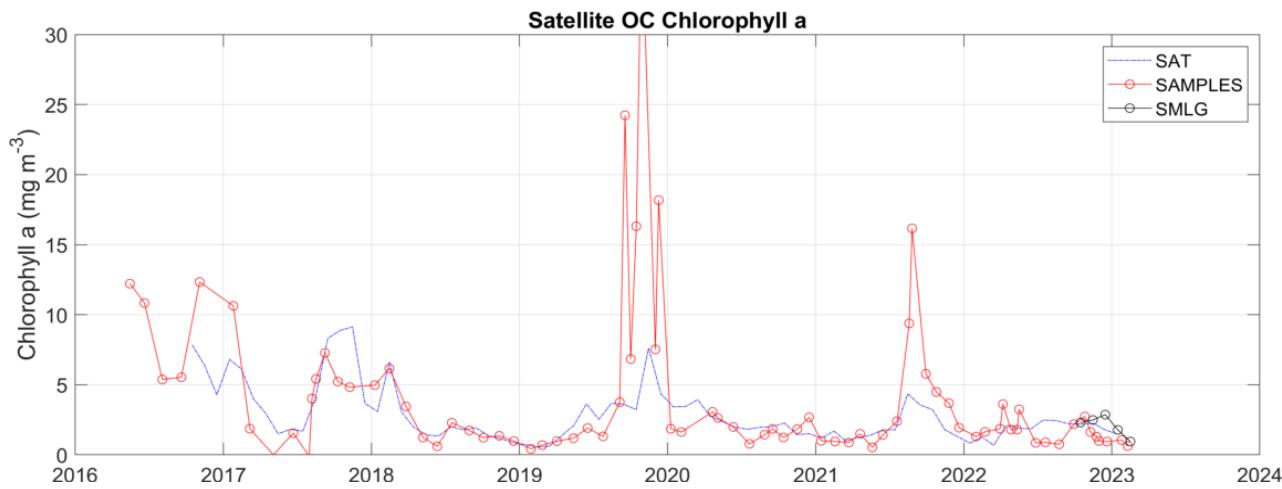


Figura 17: Comparación de las series temporales de clorofila *a* de los datos satelitales, muestreos DMMEM y boyas SMLG.

5. Campo de Oxígeno disuelto y pH del Mar Menor

Muestreos *in situ*

En 2022, los valores de oxígeno obtenidos en los muestreos *in situ* (estaciones A, B y C; Figura 1) se han mantenido altos y normales en las tres zonas de muestreo (8.5-8.9 mg/l), experimentando una disminución generalizada en junio (27/06/2022) hasta valores medios de 6.66 mg/l en las capas superficiales y 6.67 mg/l en las capas más profundas (ver Figura 18 y Tabla 4). En agosto se alcanzaron valores medios mínimos entre 5.4 y 5.8 mg/l. Estos son valores normales para el Mar Menor en verano, aunque algo más bajos de lo habitual de acuerdo con la serie temporal (ver Figura 18), probablemente por las elevadas temperaturas alcanzadas este año (ver Figuras 10 y 12). Otros factores pueden contribuir, como las fluctuaciones del material orgánico particulado (datos no mostrados en este informe).

A partir de septiembre de 2022, los valores aumentan hasta valores medios entre 10 y 12 mg/l en febrero de 2023. Esta variable tampoco muestra diferencias entre las capas superficiales y profundas lo que indica ausencia de procesos de estratificación termohalina en la columna de agua. No se han apreciado síntomas de déficit de oxígeno críticos para el ecosistema lagunar (hipoxia, anoxia).

