

Un verano excepcional en la costa marplatense: manchas, espuma y florecimientos algales.

Belén Mattera, Graciela Molinari, Gastón Almandoz, Reinaldo Maenza,
Guillermina Ruiz, Elena Fabro, Ricardo Silva, Mario Carignan, Macarena
Albornoz y Nora Montoya

Resumen

El presente estudio se originó por la preocupación que surgió en el ámbito público durante la temporada estival 2020-2021 en Mar del Plata ocasionada por una sucesión de eventos de floraciones de fitoplancton que sorprendieron por su magnitud, frecuencia e intensidad extraordinaria. A principios de diciembre, peces muertos y manchas marrones fueron observadas en la costa de Villa Gesell, y a fines de diciembre, una nueva discoloración del mar ocurrió en la zona del emisario submarino de Mar del Plata. Estas “mareas marrones” fueron originadas por una floración de la diatomea no tóxica *Asterionellopsis glacialis* frecuente en la zona, pero con crecimientos en menor intensidad. A principios de febrero y durante varios días, una densa espuma cubrió una extensa área costera en Mar del Plata, evento que tuvo una gran repercusión periodística en medios de todo el país. La espuma de mar es una emulsión que se forma por la agitación de las olas, el aire y compuestos orgánicos disueltos en el mar originados por la descomposición de microalgas que actúan como tensioactivos. Luego, a mediados de abril una nueva e importante marea roja ocurrió en la Dársena del Puerto, esta vez por el crecimiento extraordinario de dinoflagelados del género *Heterocapsa*. En concordancia con estos eventos, durante el verano se registró el máximo mensual absoluto de temperatura en aguas costeras para la Estación de Observaciones Costeras (EOC): 24,3°C. Con el fin de encontrar las causas y evaluar las posibles consecuencias de estos eventos se realizaron análisis de condiciones ambientales, imágenes satelitales, fitoplancton, pigmentos y toxinas. No se detectaron especies tóxicas, toxinas, ni se registraron problemas de salud para los bañistas que utilizaron el sector costero con fines recreativos. Estos eventos pueden explicarse por la suma de factores ambientales (altas temperaturas, intensidad y dirección del viento, nutrientes). A nivel global, las floraciones de algas nocivas muestran una expansión del rango y una mayor frecuencia en las áreas costeras desde la década de 1980 en respuesta a factores climáticos y no climáticos, y es por lo tanto importante continuar con los estudios tendientes a dilucidar las causas y posibles riesgos





Un verano excepcional en la costa marplatense: manchas, espuma y florecimientos algales

Belén Mattera¹, Graciela Molinari¹, Gastón Almandoz^{2,3}, Reinaldo Maenza¹, Guillermina Ruiz¹, Elena Fabro^{2,3}, Ricardo Silva¹, Mario Carignan¹, Macarena Albornoz¹ y Nora Montoya¹

¹ Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP). ² División Ficología de la Facultad de Cs. Naturales y Museo de la Universidad de La Plata. ³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Resumen

El presente estudio se originó por la preocupación que surgió en el ámbito público durante la temporada estival 2020-2021 en Mar del Plata ocasionada por una sucesión de eventos de floraciones de fitoplancton que sorprendieron por su magnitud, frecuencia e intensidad extraordinaria. A principios de diciembre, peces muertos y manchas marrones fueron observadas en la costa de Villa Gesell, y a fines de diciembre, una nueva discoloración del mar ocurrió en la zona del emisario submarino de Mar del Plata. Estas “mareas marrones” fueron originadas por una floración de la diatomea no tóxica *Asterionellopsis glacialis* frecuente en la zona, pero con crecimientos en menor intensidad. A principios de febrero y durante varios días, una densa espuma cubrió una extensa área costera en Mar del Plata, evento que tuvo una gran repercusión periodística en medios de todo el país. La espuma de mar es una emulsión que se forma por la agitación de las olas, el aire y compuestos orgánicos disueltos en el mar originados por la descomposición de microalgas que actúan como tensioactivos. Luego, a mediados de abril una nueva e importante marea roja ocurrió en la Dársena del Puerto, esta vez por el crecimiento extraordinario de dinoflagelados del género *Heterocapsa*. En concordancia con estos eventos, durante el verano se registró el máximo mensual absoluto de temperatura en aguas costeras para la Estación de Observaciones Costeras (EOC): 24,3°C. Con el fin de encontrar las causas y evaluar las posibles consecuencias de estos eventos se realizaron análisis de condiciones ambientales, imágenes satelitales, fitoplancton, pigmentos y toxinas. No se detectaron especies tóxicas, toxinas, ni se registraron problemas de salud para los bañistas que utilizaron el sector costero con fines recreativos. Estos eventos pueden explicarse por la suma de factores ambientales (altas temperaturas, intensidad y dirección del viento, nutrientes). A nivel global, las floraciones de algas nocivas muestran una expansión del rango y una mayor frecuencia en las áreas costeras desde la década de 1980 en respuesta a factores climáticos y no climáticos, y es por lo tanto importante continuar con los estudios tendientes a dilucidar las causas y posibles riesgos

Palabras Clave

Marea roja, Mar del Plata, cambio climático, florecimiento extraordinario, fitoplancton nocivo.

Introducción

Los primeros días de diciembre de 2020 se alertó al INIDEP sobre la aparición de un gran número de especies de peces muertos y manchas marrones en aguas costeras de Villa Gesell, Provincia de Buenos Aires, que generó preocupación en la comunidad. Los estudios indicaron que ocurrió una floración de la diatomea no tóxica *Asterionellopsis glacialis* (Montoya et al. 2020), la cual ha sido responsable de fenómenos de mareas marrones en otras oportunidades (Méndez y Ferrari 2002). Luego, a fines de diciembre de 2020, se observaron nuevas manchas (discoloraciones), esta vez en la zona del emisario submarino de la ciudad de Mar del Plata y se reportó un nuevo florecimiento de la misma diatomea en la costa marplatense (Silva y Cozzolino 2021).

A fines de enero de 2021 ocurrió un evento inédito por su magnitud, duración e intensidad: kilómetros de una densa espuma en la costa de Mar del Plata (desde las playas del norte y hasta los acantilados en



el sur) fueron observados hasta el mes de febrero (Figura 1). Además, a mediados de abril de 2021, un nuevo evento llamó la atención: el puerto (dársena) se tiñó de un color óxido (marrón –rojizo) debido a otra floración de microalgas. En concordancia con estos eventos, se informó que durante enero se registró el máximo mensual absoluto de temperatura en aguas costeras en la Estación de Observaciones Costeras (EOC): 24,3°C (<https://www.argentina.gob.ar/noticias/la-temperatura-en-la-superficie-del-mar-promedio-214-grados-durante-enero>).

A nivel global, las floraciones de algas nocivas muestran una expansión del periodo de ocurrencia y una mayor frecuencia en las áreas costeras desde la década de 1980 en respuesta a factores climáticos y no climáticos, como el aumento de la escorrentía de nutrientes de origen fluvial (Glober 2020).

En este informe se describen los estudios realizados frente a la ocurrencia de estos eventos que preocuparon a la población (artículos periodísticos nacionales varios). Se presenta la influencia de variables ambientales como la temperatura y los vientos particulares registrados y se discuten en relación al cambio climático y al efecto sobre los fenómenos conocidos como Mareas Rojas o discoloraciones producidos por crecimientos extraordinarios de algas.



Figura 1. Fotografías de la espuma en las playas de Mar del Plata.

Materiales y métodos

En total se estudiaron 4 eventos ocurridos durante el período estival 2020-2021 (Tabla 1). Dos de ellos han sido descritos por autores de este trabajo previamente:

- Evento de los primeros días de diciembre en Villa Gesell, se presenta la descripción y los resultados en el informe Inf. Ases. y Tranf. INIDEP N°113/2020 (Montoya et al. 2020).
- Evento de fines de diciembre frente al emisario submarino, se presenta la descripción y los resultados en el informe Inf. Ases. y Tranf. INIDEP 001/2021 (Silva y Cozzolino 2021).



