

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

LICEANCIATURA EN OCEANOLOGÍA

**“Condiciones hidrográficas cerca de la costa del noroeste
de Baja California durante marzo 2017.”**

TESIS

Para obtener el título de:

OCEANÓLOGO



Presenta:

Andrea Mitre Apáez

Director de Tesis

Dr. David Alberto Rivas Camargo
Departamento de Oceanografía Biológica, CICESE.

Sinodales

Dra. Mary Carmen Ruiz De La Torre
Departamento de Biología, FCM, UABC.

Dr. Ernesto García Mendoza
Departamento de Oceanografía Biológica, CICESE.

Ensenada, Baja California, México. 2019

**“Condiciones hidrográficas cerca de la costa del noroeste
de Baja California durante marzo 2017.”**

**TESIS
QUE PRESENTA:**

ANDREA MITRE APÁEZ

APROBADA POR:



Dr. David Alberto Rivas Camargo
Director



Dra. Mary Carmen Ruiz de la Torre
Secretario



Dr. Ernesto García Mendoza
Sinodal

Resumen

Durante el periodo del 23 a 25 de marzo de 2017 se realizó un crucero oceanográfico con el fin de documentar la presencia de especies de fitoplancton con potencial ictiotóxico, que explicara la mortandad de atunes en los encierros localizados en Bahía de Todos Santos, Salsipuedes e Islas Coronado, Baja California. Se obtuvieron datos de salinidad, temperatura, oxígeno disuelto y señal de fluorescencia (mediante un CTD) en un total de 58 estaciones que comprenden desde la línea de costa hasta más allá del borde de la plataforma continental (profundidades máximas alrededor de 1000 m). Además, se tomaron muestras de agua para verificar la presencia de especies ictiotóxicas que provocaron mortandades de peces pelágicos.

El objetivo de este trabajo fue analizar y determinar el comportamiento las variables físicas, a través de un análisis de las características termohalinas y cómo estas interacciones favorecieron a las especies de *Chattonella*, spp., y *Co. fulvescens*. Los resultados de estos análisis se expresan mediante diagramas termohalinos (T-S) para identificación de masas de agua, y mapeos de la superficie del océano y la columna de agua.

La zona de estudio fue influenciada por el evento anómalo conocido como “El Blob”, que estuvo presente desde 2013 al 2016, presentando temperaturas hasta 19°C para las fechas en las que se realizó este estudio. Las temperaturas registradas fueron de ~15°C, similar a las condiciones previas a “El Blob”. En cambio, con respecto a la salinidad, esta disminuyó a causa de lluvias dispersas durante ese invierno.

No se detectaron abundancias importantes de *Chattonella*. En contraste, las condiciones de salinidad y temperatura de marzo favorecieron la proliferación de *Cochlodinium cf. fulvescens*.

Palabras clave: CTD, hidrografía, surgencia, masas de agua, el Blob.

Dedicatoria

Antes que todo y después que nada, a mis padres, Salvador y Martha, gracias por brindarme su amor, paciencia y confianza en toda esta travesía.

A mi hermano, Salvador alias Chava, porque con nacer me enseñó la importancia de la convivencia, ser solidario y compartir.

A mi esposo, Óscar, por su amor, y su apoyo desde el comienzo de esta tesis, y que, con sus raites, insistencias y preocupación por la comida, llegué a tiempo a cada reunión y terminé cada gráfica y párrafo de este escrito.

Agradecimientos

Agradezco cordialmente a mi director Dr. David Rivas por su apoyo y consejos como guía para la realización de esta tesis, además de compartir su experiencia y conocimientos en el campo de la oceanografía.

Con aprecio a mis sinodales:

A la Dra. Mary Carmen Ruiz, por además de ser sinodal de esta tesis, mi tutora en la carrera y como una mamá a lo largo de mi estancia en la facultad de ciencias Marinas.

Al Dr. Ernesto García por su apoyo y entusiasmo, invitándome al laboratorio de ficotox y a trabajar con el Dr. David.

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), por permitirme acceder a las instalaciones y ser participe en las actividades que me dieron la posibilidad de realizar esta tesis.

Al proyecto 260040 denominado “Consolidación del laboratorio FICOTOX y grupo de investigación regional para la atención de la problemática asociada a ficotóxicas marinas en el Noroeste de México” por su apoyo económico y accesibilidad al crucero oceanográfico BTS-ISCOR.

A la tripulación del Buque Oceanográfico Alpha Helix y a los participantes científicos, a partir del cual se obtuvieron los datos analizados para esta tesis. Sin antes, mencionar la buena experiencia que obtuve con ustedes en mi primera salida de más de un día a la mar.

Con distinción a mi familia Ensenadense:

A mi tía Selva, por recibirme en Ensenada, cuando no conocía nada ni a nadie, y recibirme en su hogar cuando apenas y me conocía.

A cada una de mis amistades realizadas en la universidad, que me enseñaron un poco de mundo y un poco libertad, a las chicas que llevo en mi corazón, Mayra, Sam, Anni, Miranda e Iria. Y obviamente a los chicos, por sus cuidados que siempre recordaré, Wicho, Aldo y Haza.

A las familias de Mayra, los Ávila Alvarado, de Miranda, los Guerrero Llamas, y técnicamente todos en la familia de Óscar, por recibirme en sus casas, invitarme una comida y darme asilo en caso de contingencia, finales y/o días festivos.

A mis profesores de la Facultad de Ciencias Marinas, por mostrarnos a mí y mis compañeros su pasión por la ciencia, su aplicación en la oceanología y la inmensidad que el océano representa abarcando 2/3 de la superficie del planeta.

Índice

Votos Aprobatorios	ii
Resumen	iii
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos	vi
Tabla de Figuras.....	x
1. Introducción	1
2. Antecedentes.....	2
3. Justificación	4
4. Objetivos.....	4
4.1. Objetivo general	4
4.2. Objetivos particulares.....	5
5. Metodología	5
5.1. Área de estudio.....	5
5.2. Descripción del muestreo.....	6
5.3. Análisis de datos	7
5.3.1. Diagramas termohalinos.....	7
5.3.2. Descripción del comportamiento del viento	7
5.3.3. Concentración de células de <i>Chattonella</i> y <i>Co. fulvescens</i>	7
5.3.4. Mapeos.....	8

5.3.5. Velocidad Geostrófica	9
6. Resultados.....	10
6.1. Hidrografía de la zona.....	10
6.1.1. Descripción de masas de agua.....	10
6.1.2. Sección Vertical Profunda	12
6.1.3. Sección Vertical paralela a la costa	15
6.1.4. Mapeos Superficiales	18
6.2. Distribución de <i>Chattonella</i> y <i>Co. fulvescens</i>	19
6.2.1. Mapeos del muestreo superficial.	19
6.2.2. Distribución de las especies ictiotóxicas en la sección de análisis.	
21	
7. Discusión	26
7.1. Condiciones Hidrográficas	27
7.1.1. Secciones Verticales	27
7.1.2. Distribución de las variables obtenidas de CTD	28
7.2. Distribución de <i>Chattonella</i> y <i>Co. fulvescens</i>	30
8. Conclusiones	32
9. Bibliografía.....	32
Anexos.....	35