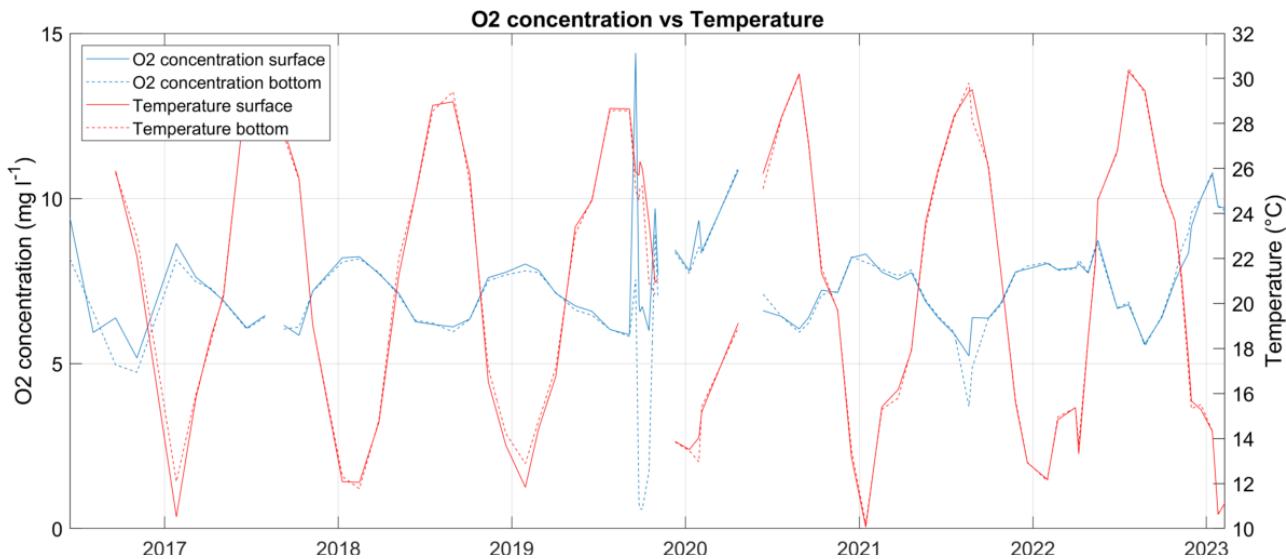


Figura 18: Series temporales promedio de oxígeno disuelto (azul) y temperatura (rojo) para las capas superficiales (línea continua) y de fondo (línea discontinua) de los muestreos del proyecto DMMEM para las ubicaciones A, B y C de la laguna del Mar Menor.

Tabla 4: Valores mínimos y máximos de oxígeno disuelto medidas durante los muestreos cada año.

Oxígeno disuelto (mg/l)		Superficie				Fondo			
Año	Estación	Mean	Std	Min	Max	Mean	Std	Min	Max
2016	Invierno	---	---	---	---	---	---	---	---
	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---
	Verano	6.2	0.3	5.9	6.4	5.8	1.1	5.0	6.6
	Otoño	5.2	0.0	5.2	5.2	4.7	0.0	4.7	4.7
	Anual	6.7	1.9	5.2	9.4	6.1	1.6	4.7	8.2
2017	Invierno	8.1	0.7	7.6	8.6	7.8	0.5	7.5	8.1
	Primavera	6.7	0.6	6.1	7.2	6.7	0.6	6.0	7.3
	Verano	6.3	0.2	6.2	6.5	6.2	0.3	6.0	6.4
	Otoño	6.5	0.9	5.9	7.2	6.6	0.8	6.1	7.2
	Anual	6.9	0.9	5.9	8.6	6.8	0.7	6.0	8.1
2018	Invierno	8.1	0.3	7.7	8.2	8.0	0.2	7.8	8.2
	Primavera	6.7	0.6	6.3	7.1	6.7	0.5	6.3	7.1
	Verano	6.1	0.1	6.1	6.2	6.1	0.2	6.0	6.2
	Otoño	7.2	0.8	6.3	7.8	7.2	0.7	6.3	7.7
	Anual	7.2	0.9	6.1	8.2	7.1	0.8	6.0	8.2
2019	Invierno	7.9	0.1	7.8	8.0	7.8	0.0	7.8	7.8
	Primavera	6.8	0.3	6.6	7.1	6.7	0.4	6.5	7.1
	Verano	7.9	3.6	5.9	14.4	4.2	3.2	0.6	7.5
	Otoño	7.7	1.4	6.0	9.7	5.3	3.9	0.6	8.9
	Anual	7.6	2.1	5.9	14.4	5.5	3.0	0.6	8.9

		Invierno	8.5	0.8	7.8	9.3	8.2	0.4	7.7	8.5
2020	Primavera	8.7	3.0	6.6	10.9	9.0	2.7	7.1	10.9	
	Verano	6.3	0.2	6.0	6.4	6.2	0.2	5.9	6.4	
	Otoño	7.5	0.6	7.1	8.2	7.5	0.6	7.1	8.2	
	Anual	7.7	1.5	6.0	10.9	7.6	1.4	5.9	10.9	
	Invierno	7.9	0.4	7.5	8.3	7.9	0.2	7.7	8.1	
2021	Primavera	7.0	0.7	6.4	7.8	7.1	0.7	6.4	7.8	
	Verano	6.0	0.5	5.2	6.4	5.2	1.2	3.7	6.4	
	Otoño	7.5	0.6	6.8	7.9	7.5	0.6	6.8	8.0	
	Anual	7.0	0.9	5.2	8.3	6.8	1.3	3.7	8.1	
	Invierno	7.9	0.1	7.8	8.0	7.9	0.1	7.8	8.1	
2022	Primavera	7.9	0.8	6.7	8.7	7.9	0.8	6.7	8.6	
	Verano	6.3	0.6	5.6	6.8	6.3	0.7	5.5	6.9	
	Otoño	8.6	1.0	7.5	10.0	9.0	0.9	7.6	10.0	
	Anual	7.8	1.1	5.6	10.0	7.9	1.2	5.5	10.0	
	Invierno	10.1	0.5	9.7	10.7	10.2	0.6	9.6	10.8	
2023	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Verano	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Otoño	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Anual	---	---	---	---	---	---	---	---	

Los valores promedio del pH in situ en escala NBS en las localizaciones A, B y C del Mar Menor se muestran en la Figura19 (ver Tabla 5). Los valores muestran una tendencia positiva del pH de +0.11 unidades por año, aumentando de valores de 8 a 8.6 en escala NBS. La última parte de la “sopa verde” en 2017 y el episodio de mortalidad en 2021 muestran una disminución considerable de los valores de pH, en torno a -0.5 unidades. Por el contrario, en marzo 2022, los valores de pH muestran un rápido aumento hasta alcanzar valores de 10 unidades en junio de 2022, para posteriormente disminuir rápidamente de nuevo hasta valores normales de pH superficial en torno a 8.5 unidades en septiembre.