Tabla 1. Tipo de eventos ocurridos durante el verano 2020-2021, localización, fecha de toma de muestras y estudios realizados.

Evento	Fecha de muestra	Localización	Identificación por microscopía	Cultivo	Pigmentos	Toxinas
Mortandad de Peces	4 dic 2020	Villa Gesell	Montoya et al. 2020			Especie no tóxica
Mancha marrón	30 dic 2020	MdP*-Emisario submarino	Silva y Cozzolino. 2021			Especie no tóxica
Espuma	1-2 feb 2021	MdP-Extensión costera	Presente trabajo, (INIDEP)		Si	Especie no tóxica
Mancha marrón-rojiza	12-16 abril 2021	MdP-Dársena Puerto	Presente trabajo (UNLP)	Si, en estudio	Si	Mejillín, plancton presente trabajo

*MdP: Mar del Plata

Zonas y fechas de toma de muestras

Evento de espuma: se tomaron muestras de agua el 1 y 2 de febrero en tres sectores de la playa con presencia de abundante espuma: playa norte (pasando Avenida Constitución), zona centro y Balneario N°12 de Punta Mogotes (Figura 2).

Evento de discoloración en el Puerto: se tomaron dos muestras desde la escollera norte, en el sector interno del puerto, la primera el 12 de abril y la segunda el 16 de abril. También se colectaron muestras de mejillín (*Brachidontes rodriguezii*) para el estudio de toxinas posiblemente acumuladas en organismos bivalvos.

Las muestras de agua en ambas localidades fueron tomadas con balde y llevadas al INIDEP. Una parte se fijó con formol, otra con lugol y otra se mantuvo en una cámara de cultivo a 16 °C con un ciclo de luz / oscuridad de 12 horas hasta su posterior análisis.



Figura 2. Posición de los sitios de toma de muestras y de datos.

Temperatura del agua de superficie, Viento y Temperatura de aire superficial

Datos

Se recopilaron los datos históricos de la Temperatura en la Superficie del Mar (TSM) para el período diciembre - abril desde 2013 hasta 2021, adquiridos en la estación de Observaciones Costeras (EOC) del Servicio de Hidrografía Naval ubicada en el muelle del Club de Pescadores de Mar del Plata (Figura 2, $38^{\circ} 00' 02''$ S y $57^{\circ} 32' 18''$ O) y las mediciones manuales discretas en la Escollera Norte (ESCN) ($38^{\circ} 01' 56''$ S y $57^{\circ} 31' 46''$ O) desde 2002 hasta la fecha. La serie de tiempo que el INIDEP mantiene en la EOC, permite contar con un registro *cuasi* continuo de largo período que describe rigurosamente el ciclo estacional y sus variaciones en distintas escalas temporales. El instrumento de medición utilizado en ambos registros es un termómetro digital SBE38 de la firma Sea-Bird Electronics, con precisión 0.001°C , resolución 0.00025°C y frecuencia de muestreo de 1 dato/4 segundos. Las mediciones semanales manuales en la ESCN se acompañan con una muestra discreta de agua para medición de la salinidad (Molinari *et al*, 2021).

Se analizaron las condiciones de viento y temperatura del aire en niveles bajos de la tropósfera, las que pueden haber influido en los eventos de espuma mediante advecciones de masas de agua, cambios en la temperatura superficial del mar (TSM) y/o en el estado del mar (oleaje). Se utilizaron estimaciones satelitales de temperatura del aire cerca de la superficie (TAS; estimaciones a 1.5m-2.0m de la superficie terrestre) obtenidas del Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) a bordo del satélite AQUA, con un nivel de procesamiento 3, resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ y temporal diario, cubriendo el período 09/2002 - presente. Se analizaron las pasadas ascendentes (pasadas a las 13:30 hora local) ya que es de interés las TAS de la tarde, cuando generalmente se dan las máximas temperaturas del día. Las estimaciones de dirección e intensidad del viento a 10 m de altitud fueron obtenidas del Dispersómetro



Avanzado (ASCAT, por sus siglas en inglés) a bordo del satélite Metop-A, cuya resolución espacial es de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y temporal diario, cubriendo el período 10/2009 - presente. También se usaron estimaciones de los parámetros de viento en el nivel de 1000 hPa del Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) elaborado por la Oficina de Asimilación y Modelado Global (GMAO) de la NASA, y definido en el período 01/1980 - presente.

Metodología

Con los registros adquiridos en la EOC se calcularon los valores promedio y desvío estándar diarios; y para ambas series el promedio y desvío estándar mensual, y los valores mensuales por año. El desvío estándar se usó como medida de la variabilidad de los datos, indicando la incertidumbre de los promedios diario y mensual. Se cuantificó el apartamiento absoluto de la temperatura diaria respecto a los promedios mensuales climatológicos tanto para los valores en la EOC como para los registros en la ESCN. Para el cálculo de los apartamientos diarios se sustrajo del valor diario el límite del intervalo que establecen el promedio mensual de largo período (μ) y el desvío estándar mensual (σ), quedando definido como $[\mu \pm 3\sigma]$. Se estableció al P75 de los apartamientos absolutos como umbral de los valores significativos, considerando anómalos a los valores con apartamientos superiores a dicho umbral.

La evolución temporal y espacial de la TAS y el viento en la zona costera y mar adyacente fueron analizados mediante diagramas Hövmoller de dichas variables, promediando puntos de grilla en bandas longitudinales de 2° de arco siguiendo la línea costera (Figura 3). Lo anterior permite analizar la evolución temporal de las variables para distintas latitudes de un área. También se analizaron los campos diarios de TAS obtenidos de AIRS para observar las temperaturas en la región continental.

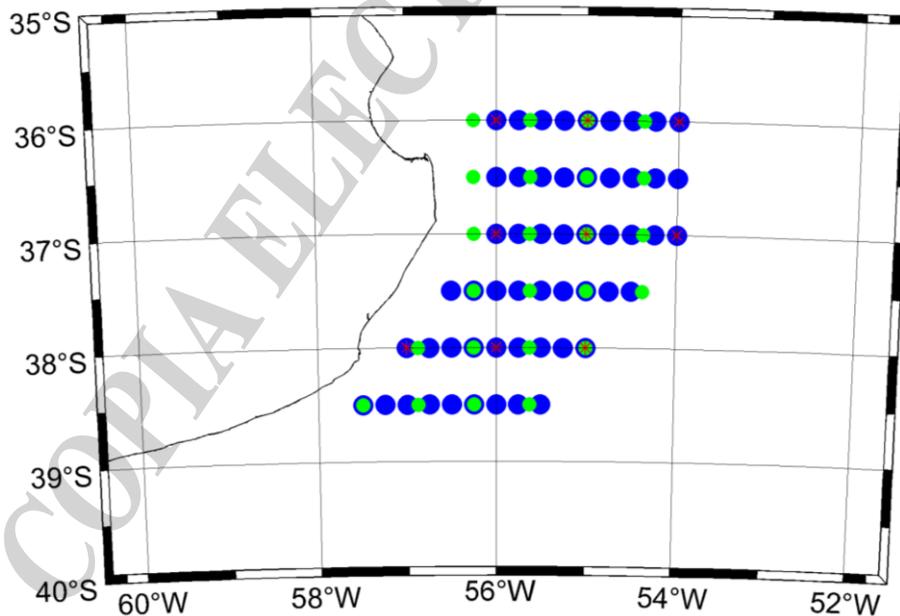


Figura 3. Puntos de grilla promediados en sentido longitudinal para cada latitud correspondientes a los productos ASCAT (puntos azules), MERRA-2 (puntos verdes) y AIRS (asteriscos rojos).



Análisis de Pigmentos y Toxinas

Una alícuota de 250 ml de la muestra de agua de mar fue filtrada con filtros de fibra de vidrio (GF/F Whatman) para el análisis de pigmentos en el fitoplancton mediante HPLC (Zapata et al. 2000). Ante la eventual presencia de microalgas nocivas o tóxicas, una alícuota de 250 ml fue filtrada y destinada para el análisis de toxinas en el plancton. El análisis de toxinas paralizantes de moluscos en los mejillines y el plancton colectado en el filtro se realizó por HPLC según el método de Oshima (1995).