Tabla de Figuras

Figura 1. Localización de las estaciones de muestreo (negro) donde se realizaron lances de CTD y muestras de agua. Resaltado en verde se muestra la sección vertical profunda, en morado la sección paralela a la costa, en rojo un conjunto de secciones perpendiculares a la costa y en anaranjado una sección paralela a la costa parte de este conjunto de estaciones..... 6

Figura 2. a) Diagrama T-S de todas las estaciones hidrográficas. Se muestran las masas de agua típicas de la región (Pérez-Brunius et al. 2006; Durazo et al. 2010): Agua subártica (SAW) y Agua ecuatorial del Pacífico norte (NPEW). b) Diagrama de T-O. Resaltado en rojo y verde están estaciones seleccionadas para la estructura resaltada entre 1026.00 y 1026.57 kgm^3 que se describe en las Figuras 4 y 5 en la sección profunda..... 12

Figura 3. Diagrama de astillas de los promedios diarios del vector de viento durante el febrero y abril del 2017 promediados espacialmente en la región de estudio. En el rectángulo rojo se muestra el periodo de la campaña (23-25 de marzo)..... 13

Figura 4. Distribución vertical de las variables a lo largo del transecto profundo a los 32.50° N (ver Figura 1): a) temperatura, b) oxígeno, c) salinidad y d) velocidad geostrófica relativa a 500 dB. Las líneas verticales muestran los puntos de observación (lances de CTD). Las líneas roja y verde corresponden a la división de las masas de agua que se muestran en la Figura 2. En blanco se muestran las isopícnas marcadas en la Figura 2, y en el panel (d) en negro se muestra el valor 0 de la velocidad. 14

Figura 5. Distribución vertical de la señal de fluorescencia a lo largo del transecto con corte a 150 m de profundidad. Marcado en blanco se muestra la isopicna superior y en gris los puntos de muestreo del CTD que se muestra en la Figura 4. 15

Figura 6. Distribución vertical de las variables a lo largo de la sección nortesur paralelo a la costa (ver Figura 1). a) Temperatura, b) oxígeno, c) salinidad y d) velocidad geostrófica relativa a 200 dB. En gris se muestran los lances de CTD. En blanco la isopicna de 1026 kgm^3 . En la Figura 6d la línea negra representa la velocidad de 0. 16

Figura 7. Distribución vertical de la señal de fluorescencia de la sección paralela a la costa (ver Figura 1). En líneas grises verticales está el recorrido de la toma de datos del CTD y en blanco se muestra la isopicna de 1026 kgm^3 17

Figura 8. Distribución superficial de las variables de: a) temperatura ($^{\circ}C$), b) oxígeno disuelto (ml/L), c) salinidad y d) señal de fluorescencia (unidades arbitrarias). 18

Figura 9. Muestreo superficial de *Chattonella*. La paleta de colores está en escala logarítmica base 10. Se muestran en colores los transectos seleccionados para estudios puntuales: en morado la sección profunda, en verde la sección paralela a la costa, en rojo los transectos perpendiculares a la costa y en amarillo la paralela, seleccionados para el análisis de *Chattonella* y *Co. fulvenscens* (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019)). 20

Figura 10. Muestreo superficial de *Co. fulvenscens*. Presenta los mismos transectos que la Figura 9, con un acercamiento en la zona de las Islas Coronado (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019)). 21

Figura 11. Secciones de las Islas Coronado para *Chattonella* (ver Figura 1). El panel (a) corresponde al transecto más norteño y el panel (c) al más sureño. Entre la sección intermedia y la sección sur se encuentran las Islas Coronado. Los puntos sobre la distribución de la señal de fluorescencia corresponden a los muestreos discretos de agua para el conteo de células. (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019))..... 22

Figura 12. Sección paralela a la costa de *Chattonella*. Se muestra señal de fluorescencia (barra derecha) y células/L (barra inferior). (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019)). 23

Figura 13. Secciones de las Islas Coronado para *Co. fulvescens*; el panel (a) corresponde a la más norteña y el panel (c) a la más sureña, ubicándose entre ambos las Islas Coronado. Representando el mapeo de fondo, la barra de colores de lado izquierdo cuantifica la fluorescencia y la barra de abajo la escala de colores asignada a la cantidad de células/L que se encontró en las muestras de agua. (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019))..... 24

Figura 14. Sección paralela a la costa de *Co. fulvescens*. Representando el mapeo de fondo, la barra de colores de lado izquierdo cuantifica la fluorescencia y la barra de abajo la escala de colores asignada a la cantidad de células/L que se encontró en las muestras de agua. (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019))..... 25

1. Introducción

Se realizó una campaña oceanográfica en la región noroeste de Baja California durante el periodo del 23 al 25 de marzo de 2017, a bordo del B/O Alpha Hélix del CICESE. A partir de los datos de este crucero se caracterizó la presencia de especies ictiotóxicas y sus quistes en el sedimento. Estas especies causaron una mortandad elevada de atunes en el verano de 2016 y en el invierno de 2017 en los encierros atuneros ubicados en Punta Banda, Bahía Todos Santos e Islas Coronado. Esta zona formó parte del derrotero de la campaña.

El objetivo general de la campaña fue generar información sobre la ecología de especies con potencial ictiotóxico de la región, en particular del género de *Chattonella*, spp., la cual se ha reportado que está asociada a mortandad de peces adultos (Pérez-Morales, 2011) y que fue responsable de la mortandad de peces de encierro en la región (García-Mendoza *et al.*, 2018). El género de *Chattonella* pertenece a la clase *Raphidophyceae* junto con otras cuatro especies conocidas. Estas tienen una amplia distribución en zonas tropicales, subtropicales y en especial templadas, aunque existen registros en algunas zonas cálidas, por lo que es posible su presencia en el Pacífico Mexicano (Ichiro y Mineo, 2014; Bravo-Sierra, 2004).

Aunque el objetivo principal del proyecto era la búsqueda de *Chattonella*, en la campaña se documentó un florecimiento de *Cochlodinium*, probablemente *Co. fulvescens*. Se ha documentado que dos especies de este género son ictiotóxicas al igual que *Chattonella*, spp.: *C. polykrikoides* y *Co. fulvescens* (Kudela y Gobler, 2012). Esta última fue la que se encontró durante la campaña oceanográfica en la región.