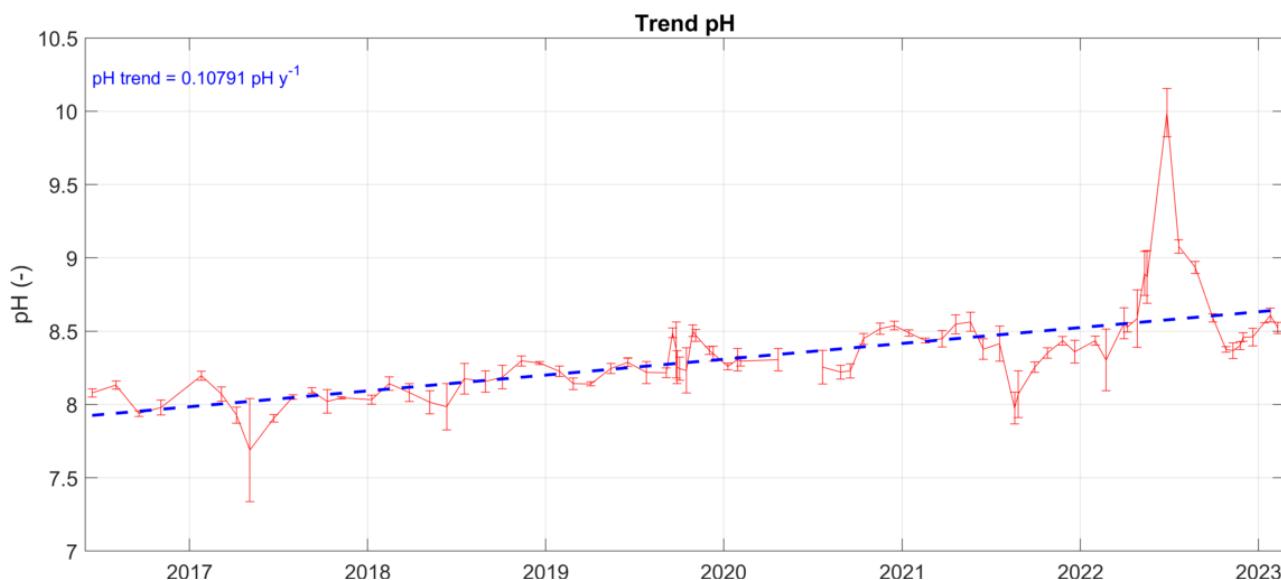


Figura 19: Serie temporal promedio de pH de los muestreos del proyecto DMMEM en las ubicaciones A, B y C de la laguna del Mar Menor.

Tabla 5: Valores medios, mínimos y máximos de pH medidos durante los muestreos cada año.

pH (-)		Superficie				Fondo			
Año	Estación	Mean	Std	Min	Max	Mean	Std	Min	Max
2016	Invierno	---	---	---	---	---	---	---	---
	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---
	Verano	8.1	0.1	8.0	8.1	8.0	0.2	7.9	8.1
	Otoño	8.0	0.0	8.0	8.0	7.9	0.0	7.9	7.9
	Anual	8.1	0.1	8.0	8.1	8.0	0.1	7.9	8.1
2017	Invierno	8.1	0.1	8.1	8.2	8.1	0.1	8.1	8.2
	Primavera	7.8	0.2	7.5	7.9	7.9	0.0	7.9	7.9
	Verano	8.1	0.0	8.1	8.1	8.1	0.0	8.0	8.1
	Otoño	8.0	0.0	8.0	8.0	8.0	0.0	8.0	8.0
	Anual	8.0	0.2	7.5	8.2	8.0	0.1	7.9	8.2
2018	Invierno	8.1	0.0	8.1	8.1	8.1	0.1	8.0	8.1
	Primavera	8.0	0.0	8.0	8.0	8.0	0.0	8.0	8.0
	Verano	8.2	0.0	8.2	8.2	8.2	0.0	8.2	8.2
	Otoño	8.3	0.1	8.2	8.3	8.3	0.1	8.2	8.3
	Anual	8.1	0.1	8.0	8.3	8.1	0.1	8.0	8.3
2019	Invierno	8.2	0.1	8.1	8.2	8.2	0.1	8.1	8.2
	Primavera	8.2	0.1	8.2	8.3	8.2	0.1	8.1	8.3
	Verano	8.5	0.2	8.2	8.7	8.2	0.1	7.9	8.3
	Otoño	8.5	0.1	8.4	8.5	8.2	0.3	7.8	8.5
	Anual	8.4	0.2	8.1	8.7	8.2	0.2	7.8	8.5
2020	Invierno	8.3	0.0	8.3	8.3	8.3	0.0	8.3	8.3
	Primavera	8.3	0.0	8.3	8.3	8.3	0.0	8.3	8.3
	Verano	8.2	0.0	8.2	8.3	8.2	0.0	8.2	8.2
	Otoño	8.5	0.0	8.5	8.5	8.5	0.1	8.4	8.6
	Anual	8.3	0.1	8.2	8.5	8.3	0.1	8.2	8.6
2021	Invierno	8.5	0.0	8.4	8.5	8.5	0.0	8.4	8.5
	Primavera	8.5	0.1	8.4	8.6	8.5	0.1	8.4	8.6
	Verano	8.2	0.1	8.1	8.4	8.1	0.2	7.9	8.4
	Otoño	8.4	0.1	8.3	8.4	8.4	0.0	8.3	8.4
	Anual	8.4	0.1	8.1	8.6	8.4	0.2	7.9	8.6
2022	Invierno	8.4	0.1	8.3	8.5	8.4	0.1	8.3	8.6
	Primavera	9.0	0.6	8.5	9.9	9.0	0.6	8.5	10.0
	Verano	8.9	0.3	8.6	9.1	8.9	0.2	8.6	9.1
	Otoño	8.4	0.0	8.4	8.5	8.4	0.0	8.4	8.5
	Anual	8.7	0.4	8.3	9.9	8.7	0.4	8.3	10.0
2023	Invierno	8.5	0.1	8.4	8.6	8.5	0.1	8.5	8.6
	Primavera	---	---	---	---	---	---	---	---
	Verano	---	---	---	---	---	---	---	---
	Otoño	---	---	---	---	---	---	---	---
	Anual	---	---	---	---	---	---	---	---