Microalgas

Las muestras correspondientes al evento de espuma fueron observadas para su identificación por microscopía óptica en el INIDEP. Parte de las muestras del florecimiento ocurrido dentro del puerto se enviaron para su cuantificación e identificación taxonómica a la División Ficología de la Facultad de Cs. Naturales y Museo de la Universidad de La Plata donde se realizaron recuentos celulares con cámara Sedgwick-Rafter y un microscopio invertido con contraste de fases Leica DMIL LED. Adicionalmente, se realizaron análisis cualitativos con un microscopio de contraste de interferencia Leica DM2500, equipado con una cámara DFC420C. Para el análisis de los dinoflagelados, las alícuotas se tiñeron con CalcoFluor (Fritz & Triemer 1985) y se observaron con un microscopio de epifluorescencia Leica DM2500. A partir de las muestras vivas se realizaron aislamientos por pipeteo y dilución de los organismos responsables de la floración, los cuales se colocaron en celdas de cultivo con agua de mar artificial enriquecida con medio f/2. Los cultivos se mantuvieron a 16°C con un fotoperíodo de 12:12 luz:oscuridad.

Imágenes satelitales

Se construyeron mapas de la distribución espacial de clorofila y de la señal de turbidez de fechas cercanas a las de los eventos estudiados. Para esto se procesaron imágenes satelitales diarias de clorofila a (C1 a) de nivel L2 (1 km de resolución espacial) del sensor MODIS con SeaDas 7.5.3. La señal de turbidez se estudió de forma sencilla visualizando el área marcada con el *l2_flag* TURBIDW de Ocean Color de NASA. Este flag o “bandera” se enciende cuando la radiancia emergente de la superficie del agua es mayor a la esperada en la zona roja e infrarroja del espectro, posiblemente debido a la presencia de sedimentos.

Resultados

Condiciones ambientales

Se presentan los valores diarios de la TSM durante el periodo de estudio, (diciembre 2020-abril 2021) en los dos puntos de mediciones (EOC y ESCN), contrastados con los valores medios mensuales climatológicos de toda la serie [2013 – 2021] en la EOC (Figura 4), también se detallan los mayores apartamientos/anomalías en la EOC y en la ESCN (Figura 5).

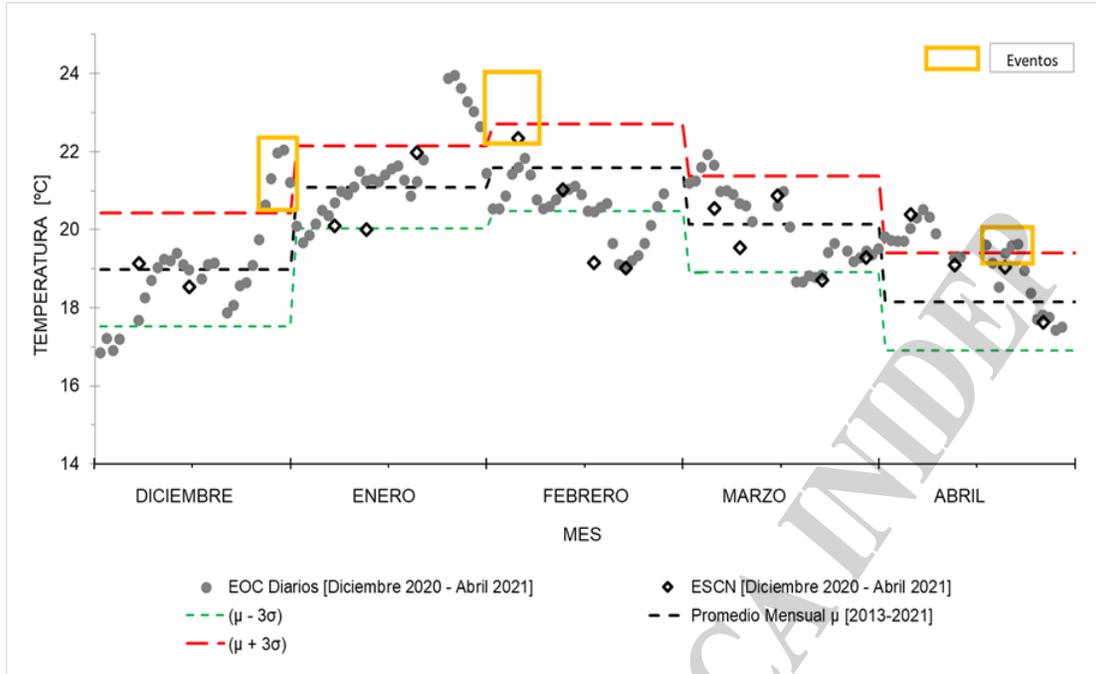


Figura 4. Registros diarios de la temperatura en la superficie del mar en el periodo de estudio, calculados en la estación EOC (puntos grises y medidos en la ESCN (rombos negros), superpuestos a los valores medio mensuales μ de la serie EOC [2013-2021] (línea de guiones negros) y a los límites establecidos con el desvío estándar mensual como medida de la barra de error ($[\mu \pm 3\sigma]$). En recuadros amarillos se señalan las fechas de los eventos estudiados.

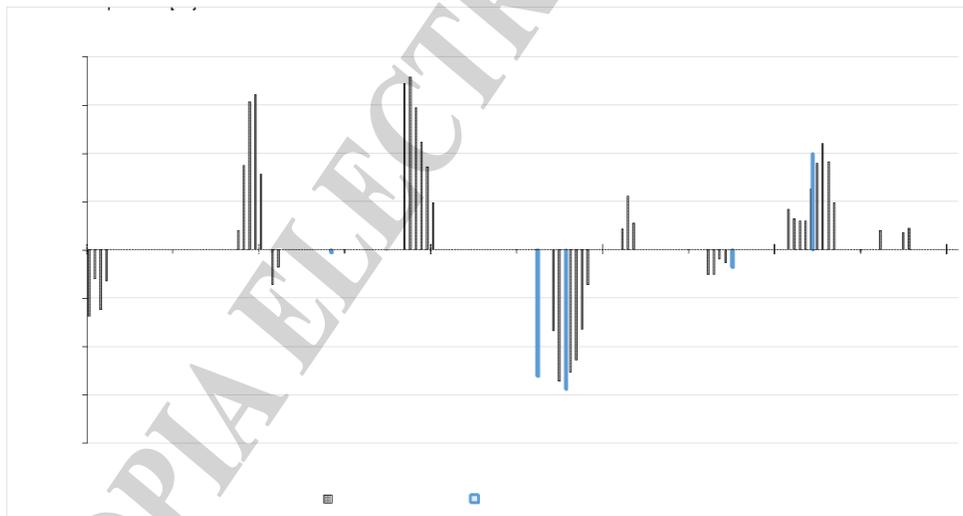


Figura 5. Apartamientos de los valores diarios en la EOC (barras negras) y de los registros en el ESCN (barras azules) en diciembre 2020-abril 2021, respecto a los valores medios mensuales climatológicos respectivos, que superan el P75.

Se destacan periodos con anomalías térmicas positivas persistentes y significativas que se corresponden con las ocurrencias de manchas, espuma y florecimientos algales (Figura 6) según la siguiente descripción:

- **del 27 al 31 de diciembre de 2020:** aumento de la TSM registrado en la estación EOC, con apartamientos respecto a los valores mensuales de hasta 1,6°C. La TSM media diaria del 29 y 30 de diciembre 2020 fue superior al límite diario establecido como normal, con apartamientos de hasta 0,4°C (Fig. 4 y 5).