La dominancia o presencia de ciertas especies en la comunidad fitoplanctónica depende en gran parte de las condiciones ambientales, las cuales están determinadas por las características físicas una región y tiempo determinado. Por esto, la descripción de las condiciones ambientales durante la presencia de *Chattonella* y *Co. fulvescens*, es el tema central de esta tesis.

2. Antecedentes

Las condiciones hidrográficas de la zona han sido analizadas previamente a partir de las observaciones de los programas de CalCOFI (*California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations*) e IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California), los cuales existen principalmente para monitorear el sistema de la corriente de California. Con base en estas fuentes, varios autores han descrito las estructuras y los fenómenos oceanográficos que ocurren frente a las costas de California, EUA, y la Península de Baja California, México.

Durazo *et al.* (2010) realizó una climatología de las variables de temperatura y salinidad desde Ensenada, B. C., hasta el Golfo de Ulloa, B. C. S., desde la costa hasta alrededor de 220 km mar adentro. Los periodos analizados fueron de 1950-1978 (a partir de los datos de CalCOFI) y de 1997-2004 (a partir de los datos de IMECOCAL). Encontraron que existe una variabilidad estacional en las características de las masas de agua. Entre sus resultados describieron que en primavera el Agua subártica (SAW por sus siglas en inglés) está más presente en la Corriente de California que en otras estaciones del año. Esta masa de agua se caracteriza por una salinidad relativamente baja y relativamente alta concentración de nutrientes.

Por otro lado, en un área geográfica menor que la de Durazo *et al.* (2010), Pérez-Brunius *et al.* (2006) identificaron las masas de agua y características hidrográficas de la zona comprendida entre La Jolla, California, hasta Bahía de Salsipuedes, Baja California, analizando datos del periodo de 1997-2004. Su objetivo principal fue describir las condiciones hidrográficas características de la región cuando está bajo la influencia de un evento de El Niño y su contraparte, La Niña. Dentro del periodo analizado se reportan los eventos de El Niño de 1997-1998, 1999-2000 y 2002-2003, caracterizados por la presencia de bajas salinidades y altas temperaturas respecto a los promedios climatológicos de la costa de California y Baja California. Entre sus resultados, se discutió el origen de la SAW y del Agua Ecuatorial del Pacífico Norte (NEPW por sus siglas en inglés), en el caso de la SAW ésta se forma en el Frente Subártico y es transportada por la Corriente de California, y en el caso de la NEPW esta acarreada desde el Pacífico Oriental por la Contracorriente de California. Con respecto a las surgencias costeras, estos autores concluyeron que estas aumentan su intensidad desde invierno hasta verano, con una importante variabilidad durante la primavera.

De acuerdo a las condiciones hidrográficas típicas del noroeste de Baja California descritas por Durazo *et al.* (2010), la temperatura en la región se mantiene alrededor de los 18°C, así como la salinidad alrededor de 33.5. Estas condiciones cambiaron entre los años 2013-2016 por una condición anómala que fue “*El Blob*” o “La Mancha” y “El Niño Godzilla” de 2015-2016. El primero fue una masa de agua cálida y de baja salinidad que se transportó por la Corriente de California desde el Golfo de Alaska hasta las costas frente California y Baja California (Durazo *et al.*,

2017), trayendo consigo condiciones anómalas que permitieron un cambio en la comunidad fitoplanctónica de la región (Fimbres-Martínez, 2019). Durante el segundo evento, “El Niño Godzilla”, en las costas de Baja California se presentaron intensas anomalías positivas de temperatura esperadas en este tipo de eventos, pero no se dio la precipitación esperada (Durazo *et al.*, 2017). Esta condición duró desde 2013 que comenzó la situación de “El Blob” hasta el invierno 2016-2017 (Fimbres-Martínez, 2019).

3. Justificación

Los florecimientos fitoplanctónicos ocurren debido a una combinación de condiciones físicas y biogeoquímicas en el medio las cuales potencian el aumento de la población del organismo. En 2016, en la costa noroeste de la Baja California se presentaron mortandades masivas de atún cultivado en encierros asociadas a la presencia de florecimientos algales nocivos (FAN) de especies ictiotóxicas no reportadas previamente en la región. Por esto, es importante comprender las características físicas relacionadas a la presencia de estas especies que ayuden a explicar las causas por las que ocurren estos fenómenos.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Con base en perfiles hidrográficos y muestras de agua, describir las condiciones hidrográficas durante la campaña BTS-ISCOR y relacionarlas con la presencia de especies con potencial ictiotóxico.

4.2. Objetivos particulares

1. Describir las condiciones físicas del océano durante la campaña mediante mapeos de temperatura, oxígeno disuelto, salinidad y señal de fluorescencia en la superficie a lo largo de la zona de estudio y en la columna de agua en transectos estratégicos.
2. Describir estructuras y fenómenos físicos que ocurren cerca de la costa, independientes a la corriente de California, mediante un análisis hidrográfico que incluye el cálculo de la velocidad geostrofica.
3. Relacionar las zonas de mayor abundancia de *Chattonella* y *Co. fulvescens*, con las variables físicas y discutir cómo estas pudieron haber favorecido su proliferación.

5. Metodología

5.1. Área de estudio

Se realizó una campaña oceanográfica en la costa noroeste de Baja California entre las latitudes de 31.75°N a 32.45°N y las longitudes de 116.60°W a 117.35°W, cerca del límite de México con Estados Unidos (Figura 1). En esta región se localizan la Bahía de Todos Santos al sur, las localidades de Salsipuedes, Rosarito, Playas de Tijuana y las Islas Coronado, en el estado de Baja California, México. Cabe mencionar que la escala espacial del área de estudio (considerada costera por tener la mayoría de su derrotero sobre la plataforma continental y cercana a la costa) es menor al área monitoreada por los programas de CalCOFI e IMECOCAL, los cuales cuentan con un muestreo completamente oceánico. Se llevaron a cabo 58 estaciones, de las cuales se trabajó con 6 transectos estratégicos

para la descripción de la circulación y el análisis de la distribución de las especies *Chattonella* y *Co. fulvescens*.