Comparando los valores de oxígeno y de pH en 2022 (Figura 20), se observa una rápida disminución del oxígeno disuelto coincidiendo con la aparición del pico de pH. Sin embargo, en general, los valores de oxígeno disuelto no varían significativamente de los valores de años anteriores.

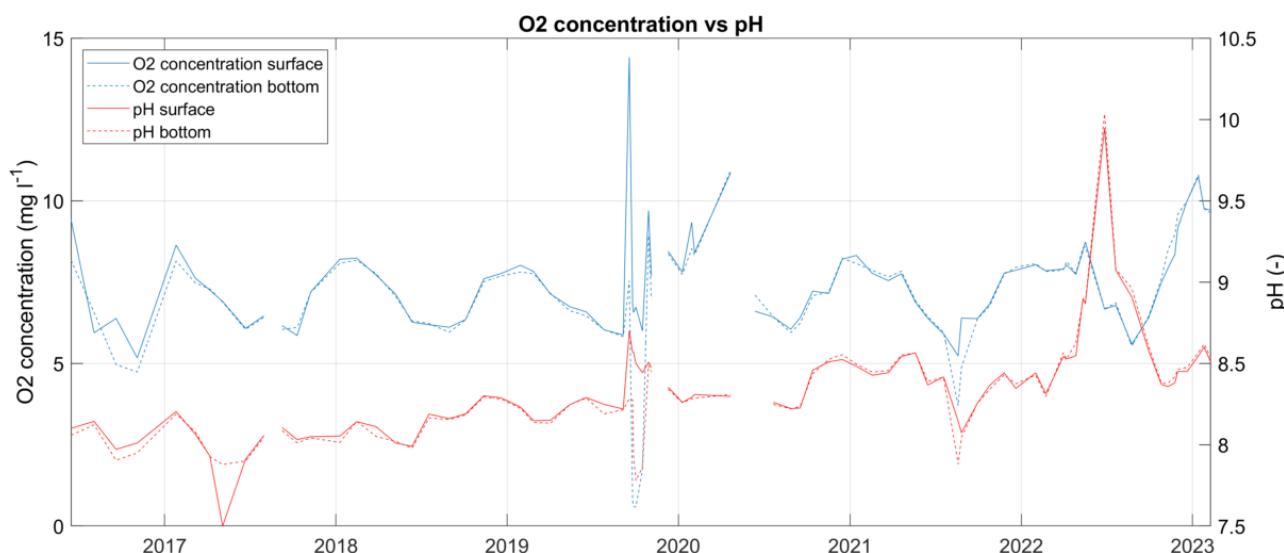


Figura 100: Series temporales de oxígeno disuelto (azul) y pH (rojo) en la superficie (línea continua) y fondo (línea discontinua) para los datos del proyecto DMMEM y para las ubicaciones A, B y C de la laguna del Mar Menor.

Como se explica anteriormente, el pH muestra una clara y constante tendencia a aumentar en el periodo 2016-2023, pasando de 8 a 8.6 unidades. Esta variable muestra episodios puntuales de acidificación asociados a eventos concretos de *bloom* fitoplanctónico y déficit de oxígeno, tal y como se describe en ambientes marinos fuertemente eutrofizados. Sin embargo, la tendencia general a largo plazo es de aumento del pH, y no de disminución. En este sentido llama también la atención el valor máximo de pH alcanzado en verano de 2022, coincidiendo en parte con el incremento de clorofila *a* en primavera. Estos incrementos podrían ser debidos a un incremento de la actividad fotosintética en la laguna, pero también por procesos de precipitación de carbonatos. Las enormes proliferaciones de organismos calcáreos (poliquetos, cirrípedos, moluscos, etc.) observadas en la laguna estos últimos años estarían de acuerdo con esta hipótesis. El aumento de la producción fitoplancótica y microbiana, así como del zooplancton, durante estos últimos años podría haber favorecido estas proliferaciones masivas de organismos carbonatados, que afectan incluso negativamente a la actividad humana debido al desarrollo excesivo del “biofouling” en los cascos de los barcos. Habría que estudiar también el efecto que ha tenido esta respuesta trófica sobre las poblaciones de especies en los niveles tróficos superiores, incluyendo las poblaciones de peces.