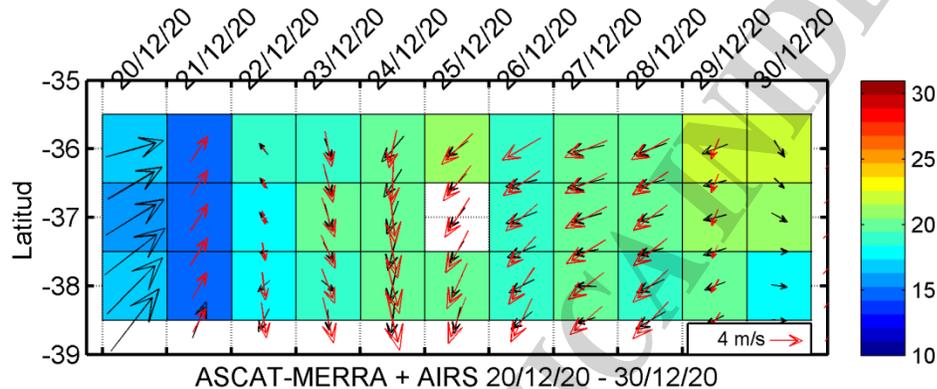


Figura 6. Diagrama Hövmoller entre el 20 y el 30 de diciembre de 2020. En sombreado TAS y vectores para las estimaciones de viento de MERRA-2 (vectores rojos) y ASCAT (vectores negros). La ausencia de vectores y cuadros blancos indican dato faltante.

En referencia a las condiciones de viento y TAS predominantes durante los días previos y durante el evento (Fig. 6), se produjo un cambio en la dirección del viento desde el día 22 de diciembre, cuando se advierte viento con componente Norte a lo largo de la zona costera acompañado por un progresivo aumento en las TAS sobre la región marítima, particularmente entre el 28 y 30 del mes, y al norte de la región analizada. Mientras tanto, sobre el continente se registraron temperaturas superiores a la media climatológica de temperatura máxima del correspondiente mes (figura no mostrada) en días previos al evento. Lo anterior sugiere que el incremento en las TSM en la zona de Mar del Plata (y por ende sobre Villa Gesell) pudo ser producto de las altas temperaturas del aire y por advección de masas de agua producto de la persistencia de viento con componente norte durante los días previos.

- **del 25 al 30 de enero de 2021** (Figura 7): aumento de la TSM registrado en la EOC, con apartamientos respecto a los valores medios mensuales de hasta 1,8°C, que se corresponde con días previos al evento de aparición de espuma en la costa de Mar del Plata. Estos registros también presentan apartamientos positivos de hasta 1°C respecto al límite del valor medio diario (Fig. 4 y 5).

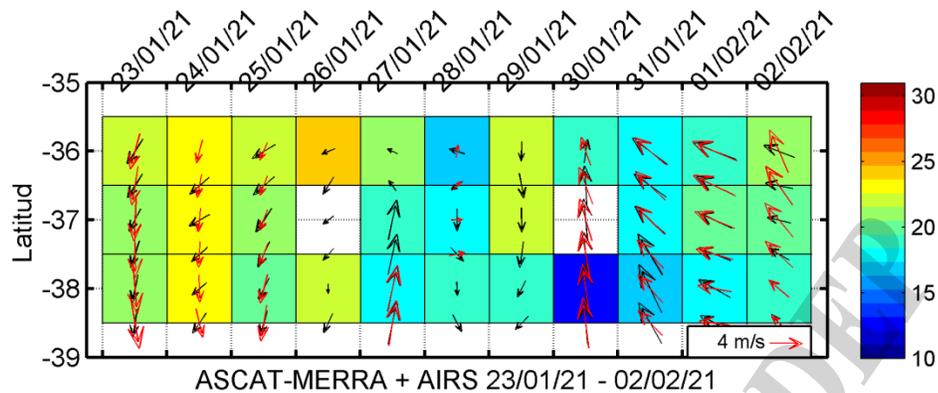


Figura 7. Ídem Figura 6, pero para el periodo 23 de enero a 2 de febrero de 2021.

Respecto a las condiciones meteorológicas, hasta el día 26/01 se observó viento moderado del sector norte y TAS cercanas a los 24,0°C sobre la región marítima (Fig. 7). Lo anterior sugiere la advección de aguas cálidas desde el sector norte y el calentamiento del agua por flujos de calor desde la atmósfera. Hacia el día 26/01 se produjo un descenso en la intensidad del viento, lo que favoreció un marcado incremento en las TSM respecto a los días previos, producto del debilitamiento del proceso de mezcla por viento. Además, durante esos días las TAS sobre la zona continental fueron cercanas a los 28,0°C (figura no mostrada), lo que denota que una masa de aire cálido afectó la región de interés. Estas condiciones se vieron interrumpidas hacia el día 27/01, momento en el que se observó un cambio en la dirección del viento al cuadrante Sur, acompañado de un descenso en la TAS. Vientos moderados con componente norte reaparecieron entre los días 28 y 29 de enero, produciendo un nuevo aumento en la TAS hacia el último día. Desde el 30/01 se generó un marcado descenso en la TAS y un considerable incremento en la intensidad del viento, además del cambio en su dirección al cuadrante SE, claro indicio del pasaje de un frente frío sobre la región, lo que generó un notable cambio en el estado del mar (oleaje) desde el día 30/01. De lo anterior puede inducirse que las TSM en Mar del Plata se vieron afectadas por ambos efectos, altas TAS durante horas de luz y por advección de aguas relativamente más cálidas desde el N (lo último particularmente durante la semana previa al evento).

- **1° al 9 de abril de 2021** en la EOC (Figura 8), este último con un registro también anómalo en la ESCN, y del 17 al 22 de abril en la EOC: La coloración rojiza del agua en el puerto asociada a una floración de microalgas a mediados de abril, es posterior al aumento de la TSM registrado en la EOC y en la ESCN entre el 1 y el 9 de abril de 2021, con apartamientos de hasta 1,1°C; y se corresponde con el aumento de menor intensidad registrado entre el 17 y el 22 de abril en la estación EOC (Fig. 4 y 5).

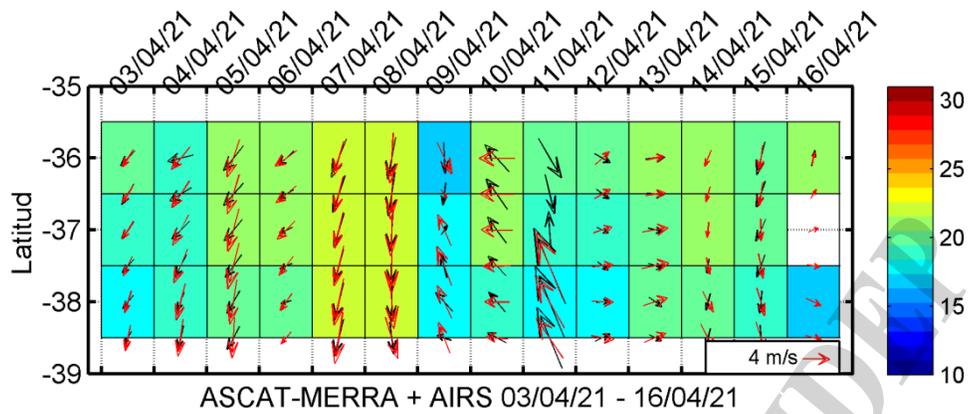


Figura 8: Ídem Figura 6, pero para el periodo 3 al 16 de abril de 2021.

En la Fig. 8 se advierte que prevalecen vientos con componente norte entre los días 3 y 8 de abril, generando además un incremento en su intensidad hacia los días 7 y 8. Lo anterior fue acompañado por un aumento en las TAS especialmente hacia los últimos dos días (TAS cercanas a los 22,0°C sobre la zona marítima), lo que sugiere que se trató de una advección de mayores temperaturas desde menores latitudes hacia la región de interés. Hacia el 09/04 se generó la rotación del viento al cuadrante SE, siendo el día 11/04 el que mostró la mayor intensidad de viento y por ende peores condiciones de mar, en latitudes de Mar del Plata. Lo anterior fue acompañado por un marcado descenso en la TAS. Entre los días 14 y 15 de abril el viento nuevamente tuvo componente norte y si bien se dio un incremento en las TAS, el mismo no fue tan intenso como durante los días 7 y 8 del mismo mes. En relación a los eventos reportados en este informe, en la Figura 9 se observan valores de baja salinidad medidos en ESCN entre fines de marzo y mediados de abril 2021, con apartamientos por debajo del límite inferior del rango de dispersión mensual [promedio mensual - 3 desvíos estándar mensual] del orden de -0,6.