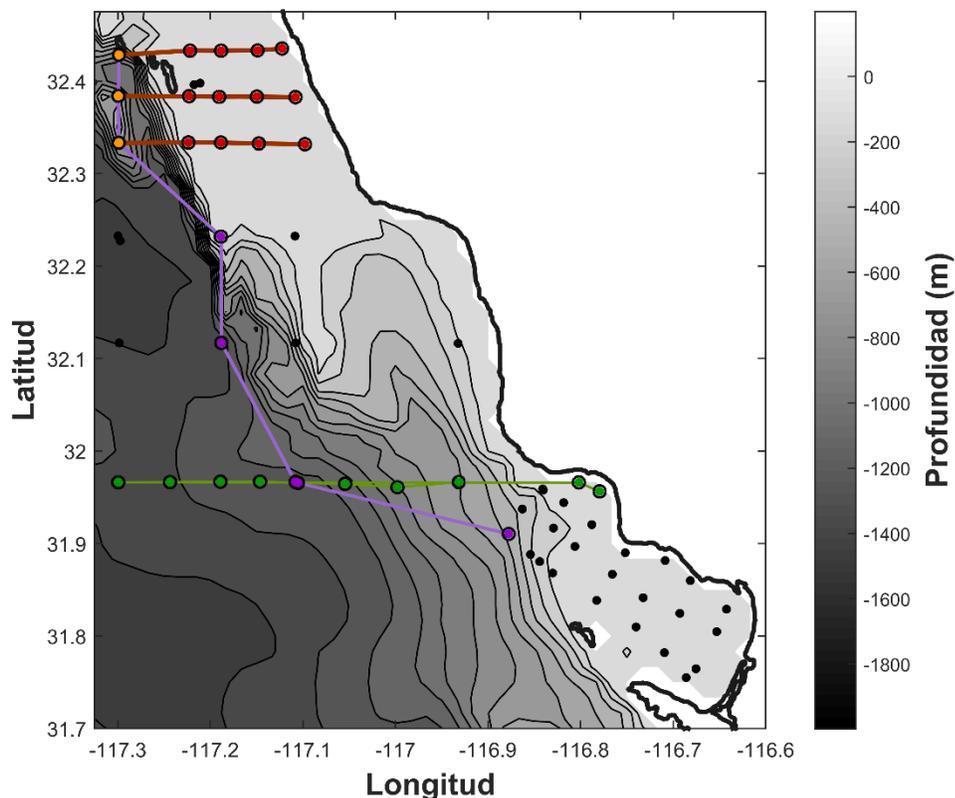


Figura 1. Localización de las estaciones de muestreo (negro) donde se realizaron lances de CTD y tomaron muestras de agua. Resaltado en verde se muestra la sección vertical profunda, en morado la sección paralela a la costa, en rojo un conjunto de secciones perpendiculares a la costa y en anaranjado una sección paralela a la costa, parte de este conjunto de estaciones realizadas cerca de las Islas Coronado.

5.2. Descripción del muestreo

Durante la campaña se utilizó un perfilador de conductividad, temperatura y profundidad (CTD, por sus siglas en inglés) marca *Sea-Bird 9 plus* con sensores adicionales de oxígeno disuelto (*Sea-Bird 43*) y señal de fluorescencia (*Seapoint SCF*). Con este perfilador se realizaron muestreos en un total de 58 estaciones, que comprenden desde la línea de costa más allá del borde de la plataforma continental (profundidades máximas alrededor de 1000 m).

5.3. Análisis de datos

5.3.1. Diagramas termohalinos

A partir de los datos hidrográficos se realizó un análisis de masas de agua mediante diagramas termohalinos (T-S). Estos diagramas son comparados con los realizados por Pérez-Brunius *et al.* (2006) y Durazo *et al.* (2010), estos autores identificaron las masas de agua típicas de la costa noroeste de Baja California.

5.3.2. Descripción del comportamiento del viento

La costa oriental del Pacífico se caracteriza por estar influenciada por los fenómenos de surgencia que representan un aporte importante de nutrientes de aguas relativamente profundas, lo cual es uno de los factores que ayudan a la proliferación del fitoplancton. Las surgencias se generan cuando el viento viaja a lo largo de la costa de norte a sur (en el hemisferio norte) de manera persistente. Observar este tipo de patrón en las series de tiempo del viento indica la presencia de surgencia. Para esto se analizaron los promedios diarios del vector de viento durante el año 2017 del Reanálisis Regional de Norteamérica (NARR; Mesinger *et al.*, 2006). Se realizó un diagrama de astillas para el periodo del 01 de febrero al 31 de abril de 2017.

5.3.3. Concentración de células de *Chattonella* y *Co. fulvescens*

La lectura y el pre-procesamiento de las muestras de agua y la descripción de las especies fitoplanctónicas fueron realizados por Michelle Fimbres Martínez. En su tesis de maestría se describe el procedimiento de obtención de estos datos (Fimbres-Martínez, 2019). Además de identificar a *Chattonella* y *Co. fulvescens* en las muestras analizadas, encontró además la presencia de *Heterosigma akashiwo*

y *Fibrocapsa japónica* (Especies formadoras de FAN) dentro de la Bahía Todos Santos. En su tesis realizó la caracterización de la distribución de *Chattonella* y *Co. fulvescens* y una evaluación preliminar de los factores ambientales para poder explicar su proliferación.

5.3.4. Mapeos

Para la caracterización de las condiciones hidrográficas se realizaron mapas mediante la técnica de mapeo objetivo, la cual es una técnica para interpolar los datos medidos en una malla descriptiva de un área para cada variable (Aguilar-Martínez, 2015; Roemmich, 1983). Se obtuvo el comportamiento de las variables físicas en la superficie, así como en la columna de agua en ciertas secciones (ver Figura1), además de utilizarlo en superficie para la distribución de *Chattonella* y *Co. fulvescens* con base en los resultados de muestras de agua de Fimbres-Martínez (2019). El método aplicado consiste en utilizar una estadística congruente con los datos obtenidos en campo (escalas de correlación y cocientes de señal a ruido), realizando una interpolación entre ellos y graficándolos para obtener una figura que resulte descriptiva y realista (variaciones suaves).

Para las secciones se escogieron 6 transectos debido a sus características particulares:

a) Sección Profunda.

Para conocer el comportamiento general de la columna de agua, se eligió una sección a los 32.50°N con profundidad máxima de 1008 m y mínima de 50 m. El transecto contó con 10 estaciones ubicadas a lo largo de esta latitud y entre las

longitudes de 116.75°W y 117.30°W (Figura 1). Se obtuvieron los mapeos de salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, y señal de fluorescencia abarcando de la superficie a los 500 m de profundidad, excepto por el de la señal de fluorescencia, el cual se limitó a la profundidad de 150 m.

b) Sección paralela a la costa

Para conocer cómo se distribuyen las variables de manera meridional, se escogieron 7 estaciones a lo largo de la zona de estudio al exterior a la bahía de Todos Santos (Figura 1). Este transecto tuvo una profundidad máxima de 1007 m en su estación más alejada de la costa, mientras que las demás alcanzaron profundidades de 300 m y la más somera de 30 m; se limitó la profundidad a los 200 m para el análisis del transecto.

c) Área de distribución de *Chattonella* y *Co. fulvescens*.