Este es un resultado sorprendente teniendo en cuenta el férreo control que ejerce el sistema el sistema tamponador de carbono del agua de mar sobre el pH, y refleja la magnitud de los cambios que está experimentando la laguna desde su colapso.

Los cambios de pH pueden afectar la actividad fotosintética de la angiosperma *Cymodocea nodosa* del Mar Menor. Esta especie muestra una disminución lineal en las tasas fotosintéticas con el pH; los valores a pH 8,8 fueron del 25-80% de los obtenidos a pH 8.2 (Olga Invers et al., 1997). El mantenimiento de esta tendencia

de aumento del pH podría tener importantes repercusiones en el desarrollo y recuperación de *Cymodocea nodosa* en el Mar Menor, así como en la producción primaria del conjunto del ecosistema.

6. Síntesis y consideraciones finales

Tras los episodios descritos en 2022, hasta febrero de 2023, no se ha vuelto a registrar ningún episodio de proliferación fitoplanctónica. Igualmente, tampoco se han registrado episodios de estratificación vertical termohalina de la columna de agua asociados a los aportes de agua dulce desde la cuenca vertiente. El régimen de precipitaciones propio de este periodo parece ser el responsable del mantenimiento de unos valores de salinidad relativamente bajos (aunque normales para el ecosistema lagunar). También llama la atención la elevada variabilidad de la turbidez de la columna de agua y su desacoplamiento parcial de la dinámica de la clorofila *a*, lo cual puede estar reflejando la complejidad de los procesos de eutrofización que en la actualidad gobiernan el estado del ecosistema lagunar.

Aunque en los últimos meses se ha constatado una tendencia de aumento de la transparencia de la columna de agua, el régimen a medio y largo plazo es el de un sistema altamente fluctuante y variable, donde se alternan estos periodos de aguas transparentes con periodos de aguas más turbias, bien por la proliferación de organismos fitoplanctónicos o bien por otros factores que afectan las propiedades ópticas del agua (o ambas a la vez). Durante estos periodos de aguas turbias se comprueba que la disponibilidad de luz llega a ser limitante para la producción primaria bentónica, no tanto por parte del clorófito *Caulerpa* prolífica, favorecido por los nutrientes y que ha recolonizado todo el fondo lagunar, pero si podría afectar a la recuperación de la angiosperma *Cymodocea nodosa* en las zonas más profundas. En esta misma línea, la elevación del pH desde 2016 pone en evidencia un desequilibrio generalizado del ecosistema lagunar que podría estar relacionado con un exceso de materia orgánica disponible para los niveles tróficos más primarios, como las poblaciones de organismos filtradores carbonatados. En cualquier caso, todas estas relaciones son hipótesis que requieren ser contrastadas con nuevo conocimiento científico.

Como en periodos anteriores, es muy tentador interpretar positivamente la reciente aparente estabilidad del sistema en términos sobre todo de clorofila *a* y transparencia. La evidencia científica disponible indica que el sistema se encuentra en un estado significativamente alterado e inestable, respecto a su estado previo al colapso de 2016. El mantenimiento de unos niveles bajos de clorofila *a* en la columna de agua a pesar de las continuas entradas de altas concentraciones de nutrientes, no es más que un reflejo de la complejidad de los mecanismos relacionados con el proceso de eutrofización (exceso de nutrientes en la laguna), algunos de los cuales son capaces de controlar el desarrollo fitoplantónico. La actividad de las comunidades microbianas, el desarrollo de enormes biomassas de algas filamentosas ("ovas"), la elevada capacidad de asimilación de nutrientes de las macroalgas (*Caulerpa prolifera*), o el zooplancton pueden ser componentes clave de estos mecanismos, aunque su papel y su importancia real requiere estudios más detallados y comprensibles. Todos estos elementos y sus mecanismos de interacción pueden contribuir a la retirada de nutrientes del medio, incluso en situaciones de aportes masivos, como los ocurridos debido a las intensas precipitaciones de invierno-primavera y otoño de 2022. Pero cuando estos mecanismos no actúen, o lo hagan en condiciones de menor intensidad y eficacia, los nutrientes que entran en la laguna de forma continua y masiva podrán estar de nuevo disponibles para el fitoplantcton y desencadenar eventos extremos de hipoxia, tal y como pudimos comprobar en verano de 2021. El calentamiento progresivo de las aguas de la laguna parece haberse acelerado en los últimos años/décadas y, en sinergia con el exceso de nutrientes,

podría haber estado implicado en los procesos disruptivos que llevaron al colapso del ecosistema lagunar. El exceso de nutrientes de origen antropogénico puede haber actuado erosionando los mecanismos de tolerancia del ecosistema al calentamiento y otros cambios del medio, acelerando el colapso. El progresivo calentamiento podría estar llevando a determinadas especies muy cerca de sus umbrales de tolerancia a la temperatura, lo que podría traducirse en nuevos episodios disruptivos del ecosistema a corto, medio y largo plazo.