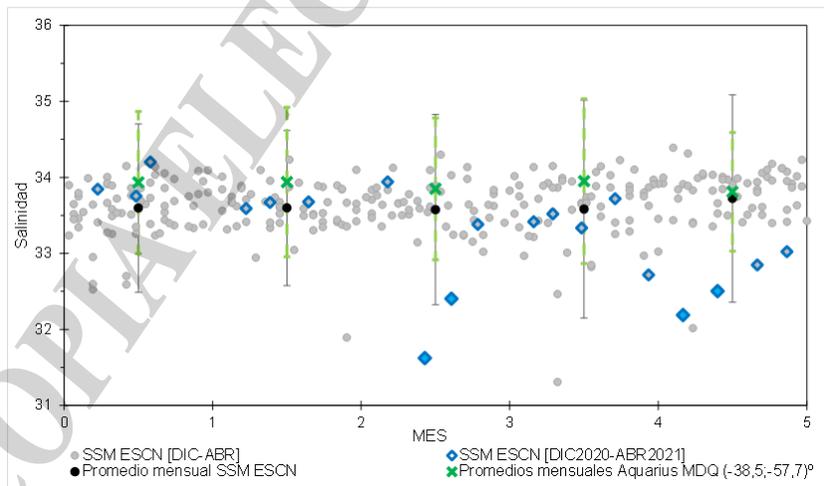


Figura 9: Valores de salinidad medidos en la ESCN entre Dic2002 y Abr2021 (puntos grises) y valores medios mensuales (puntos negros) y su correspondiente medida de dispersión (3 desvíos estándar, barras negras). Se destacan con rombos azules las mediciones del periodo Dic2020-Abr202.



Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales del color del océano muestran una señal de alta concentración de clorofila en todo el período (diciembre 2020 a abril 2021), que se extiende en dirección norte-sur en el litoral costero (Figura 10). Pero a su vez, hay una señal de turbidez en el mismo sector que indica que los niveles de clorofila pueden estar sobreestimados. Refuerzan esta afirmación las altas concentraciones de otros productos satelitales, como el carbono orgánico disuelto y absorción del material particulado + CDOM (datos no mostrados) observados para el mismo período y lugar. Los mapas muestran en color marrón los píxeles con la señal de turbidez, lo cual indica que el agua contenía alta concentración de sedimentos. Notar, por ejemplo, que en la imagen del 23 de enero se observa en la zona del litoral costero un sector en color gris (píxeles para los que no hay dato estimado de Cl a), lo cual indica que la concentración de sedimentos era aún mayor y, por lo tanto, estos píxeles fueron excluidos del cálculo de Cl a.

Análisis de pigmentos del fitoplancton

Los pigmentos hallados en la muestra de fitoplancton correspondiente al evento de espuma (Figura 11), fueron los característicos de las diatomeas: fucoxantina ($3,85 \mu\text{g l}^{-1}$); diadinoxantina ($0,77 \mu\text{g l}^{-1}$); clorofila c_2 ($0,74 \mu\text{g l}^{-1}$); c_3 ($0,260 \mu\text{g l}^{-1}$) y c_1 ($0,077 \mu\text{g l}^{-1}$) y la concentración de Cl a fue de $6,36 \mu\text{g l}^{-1}$. Otros pigmentos accesorios estuvieron presentes en menor concentración: peridinina, marcador de dinoflagelados ($0,09 \mu\text{g l}^{-1}$); clorofila b, marcador de clorofitas ($0,42 \mu\text{g l}^{-1}$) y alloxantina, marcador de criptofitas ($0,056 \mu\text{g l}^{-1}$), indicando que estos grupos fitoplanctónicos estaban en menor proporción.

En cambio, la composición pigmentaria hallada en la muestra del puerto el 13 de abril fue diferente. La concentración de Cl a ($33,03 \mu\text{g l}^{-1}$) fue aproximadamente 5 veces mayor a la del evento de espuma, indicando una floración fitoplanctónica. El principal carotenoide hallado fue peridinina en una concentración de $19,49 \mu\text{g l}^{-1}$, lo cual explicaría el color de la marea roja observada. Los principales pigmentos hallados corresponden también al grupo de dinoflagelados: dinoxantina ($6,67 \mu\text{g l}^{-1}$); clorofila c_2 ($7,40 \mu\text{g l}^{-1}$) y $\beta\beta$ caroteno ($0,11 \mu\text{g l}^{-1}$). Concentraciones menores de otros pigmentos (fucoxantina $1,33 \mu\text{g l}^{-1}$; alloxantina $1,84 \mu\text{g l}^{-1}$), indicaron que fue un florecimiento casi monoespecífico de dinoflagelados.

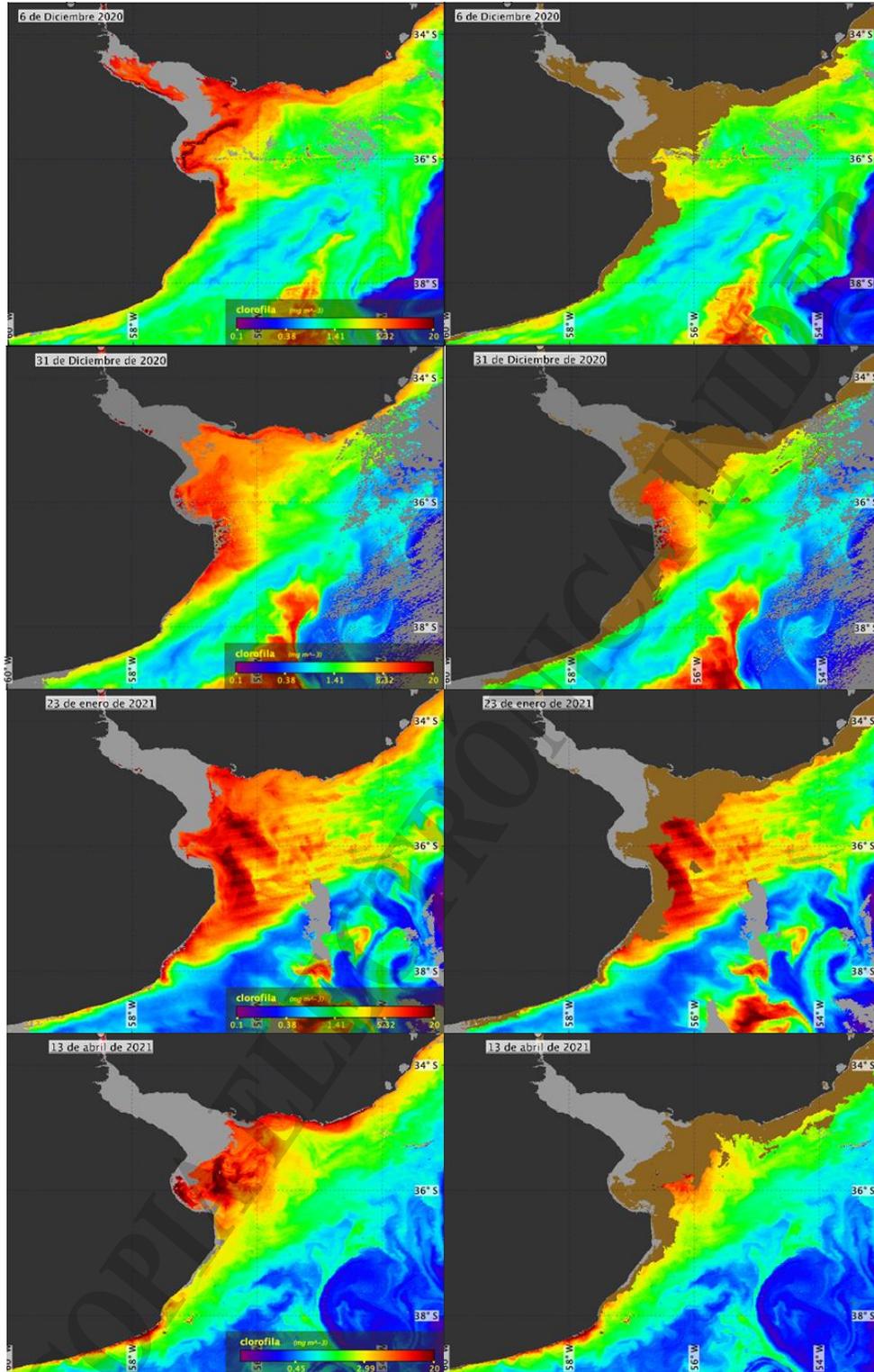


Figura 10. Imágenes satelitales diarias de clorofila a sensor MODIS en las fechas próximas a los eventos. Las imágenes de la derecha muestran en color marrón la señal correspondiente a turbidez.