En esta parte se escogió un conjunto de secciones, conformado por una sección paralela a la costa de 3 estaciones y 3 transectos perpendiculares a la costa de 5 estaciones cada uno en la zona de las Islas Coronado (entre los 32.30 N y 35.45 N) (Figura 1). A cada sección se le realizó su mapeo de fluorescencia, así como de salinidad, y además se sobrepusieron los puntos correspondientes a los resultados del conteo de células por litro de las especies en cuestión.

5.3.5. Velocidad Geostrófica

Se realizó un análisis dinámico de la circulación en la columna de agua mediante el cálculo de la velocidad geostrófica. A partir de manejar las ecuaciones

de viento térmico (e.g., Gill, 2016) se obtuvo la variación vertical de la velocidad geostrofica a través de la sección analizada. Esto es:

$$V = V_{ref} - \frac{gf}{\rho_0} \int_{z_{ref}}^{z_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \dots \dots \dots (1)$$

donde $V_{ref} = 0$ es la velocidad en la profundidad de referencia z_{ref} (la cual es diferente para cada transecto analizado), z_0 es la superficie de la columna de agua, g es la gravedad, f es el parámetro de Coriolis, $\rho_0 = 1025 \text{ kg/m}^3$ es una densidad de referencia, ρ es la densidad, z es la coordenada vertical (que aumenta hacia arriba) y x es la coordenada a lo largo de la sección. Este cálculo se realizó en las secciones profunda y paralela a la costa, con base en sus profundidades de corte a 500 m (este-oeste) y a 200 m de (norte-sur), respectivamente.

6. Resultados

6.1. Hidrografía de la zona

6.1.1. Descripción de masas de agua

La Figura 2a muestra el diagrama T-S (temperatura y salinidad) resultante de los datos de CTD, y en este se agregaron los intervalos correspondientes a las masas de agua previamente identificadas por Pérez-Brunius et al. (2006). Se observa que la mayoría de los datos presentan características propias de la SAW, mayormente en la superficie. Por otro lado, las características de la NPEW, se presentan en las estaciones costeras y relativamente profundas (150-200 m).

Se observa una señal interesante entre los 33.75 y 34.25 de salinidad y 8° y 10°C de temperatura, por lo que se realizó un diagrama T-O (temperatura y oxígeno

disuelto) (Figura 2b) para comprobar si el oxígeno disuelto presentaba algún comportamiento que resultara descriptivo para este comportamiento que aparenta ser una estructura subsuperficial. Para mostrar una mejor relación entre los diagramas y la sección vertical profunda, se dividieron las estaciones de dicha sección: la mitad se resaltó de color verde y la otra de color rojo, y sus valores correspondientes de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto se graficaron en los diagramas (ver Figuras 2a y 2b), y la misma división que se aplicó en las Figuras 4 y 5. Ambos diagramas (T-S y T-O) muestran las mismas estructuras y división en las estaciones seleccionadas. Se resaltaron las isopícnas de 1026.00 y 1026.54 kg/m^3 para analizar las densidades intermedias en la sección vertical profunda, considerando la presencia de alguna estructura.

Con respecto al diagrama T-O, el oxígeno disuelto muestra un comportamiento inverso al de la salinidad (Figura 2b). De los diagramas T-S y T-O se observa que el oxígeno disuelto también funciona como trazador de masas de agua, y se observa que la variable que cambia es la temperatura. De acuerdo a esta idea, se realizó además un diagrama O-S (oxígeno disuelto y salinidad) para observar la correlación entre estas variables (Anexo 1); la relación entre ambas variables es aproximadamente lineal con diferentes pendientes a lo largo de la columna de agua, dependiendo de la distribución de las aguas. Entre las isopícnas de 1026.00 y 1026.57 kg/m^3 se confirma que existe una estructura que es evidente en todas las variables de la Figura 4, la cual será descrita en el apartado de la sección vertical profunda.

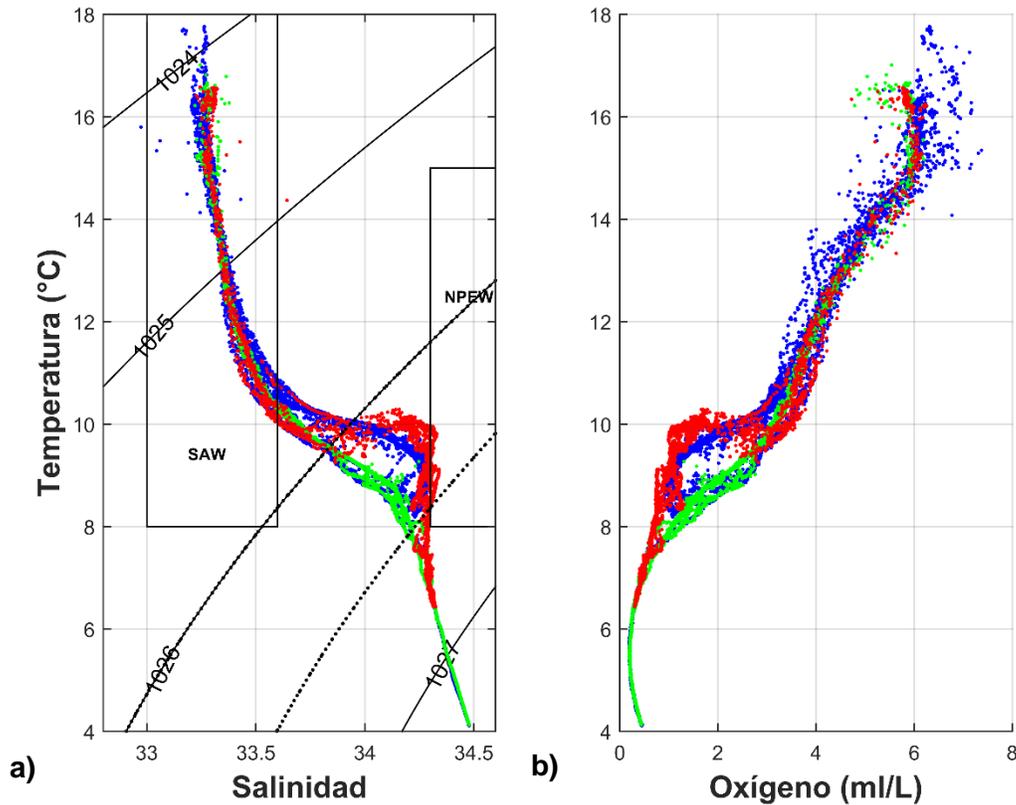


Figura 2. a) Diagrama T-S de todas las estaciones hidrográficas. Se muestran las masas de agua típicas de la región (Pérez-Brunius *et al.* 2006; Durazo *et al.* 2010): Agua subártica (SAW) y Agua ecuatorial del Pacífico norte (NPEW). b) Diagrama de T-O. Resaltado en rojo y verde están estaciones seleccionadas para la estructura resaltada entre 1026.00 y 1026.57 kg/m^3 que se describe en las Figuras 4 y 5 en la sección profunda.