Todo lo anterior apunta también a que las condiciones ambientales parecen no ser todavía propicias para la recuperación de hábitats y especies cuyas poblaciones quedaron profundamente alteradas y mermadas tras el colapso experimentado en 2016. Las praderas de *Cymodocea nodosa* son un claro ejemplo de ello. Por esta misma razón no son viables en este momento actuaciones basadas en el trasplante de estas especies. El seguimiento continuado de ésta y otras especies y taxones clave (p.ej. Nacra, caballito de mar, signátidos, invertebrados filtradores, en particular los carbonatados, etc.) es fundamental ya que un cambio de tendencia en su estado y extensión constituiría un claro síntoma de recuperación a escala ecosistémica. Por el contrario, los diagnósticos basados sólo en el estado de la columna de agua no pueden ser extrapolados al estado del ecosistema lagunar.

La incorporación de un sistema de monitorización oceanográfica de alta resolución como la boya piloto SMLG pone en evidencia la necesidad de datos con mayor resolución espacial y temporal, ya que nos permite una mayor comprensión de los procesos que gobiernan el estado del ecosistema lagunar. En este sentido, a medida que avance la implementación de los sistemas de monitorización desarrollados por BELICH y otros proyectos de monitorización en curso desarrollados por diferentes entidades y organizaciones, la comunidad científica dispondrá de un flujo de datos continuo cada vez mayor, con una mejor resolución temporal y espacial, que tiene el potencial de mejorar nuestra capacidad de análisis, diagnóstico, y evaluación de acciones en base a predicciones a través del desarrollo de modelos adecuados. Sin embargo, se alerta de la necesidad de crear un sistema de gestión y gobernanza del dato que cumpla con la legislación presente UE 2023/138 de 21 de diciembre de 2022, en el que se establecen una lista de conjuntos de datos específicos de alto valor y modalidades de publicación y reutilización.

7. Anexo

Calibraciones de los datos de temperatura de la boyas SMARTLAGOON con perfiles CTD próximos a la boyas

Termistores (sensores de temperatura)

Fecha de la última calibración, el 16/02/2023

resultando en la fórmula:

$$CAST = -0.34136 + 1.0056 * BUOY. R^2: 0.9998$$

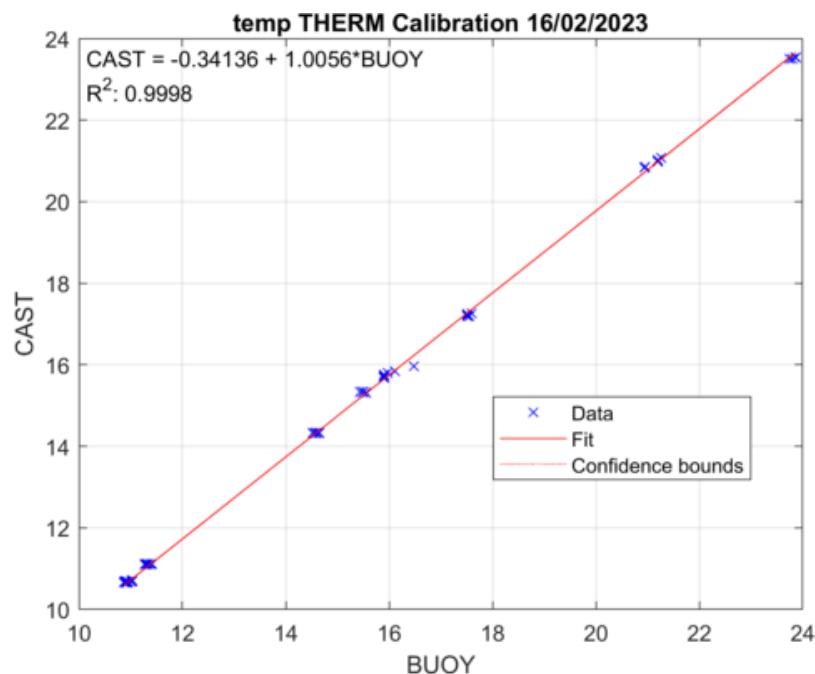


Figura 1: Calibración de los datos de temperatura de los Termistores de la boyas piloto SMLG.

Temperatura del sensor de oxígeno (Aanderaa)

Fecha de la última calibración, el 16/02/2023

resultando en la fórmula:

$$CAST = -0.019562 + 0.99767 * BUOY. R^2: 0.9998$$

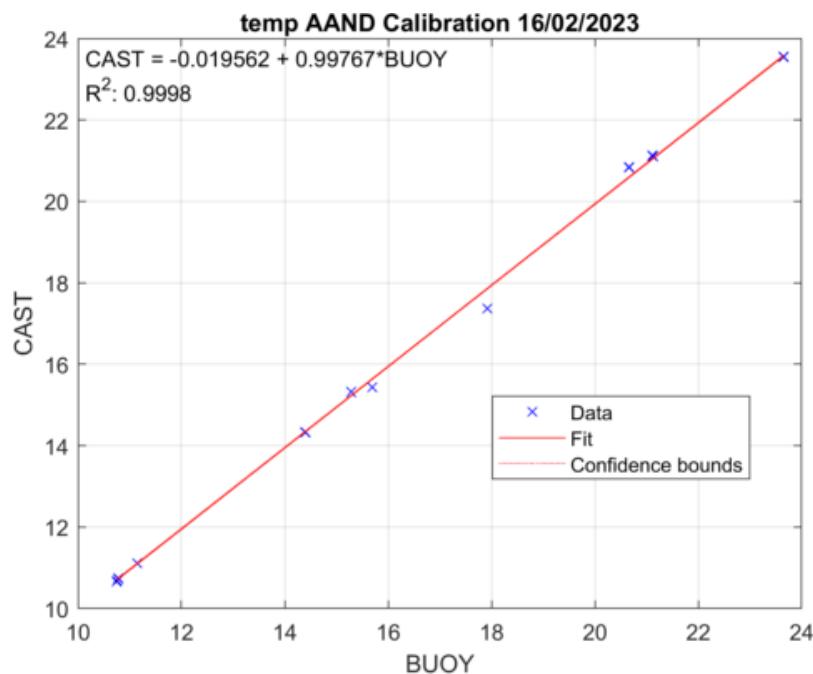


Figura2: Calibración de los datos de temperatura de los sensores de oxígeno Aanderaa de la boyas piloto SMLG.

Temperatura del sensor de Conductividad (EC-1550)

Fecha de la última calibración, el 16/02/2023

resultando en la fórmula:

$$CAST = 0.14584 + 0.99687 * BUOY. R^2: 0.9996$$

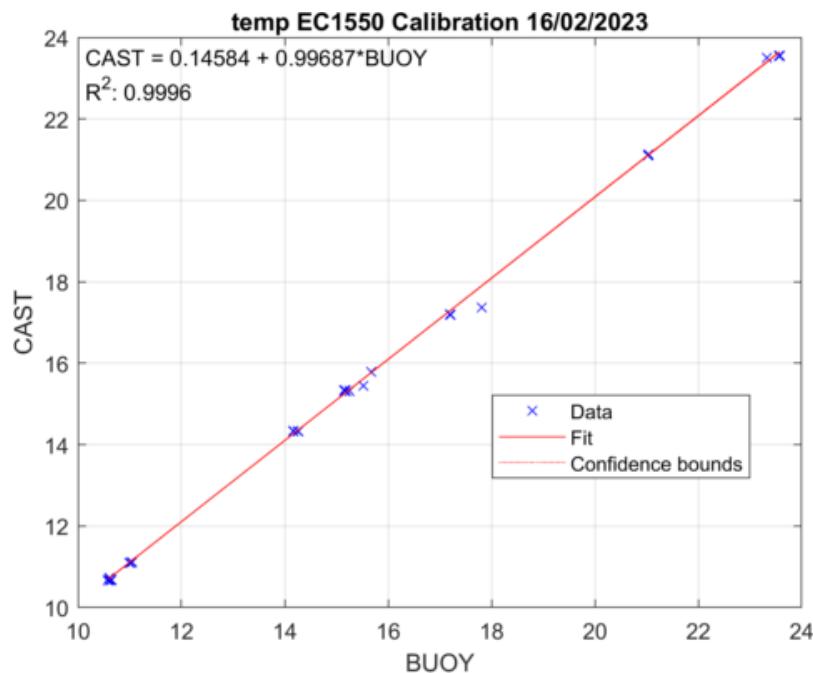
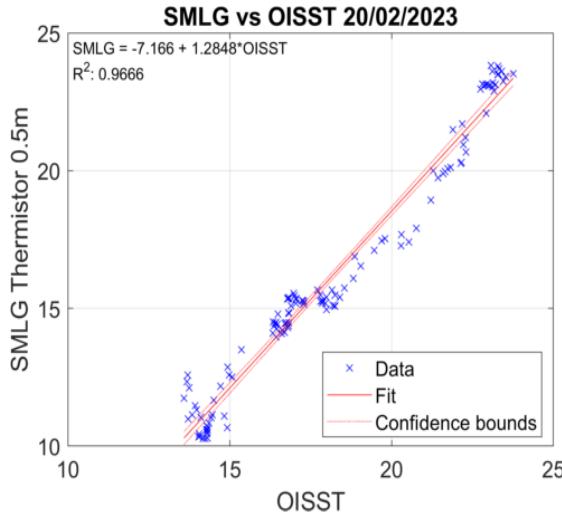


Figura3: Calibración de la temperatura del sensor de conductividad (EC-1550) de la boyas SMARTLAGOON.



Fecha de la última calibración, el 20/02/2023.
Resultando en la fórmula:

$$SMLG = -7.166 + 1.2848 \cdot OISST. R^2: 0.9666$$

A medida que se vayan incorporando nuevos datos de SST, se modificará la calibración en concordancia.

Figura 4: Calibración de la temperatura superficial satélite usando la temperatura superficial de la boyta SMLG.

Calibración de datos satelitales de clorofila a

Última calibración realizada el 20/02/2023.