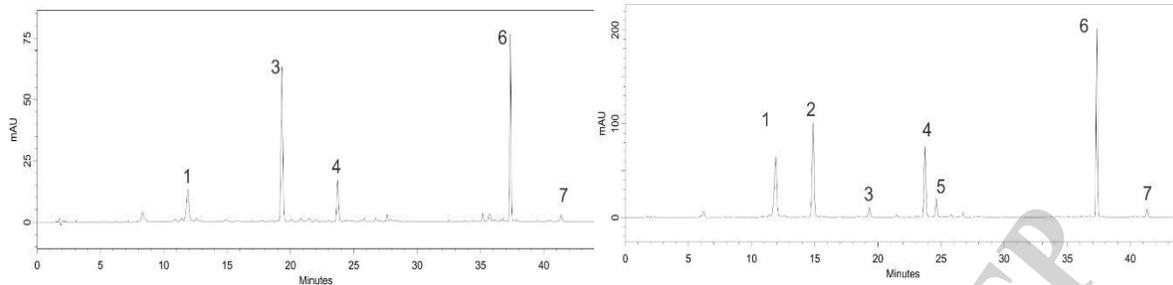


Figura 11. Cromatogramas HPLC de pigmentos del fitoplancton en la muestra del evento de espuma en Punta Mogotes a principios de febrero (izquierda) y en la muestra en la dársena del puerto a mediados de abril (derecha).

Análisis de fitoplancton

En la muestra de fitoplancton correspondiente al evento de espuma se observaron especies típicas de la región costera de Mar del Plata en verano, siendo notoria la presencia de restos de *Noctiluca sp.*

En cuanto a las muestras tomadas dentro del puerto el 12 de abril se observó un florecimiento extraordinario y casi monoespecífico de un pequeño dinoflagelado, con una abundancia celular de $7,7 \times 10^6$ cél/L, que representó el 87,8 % del total de células. Durante el muestreo siguiente, del 16/4, la abundancia del dinoflagelado dominante fue de $1,4 \times 10^6$ cél/L, representando el 65,7 % del total de células. El dinoflagelado responsable de la floración mostró tecas delicadas, de aspecto peridinial, con un largo de 12,2-18,1 μm (media y desvío estándar = $14,5 \pm 1,6 \mu\text{m}$; N= 25) y un ancho de 8,6-11,3 μm (media y desvío estándar = $10,0 \pm 0,7$; N= 25) en muestras fijadas con Lugol, y un largo de 15,4-22,5 μm (media y desvío estándar = $19,5 \pm 1,9 \mu\text{m}$; N= 20) y ancho de 10,2-16,1 μm (media y desvío estándar = $12,6 \pm 1,4 \mu\text{m}$; N= 20) en muestras fijadas con formol. La epitoca, en la que se destaca la presencia de un pirenoide, es de aproximadamente el mismo tamaño que la hipoteca, que presenta un núcleo conspicuo (Figura 12 a-b). Los análisis cualitativos con microscopía de fluorescencia mostraron una tabulación coincidente con la del género *Heterocapsa* (Figura 12 c-f), cuya fórmula general es Po, cp, X, 5', 3a, 7'', 6c, 5s, 5''', 2'''. Las células aisladas a partir de la muestra viva se dividieron con éxito en las placas de cultivo y fueron traspasadas a frascos de cultivo de 50 ml, donde actualmente se mantienen vivas para la realización de estudios moleculares y ultraestructurales complementarios.

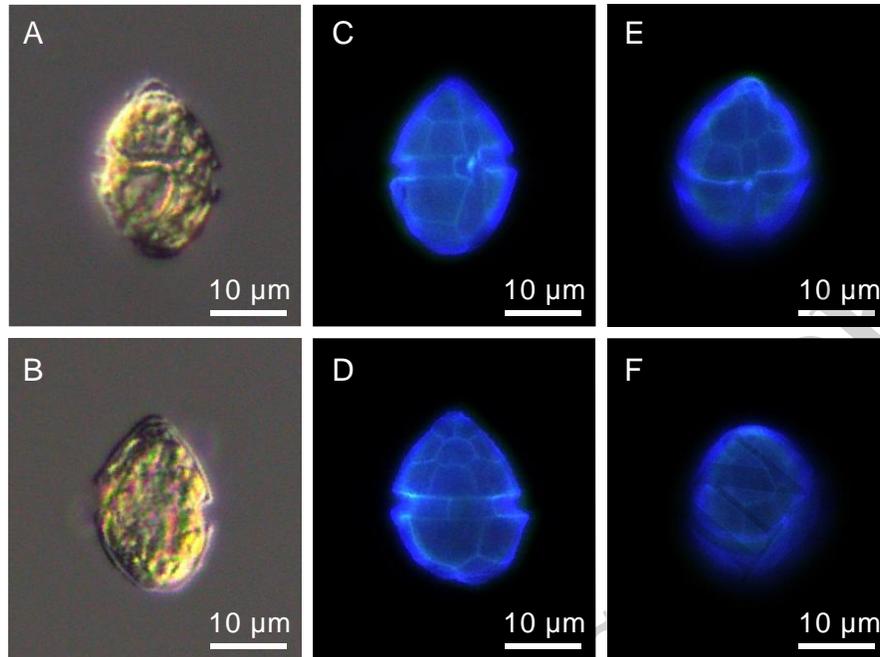


Figura 12. Microfotografías del dinoflagelado responsable de la discoloración en el puerto de Mar del Plata durante abril de 2021.

Análisis de toxinas

Dado que en una primera aproximación se identificó como probable responsable de la intensa discoloración dentro del puerto a mediados de abril, un dinoflagelado del género *Gymnodinium*, y ante la posibilidad de que se tratara del dinoflagelado productor de Toxinas Paralizantes de Moluscos (TPM) *Gymnodinium catenatum*, se realizó inmediatamente el análisis de dichas toxinas, mostrando el mismo resultado negativos (Figura 13).

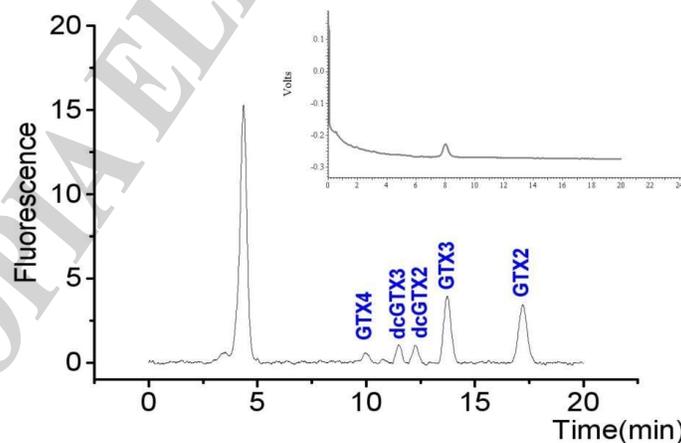


Figura 13. Cromatograma de gonyautoxinas en *Gymnodinium catenatum* (tomado de Montoya et al. 2004) e inserto de la muestra de fitoplancton del puerto con ausencia de toxinas.



Discusión

Este estudio se originó por la preocupación en el ámbito público en plena temporada estival en Mar del Plata: una sucesión de eventos de floraciones de fitoplancton sorprendió por su magnitud, frecuencia e intensidad extraordinaria. Los eventos aquí descritos pueden explicarse por la suma de factores ambientales concurrentes (altas temperaturas, intensidad y dirección del viento, materia orgánica en suspensión).