6.1.2. Sección Vertical Profunda

En esta sección, al ser perpendicular a la costa, se buscó observar la señal de la surgencia costera. En la Figura 3 se destaca los vientos predominantes para el mes de marzo de 2017, donde se observa viento persistentemente hacia el sur. También se observa que unos días previos a la campaña de muestreo (23-25 de marzo) hubo una ligera disminución de la intensidad del viento, causando una relajación de la surgencia. Esto se ve reflejado en la temperatura de la columna de agua (Figura 4a) como una ligera inclinación de las isotermas, menos acentuada que en una surgencia típica. La profundidad de la termoclina disminuye en la costa

hasta alcanzar una profundidad alrededor de los 10 m. En los niveles más profundos se observa un escalón entre los 100 y 300 m de profundidad entre las isopícnas de 1026.00 y 1026.54 kg/m^3 (líneas blancas en los mapeos de la Figura 4) y después la variación de temperatura es más homogénea conforme aumenta la profundidad.

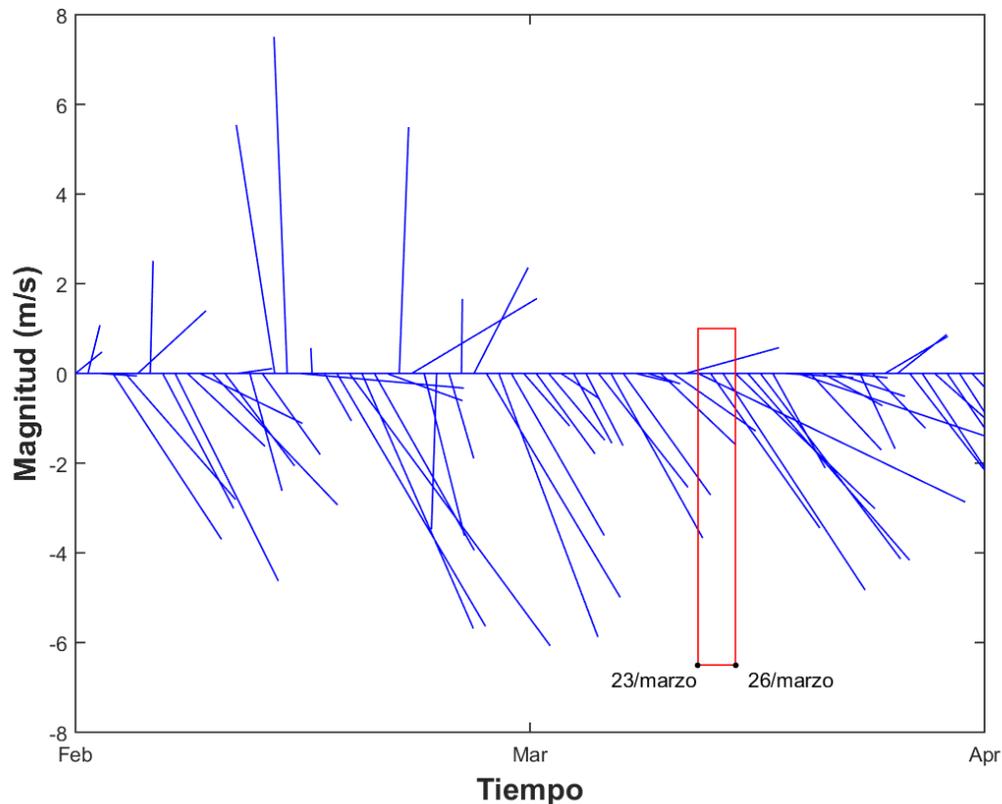


Figura 3. Diagrama de astillas de los promedios diarios del vector de viento durante el febrero y abril del 2017 promediados espacialmente en la región de estudio. En el rectángulo rojo se muestra el periodo de la campaña (23-25 de marzo).

En el mapeo del oxígeno disuelto (Figura 4b) se observa en la superficie un comportamiento similar al de la temperatura. Sin embargo, en la capa entre 100 y 300 m de profundidad se observa un escalón inverso al de la temperatura, el cual es similar al observado en la salinidad (Figura 4c), lo que corrobora la señal subsuperficial observada en los diagramas T-S y T-O (Figura 2).

En la Figura 4d se muestra la componente meridional de la velocidad geostrófica relativa a 500 dB. Se puede observar que existe un cambio de signo en la velocidad de manera horizontal, señal de algún fenómeno que también se refleja en las variables de temperatura, salinidad y oxígeno. Esto puede corresponder a un remolino subsuperficial de mesoescala, similar al observado frente a Punta Eugenia en octubre de 2003 (Almazán-Becerril *et al.*, 2012), con la diferencia de que esta estructura tendría alrededor de 30 km de ancho, considerado apenas en la categoría de mesoescala.