Resultando en la fórmula:

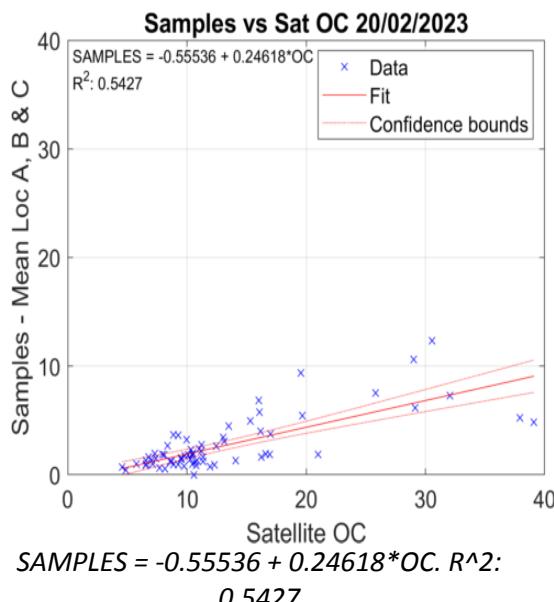


Figura 5: Calibración de la clorofila a satelital usando los datos de clorofila a de los muestreos del proyecto DMMEM.

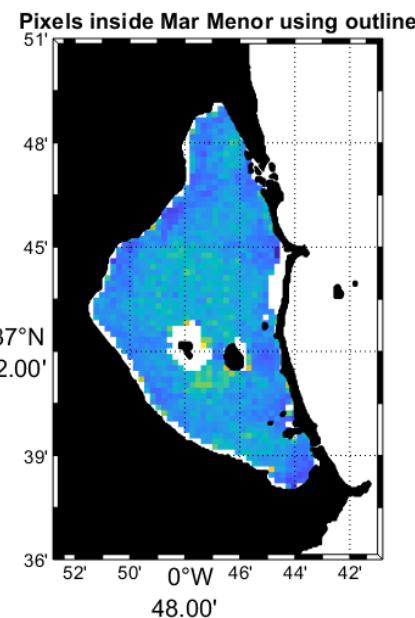
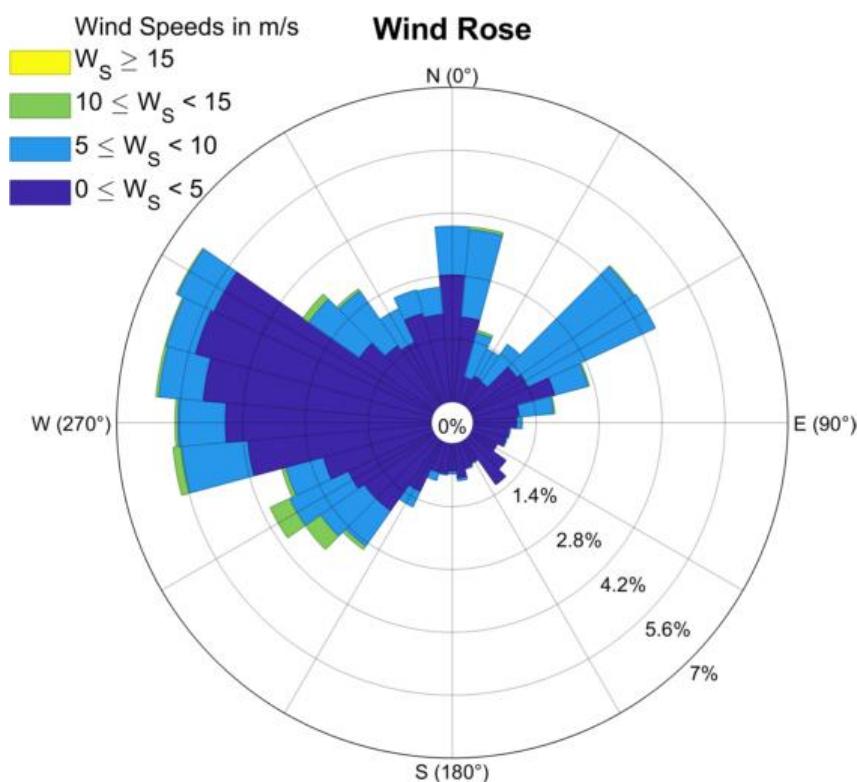


Figura 6: Mapa del Mar Menor con los datos satelitales de clorofila a de la Mediterranean Sea Ocean Colour Plankton MY L4 daily gapfree observations and climatology and monthly observations. Resolución espacial de 300x300m.

Datos de la boyas SMLG: meteorología.

La boyas SMLG tiene instalado un anemómetro que registra datos de intensidad de la velocidad del viento. Sin embargo, no posee datos de dirección del viento. La

Figura 111 muestra la “rosa de los vientos”, creada a partir de los datos de intensidad de la velocidad del viento medidos por la boyas SMARTLAGOON y las direcciones obtenidas a través de la estación meteorológica TP-22, perteneciente al Sistema de Información Agrario de Murcia (SIAM/IMIDA) para todo el periodo: 14-10-2022 hasta 20-02-2023. Se observa que, aunque la dirección predominante del viento es del oeste y sur-oeste, estos últimos presentan las intensidades más fuertes.



Speed(m/s) from SMLG, Direction($^{\circ}$) from IMIDA TP22: SAN JAVIER

Figura 111: Rosa de los vientos boyas SMLG y datos IMIDA San Javier.