Las discoloraciones producidas por la diatomea *Asterionellopsis glacialis* ocurrieron en el momento de incremento en las TSM en la zona de Mar del Plata (y por ende sobre Villa Gesell) debido a las altas temperaturas del aire y por advección de masas de agua producto de la persistencia de viento con componente Norte durante los días previos. Las manchas marrones observadas a principio de diciembre en Villa Gesell y a fines del mismo mes en la playa Las Delicias en Mar del Plata hacen suponer que el florecimiento de *Asterionellopsis glacialis* tuvo una extensión e intensidad inusual en magnitud (Montoya et al. 2020; Silva y Cozzolino 2021). La presencia de este tipo de diatomeas es frecuente en las costas bonaerenses y no presentan riesgos de toxicidad (Méndez y Ferrari 2002; Sunesen y Sar 2007). Silva y Cozzolino (2021) presentan imágenes del color del mar con una extensa mancha de clorofila proveniente del norte. Además, se observó una importante señal del *flag* de turbidez, probablemente debida a la presencia de sedimentos y material orgánico en suspensión. Es importante destacar que entre el 20 y 27 de noviembre, se registró una floración extraordinaria de cianobacterias en el Río de la Plata (Echenique et al. 2020) que generó una gran concentración de materia orgánica detectable por imagen satelital de falso color. Esta materia orgánica puede haber sido transportada hasta las costas de Villa Gesell y Mar del Plata, debido a los vientos preponderantes del sector norte, aportando no sólo a la señal de turbidez, sino también al contenido de nutrientes en disolución que favoreció el crecimiento de las diatomeas. *A. glacialis* se resuspende del hábitat epibentónico cercano a la costa al romper las olas y se acumula en la zona de oleaje. Este proceso controlado físicamente, da como resultado una gran concentración de biomasa de fitoplancton que puede generar espuma además de las típicas manchas color café (Rörig y García 2003).

El evento de formación de espuma en la costa fue de gran magnitud en intensidad y extensión, sorprendió a marplatenses y turistas, fue un evento extraordinario. La espuma de mar es una emulsión que se forma por la agitación de las olas, el aire y compuestos orgánicos disueltos en el mar que actúan como tensioactivos (detergentes). Diversas publicaciones dan cuenta que una parte significativa de la actividad tensioactiva en una columna de agua de mar se debe a la producción del fitoplancton (Zutic et al. 1981; Schilling y Zessner 2011). A menudo, los ciudadanos lo asumen como de origen antropogénico porque son estéticamente desagradables, pero con frecuencia aparecen en ambientes prístinos. A diferencia de la contaminación química "oculta", p. ej. metales pesados, plaguicidas, microplásticos, etc., la visibilidad de la espuma alarma al público. Schilling y Zessner (2011) realizan una extensa revisión y concluyen que la espuma marina resulta principalmente del enriquecimiento de sustancias tensioactivas exudadas por (i) floraciones de fitoplancton, (ii) algas marinas o (iii) incluso



plantas terrestres en las microcapas superficiales (límite aire-agua). El material enriquecido se convierte en espuma por la acción de las olas y se arrastra a la orilla, donde se acumula en capas.

El evento ocurrido a principio de febrero fue precedido por días de alta temperatura y viento calmo, condiciones que favorecen el crecimiento del fitoplancton. Luego, las condiciones del viento cambiaron a moderados y a fuertes, produciendo agitación en las olas y favoreciendo la formación de espuma. Para que esto ocurra debe coincidir una floración extraordinaria de microalgas que al romperse por el efecto de las olas liberan proteínas, lípidos y otras sustancias orgánicas de su interior. La mayor parte de la espuma marina no es dañina para los humanos y, a menudo, es una indicación de un ecosistema oceánico productivo. Sin embargo, cuando las grandes floraciones de algas nocivas se descomponen cerca de la costa, existe la posibilidad de que se produzcan impactos en la salud humana y el medio ambiente y es por lo tanto necesario identificar la fuente, es decir, el tipo de algas que ocasionó la espuma. Es importante destacar que no se registraron problemas de salud para los bañistas que utilizaron el sector costero con fines recreativos.

El análisis del fitoplancton de las muestras de espuma presentó restos de la especie de dinoflagelado *Noctiluca sp.* Esta especie, es frecuente en las costas de Mar del Plata y posee una enzima que, cuando reacciona con oxígeno, provoca un destello de luz bioluminiscente, de la que el organismo recibe su nombre. El dinoflagelado heterótrofo *Noctiluca scintillans* toma los pigmentos de las microalgas de las cuales se alimenta y causa discoloraciones superficiales de grandes extensiones, principalmente en bahías o estuarios protegidos, pero hasta la fecha esta especie no ha sido asociada a eventos de espuma. Los pigmentos hallados en este estudio dan cuenta que la comunidad estuvo formada principalmente por diatomeas del grupo pigmentario Tipo 2, dado la presencia de clorofila c1 y c3 (Roy et al. 2011). Las especies fitoplanctónicas que han sido citadas como principales formadores de espuma son la haptofita *Phaeocystis pouchetii* (Batje y Michealis 1986; Kesaulya et al. 2008, Seuront et al., 2006), y los dinoflagelado *Cochlodinium catenatum* (Guzmán et al. 1990), *Akashiwo sanguinea* (Jones et al. 2017), *Karenia brevis* (Pierce et al. 2003) y las cianobacterias (Landsberg et al. 2020). Además de espuma, algunas de estas especies producen efectos nocivos o tóxicos.

Por otra parte, la discoloración dentro del puerto tuvo otras características, coincidió con un descenso en la salinidad y valores de temperatura superiores a la media histórica. En este sector, recientemente se realizaron obras para el desagüe de pluviales de la cuenca del “Arroyo del Barco”, siendo posible que ocurriera un importante aporte de agua dulce a través de este sistema, evento que explicaría la disminución observada en los valores de salinidad. El puerto de Mar del Plata es un sistema semicerrado y como en otras dársenas, suele presentar floraciones de microalgas que se ven favorecidas por la estabilidad de la columna de agua y el aporte de nutrientes de origen antrópico. El nivel de clorofila hallado $33,03 \mu\text{g l}^{-1}$ en comparación con $6,36 \mu\text{g l}^{-1}$ durante el evento de espuma, nos permite calificar al evento como una floración (Schalles 2005); y la alta concentración de peridina ($19,49 \mu\text{g l}^{-1}$) nos confirma que fue un crecimiento extraordinario de un dinoflagelado. El análisis microscópico de las muestras obtenidas dentro del puerto confirmó la presencia en muy altas concentraciones celulares del dinoflagelado *Heterocapsa sp.*, un género que posee actualmente unas 17 especies aceptadas (Salas et al. 2014). Los organismos observados poseen características morfológicas



que coinciden parcialmente con las de la especie *Heterocapsa claromecoensis*, descrita recientemente en base a una cepa proveniente de la costa de la provincia de Buenos Aires (Sunensen et al. 2020). Sin embargo, la identificación a nivel específico de especies del género *Heterocapsa* requiere de análisis ultraestructurales y moleculares complementarios, que aún no han podido realizarse. En otras partes del mundo, se ha descrito como tóxica a *H. circularisquama* que tiene un efecto específicamente letal en los bivalvos (Horiguchi 1995) y *H. bohainensis*; ambas especies con actividad hemolítica (Zhang et al. 2019). Estudios anteriores han demostrado la presencia del dinoflagelado tóxico *Gymnodinium catenatum* en las aguas costeras bonaerenses durante verano y otoño con alta concentración de toxinas paralizantes en los bivalvos de Santa Teresita, San Clemente del Tuyú, Mar de Ajó y Mar Chiquita (Montoya et al. 2006). Es por lo tanto importante identificar a los dinoflagelados que producen discoloraciones en el área.