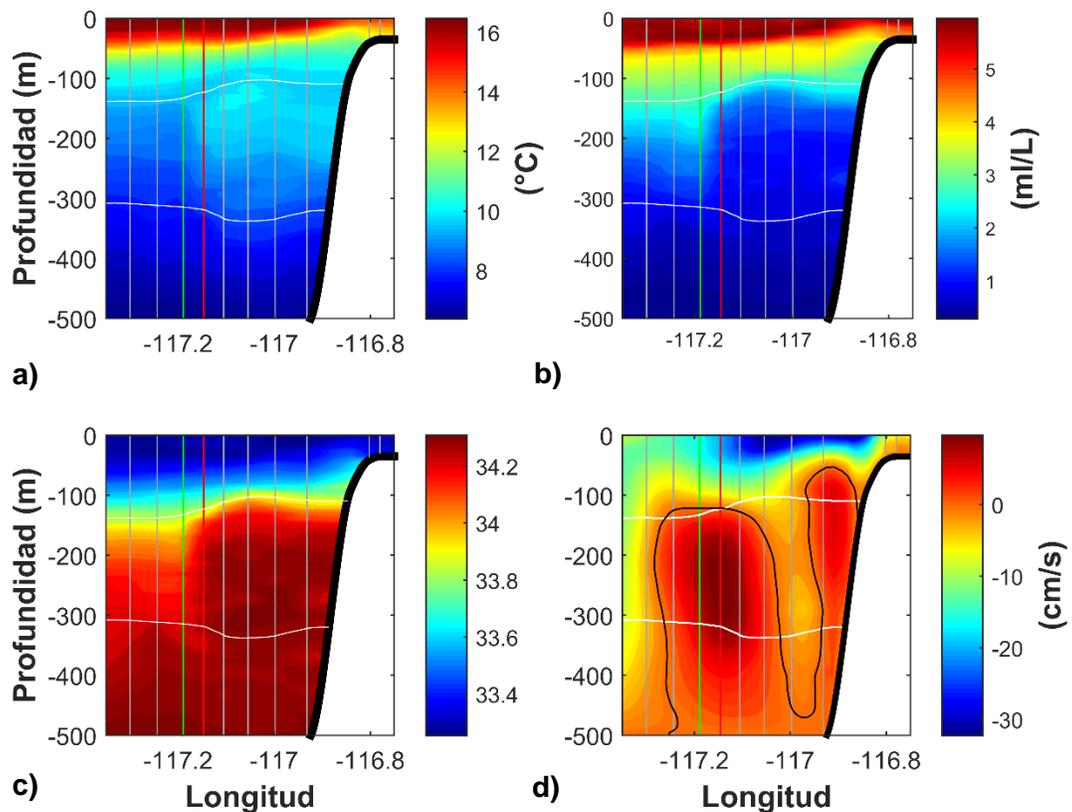


Figura 4. Distribución vertical de las variables a lo largo del transecto profundo a los 32.5° N (ver Figura 1): a) temperatura, b) oxígeno, c) salinidad y d) velocidad geostrófica relativa a 500 dB. Las líneas verticales muestran los puntos de observación (lances de CTD). Las líneas roja y verde corresponden a la división de las masas de agua que se muestran en la Figura 2. En blanco se muestran las isopícnas marcadas en la Figura 2, y en el panel (d) en negro se muestra el valor 0 de la velocidad.

En el caso de la distribución de la señal de fluorescencia, en la Figura 5 se muestra la isopícnica de 1026 kg/m^3 , como parte superior del aparente remolino subsuperficial, y entre los 0 y 50 m se observan los parches de los máximos de fluorescencia. Existe una separación entre los parches que coincide con la elevación de la isopícnica, por lo que podría tratarse de una correspondencia entre la distribución del parche y la estructura.

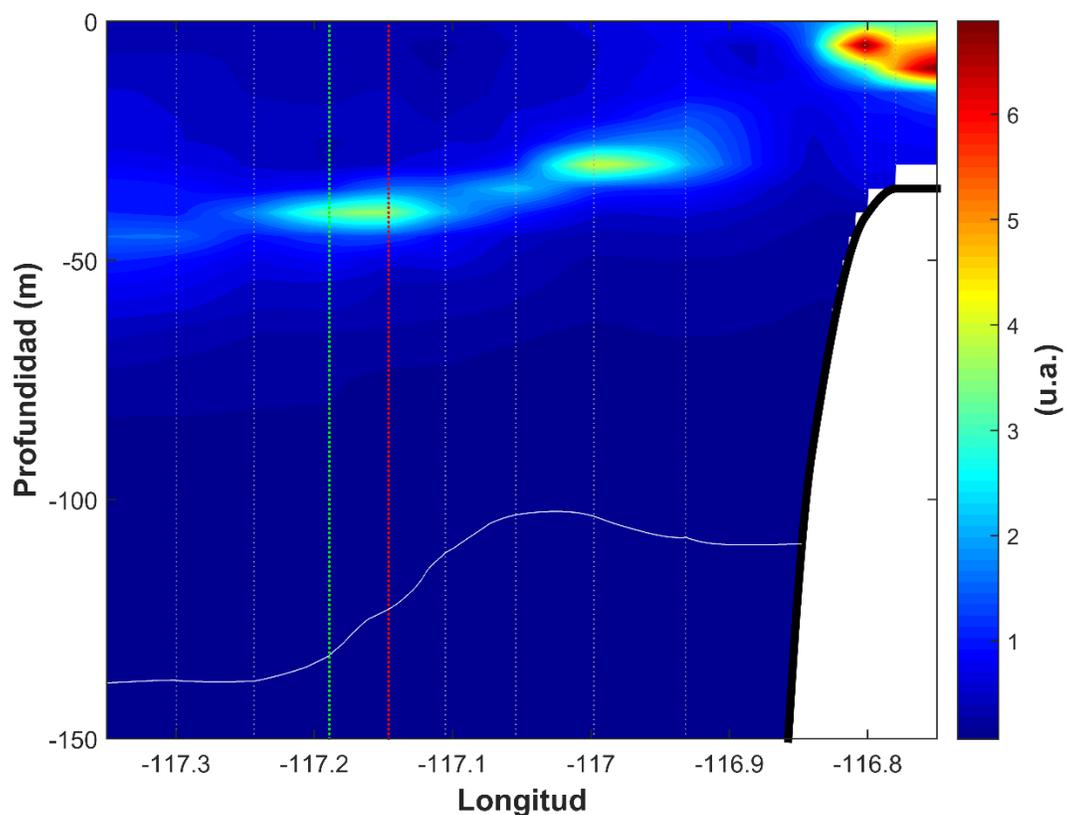


Figura 5. Distribución vertical de la señal de fluorescencia a lo largo del transecto perpendicular profundo con corte a 150 m de profundidad. Marcado en blanco se muestra la isopícnica superior y en gris los puntos de muestreo del CTD que se muestra en la Figura 4.

6.1.3. Sección Vertical paralela a la costa

En esta sección se muestra la distribución de las variables en dirección meridional, y se busca observar algún fenómeno que se distribuya de norte a sur. En la Figura 6a se observa la disminución de la temperatura conforme aumenta la

profundidad, con ligeros cambios debidos la interacción de distintas masas de agua en la zona. Esto se puede relacionar con la sección del oxígeno disuelto (Figura 6b), el cual también disminuye con respecto a la profundidad. La salinidad muestra un comportamiento inverso al oxígeno disuelto (Figura 6c).