Se ha predicho que el cambio climático tendrá considerables efectos en los ambientes marinos y de agua dulce. Estos efectos, junto con la contaminación y eutrofización, pueden causar floraciones algales nocivas (FAN) con mayor frecuencia, en más cuerpos de agua y ser más intensas en algunas regiones (Hallegraeff 2010; Gobler 2020). La serie de eventos aquí descritos, comienzan dentro del Río de la Plata, con una floración extraordinaria de cianobacterias que fue asociada a una bajante histórica del río Paraná. Las FAN responden a causas multifactoriales, estudiarlas significa analizar un recorte de la realidad que incluyen aspectos físicos, biológicos, sociales, económicos y políticos. El estudio de este tipo de eventos, donde la acción humana aparece como responsable, supone la consideración de un conjunto de elementos intervinientes, relaciones e interacciones. Según Rolando García (2006), podemos considerar este objeto de estudio como un sistema complejo y la metodología de trabajo como interdisciplinaria, es por lo tanto, un nuevo desafío.

Bibliografía

- BATJE M, MICHEALIS H. 1986. *Phaeocystis pouchetii* blooms in the East Frisian coastal waters (German Bight, North Sea). *Marine Biology* 93, 21-27.
- ECHENIQUE RO, GUERRERO JM, LAMARO AA. 2020. Floraciones de cianobacterias en el Río de la Plata . Informe División Ficología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo <https://www.museo.fcnym.unlp.edu.ar/home/floraciones-de-cianobacterias-en-el-rio-de-la-plata-351>
- FRITZ L, TRIEMER RE. 1985. A rapid simple technique utilizing Calcofluor white M2R for the visualization of dinoflagellate thecal plates. *J. Phycol.* 21: 662-664.
- GARCÍA R. 2006. Sistemas complejos: conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Barcelona: Editorial Gedisa. 202p
- GOBLER JC. 2020 Climate Change and Harmful Algal Blooms: Insights and perspective. *Harmful Algae*, Vol. 91, 101731, ISSN 1568-9883.
- GUZMAN HM., CORTES J, GLYNN PW, RICHMOND RH. 1990. Coral mortality associated with dinoflagellate blooms in the eastern Pacific (Costa Rica and Panama). *Marine Ecology Progress Series* 60, 299-303.



- HALLEGRAEFF GM. 2010. Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: a formidable predictive challenge. *J. Phycol.* 46 (2), 220–235.
- HORIGUCHI T. 1995. *Heterocapsa circularisquama* sp. nov. (Peridinales, Dinophyceae): a new marine dinoflagellate causing mass mortality of bivalves in Japan. *Phycol. Res.* 43 (3), 129–136.
- IPCC, 2019. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N.M. (Eds.), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Keeling, R.F., Körtzinger, A., Gruber.
- KESAULYA I, LETERME SC, MITCHELL JG, SEURONT L. 2008. The impact of turbulence and phytoplankton dynamics on foam formation, seawater viscosity and chlorophyll concentration in the eastern English Channel. *Oceanologia* 50, 167-182.
- LANDSBERG JH, HENDRICKSON J, TABUCHI M, KIRYU Y, WILLIAMS BJ, TOMLINSON MC. 2020. A large-scale sustained fish kill in the St. Johns River, Florida: A complex consequence of cyanobacteria blooms, *Harmful Algae*. Volume 92.
- MÉNDEZ S, FERRARI G. 2002. Floraciones algales nocivas en Uruguay: antecedentes, proyectos en curso y revisión de los resultados. En: SAR EA, FERRARIO ME, REGUERA B (eds.). Floraciones algales nocivas en el cono sur americano: 269-288. Instituto Español de Oceanografía, Vigo, España.
- MOLINARI G, MAENZA R A., PRARIO B , CUBIELLA A. 2021. La temperatura en la superficie del mar en Mar del Plata: Series de Mediciones en el Muelle del Club de Pescadores y en la Escollera Norte [2013-2019]. Informe Investigación INIDEP N° 3/2021
- MONTOYA N, BENAVIDES H, MATTERA B. 2020. Informe sobre mortandad de peces y moluscos en Villa Gesell a principios de diciembre de 2020. Inf Ases y Tranf. INIDEP N° 113/2020.
- MONTOYA NG, AKSELMAN R, CARIGNAN MO, CARRETO JI. 2006. Pigment profile and toxin composition during a red tide of *Gymnodinium catenatum* (Graham) and *Myrionecta rubra* (Lohman) Jankowski in Mar del Plata coastal waters. *African J Marine Sci.* 28: 199-202.
- OSHIMA Y. 1995. Postcolumn derivatization liquid chromatography method for paralytic shellfish toxins. *Journal of AOAC International.* N° 78 528-532.
- PARRISH J, PUNT JK, TRAINER AE, KUDELA VL, LANG R, BRANCATO J, ODELL MS , HICKEY AB. 2017. A mass mortality event of marine birds in the Northeast Pacific caused by *Akashiwo sanguinea*. *Marine Ecology Progress Series.* 579. 10.3354/meps12253.
- PIERCE RH, HENRY, M. S., BLUM, P. C., LYONS, J., CHENG, Y. S., YAZZIE, D., & ZHOU, Y. 2003. Brevetoxin concentrations in marine aerosol: human exposure levels during a *Karenia brevis* harmful algal bloom. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 70(1), 161–165.
- RÖRIG LR, GARCIA, V MT. 2003. Accumulations of the suf-zone diatom *Asterionellopsis glacialis* (Castracane) Round in Cassino Beach, Southern Brazil, and its relationship with environmental factors. *J. Coast. Res.*, n. sp 35, p. 167-177, 2003.



- ROY S, LLEWELLYN AC, EGELAND SE, JOHNSEN G. 2011. Phytoplankton Pigments Characterization, Chemotaxonomy and Applications in Oceanography. Part of Cambridge Environmental Chemistry Series, pp, 845.
- SALAS R, TILLMANN U, KAVANGH S. 2014. Morphological and molecular characterization of the small armoured dinoflagellate *Heterocapsa minima* (Peridiniales, Dinophyceae). European Journal of Phycology, 49: 413–428.
- SCHALLES J. 2005 Optical remote sensing techniques to estimate phytoplankton chlorophyll a concentrations in coastal. In book: Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes. DOI: 10.1007/1-4020-3968-9_3.
- SCHILLING K, ZESSNER M. 2011 Foam in the aquatic environment. Water Research 45, 4355-4366.
- SEURONT L, VINCENT D, MITCHELL JG. 2006. Biologically induced modification of seawater viscosity in the Eastern English Channel during a *Phaeocystis globosa* spring bloom. Journal of Marine Systems 61, 118.
- SILVA R, COZZOLINO E. 2020. Discoloración marrón eventual, en la playa “las Delicias” de Mar del Plata, 30 de diciembre 2020. Inf Ases y Tranf. INIDEP N° 001/2021.
- STEIDINGER K. 2009. Historical perspective on *Karenia brevis* red tide research in the Gulf of Mexico.
- SUNESSEN I, RODRÍGUEZ F, TARDIVO KUBIS JA, AGUIAR JUÁREZ D, RISSO A, LAVIGNE AS, WIETKAMP S, TILLMANN U, SAR EA. 2020. Morphological and molecular characterization of *Heterocapsa claromecoensis* sp. nov. (Peridiniales, Dinophyceae) from Buenos Aires coastal waters (Argentina), European Journal of Phycology, 55:4, 490-506.
- SUNESSEN I, SAR EA. 2007. Diatomeas marinas de aguas costeras de la provincia de Buenos Aires (Argentina). III Géneros potencialmente nocivos *Asterionellopsis*, *Cerataulina*, *Ceratoneis* y *Leptocylindrus*. Revista Chilena de Historia Natural, 80: 493-507, 2007.
- ZAPATA M, RODRÍGUEZ F, GARRIDO JL. 2000. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phases. Mar. Ecol. Prog. Ser. 195: 29-45.
- ZHANG Y, FENG T, QU J, SUN NA, LIU L. 2019. Toxicity and haemolytic activity of a newly described dinoflagellate, *Heterocapsa bohainensis* to the rotifer *Brachionus plicatilis*, Harmful Algae, Volume 84,112-118.
- ŽUTIĆ V, ČOSOVIĆ B, MARČENKO E, BIHARI N. 1981. Surfactant production by marine phytoplankton. Mar Chem 10: 505–520.