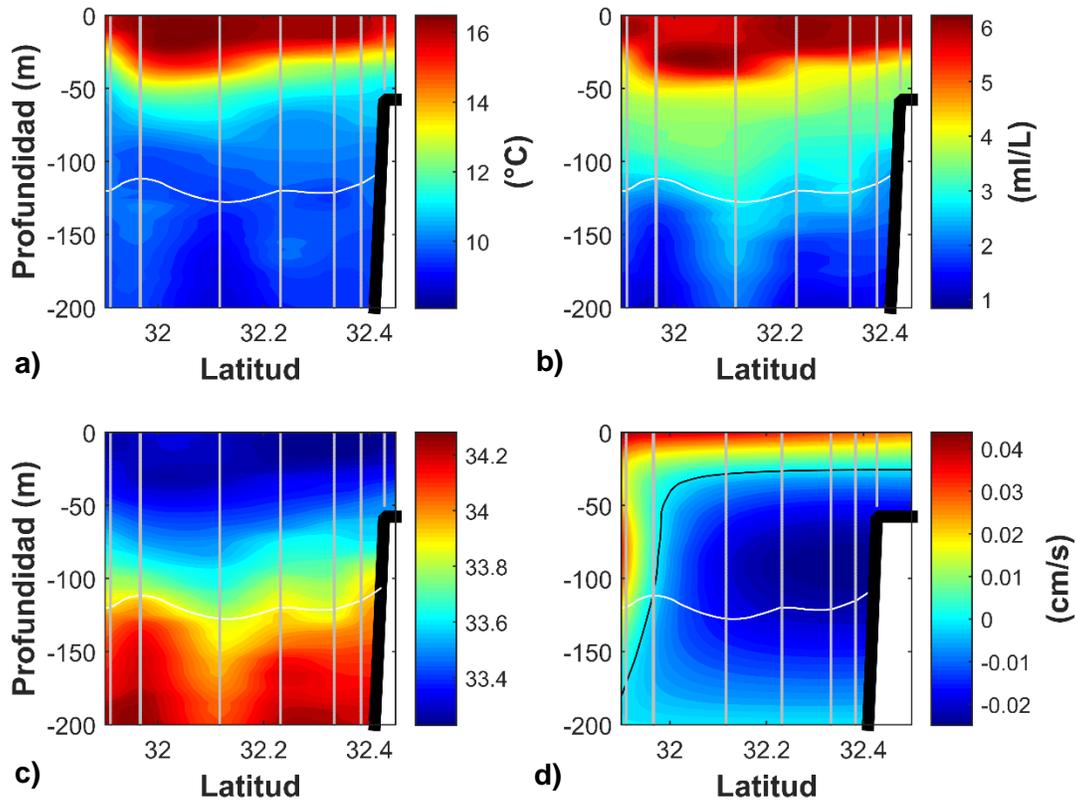


Figura 6. Distribución vertical de las variables a lo largo de la sección norte-sur paralelo a la costa (ver Figura 1). a) Temperatura, b) oxígeno, c) salinidad y d) velocidad geostrofica relativa a 200 dB. En gris se muestran los lances de CTD. En blanco la isopigna de 1026 kg/m^3 . En la Figura 6d la línea negra representa la velocidad de 0.

Entre los 31.9°N y los 32.2°N alrededor de la profundidad de 150 m, en el oxígeno disuelto (Figura 6b) y la salinidad (Figura 6c) se puede observar una diferenciación de las capas en contraste con la temperatura (Figura 6a). Esto es el reflejo de la relación que tienen estas variables, como se observó antes en los diagramas T-S y T-O (Figura 2), variables que muestran una relación lineal y en este caso reflejan estructuras que la temperatura no muestra.

Las velocidades que se muestran en la Figura 6d son menores a 0.01 cm/s ya que la predisposición del movimiento de la corriente en general es de norte a sur. Por lo tanto, los movimientos en la dirección zonal son mucho menores en comparación a los movimientos en dirección meridional.

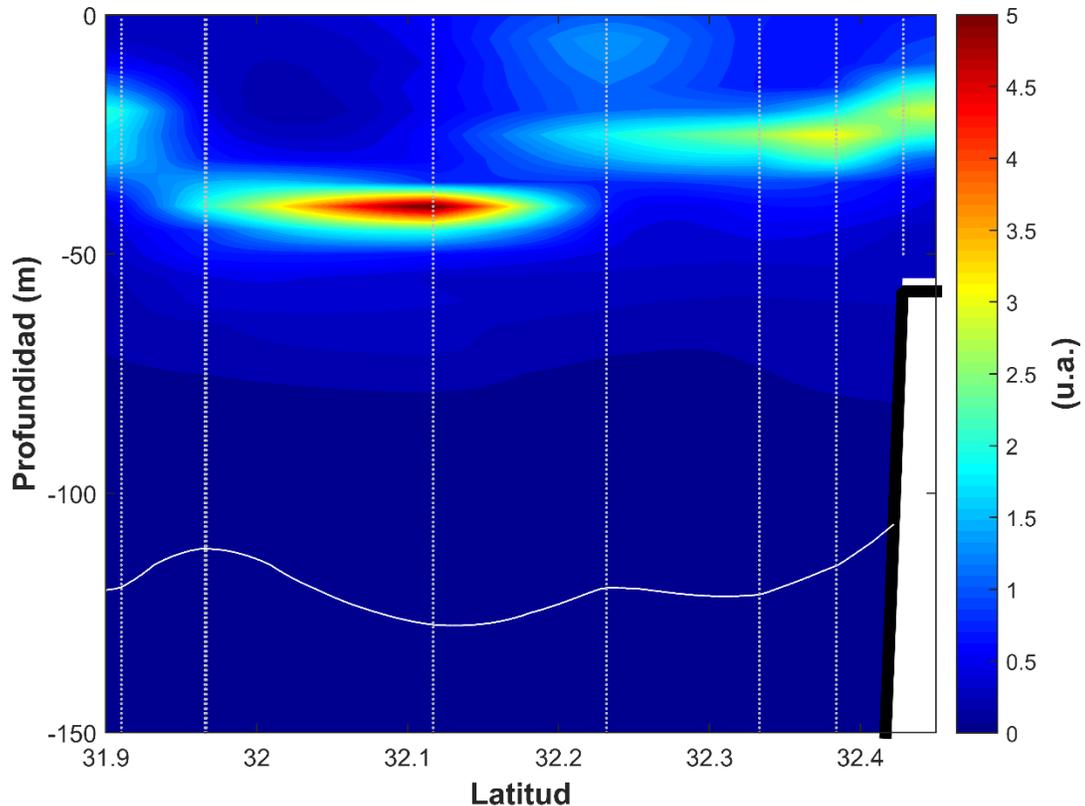


Figura 7. Distribución vertical de la señal de fluorescencia de la sección paralela a la costa (ver Figura 1). En líneas grises verticales está el recorrido de la toma de datos del CTD y en blanco se muestra la isopicna de 1026 kg/m^3 .

Con respecto a la fluorescencia (Figura 7), se observan los parches de máxima concentración de fluorescencia correspondientes al máximo subsuperficial de clorofila, los cuales siguen la forma de las isopicnas. Existen parches de fluorescencia cuando la isopicna de 1026 kg/m^3 se profundiza, mientras que cuando la isopicna se vuelve más somera la presencia de los parches es prácticamente nula.

6.1.4. Mapeos Superficiales

Los mapeos horizontales describen las condiciones de la superficie del océano durante el crucero oceanográfico. Se pueden observar detalles específicos, como la leve señal de surgencia en la temperatura superficial (Figura 8a), en la que hay agua más fría cerca de la costa que en el resto del mapeo. En la Figura 8d se muestra la salinidad superficial. En su distribución se puede observar una señal de menor salinidad cerca de las Islas Coronado, probablemente debido a un aporte de agua dulce del río Tijuana en el lado de California.

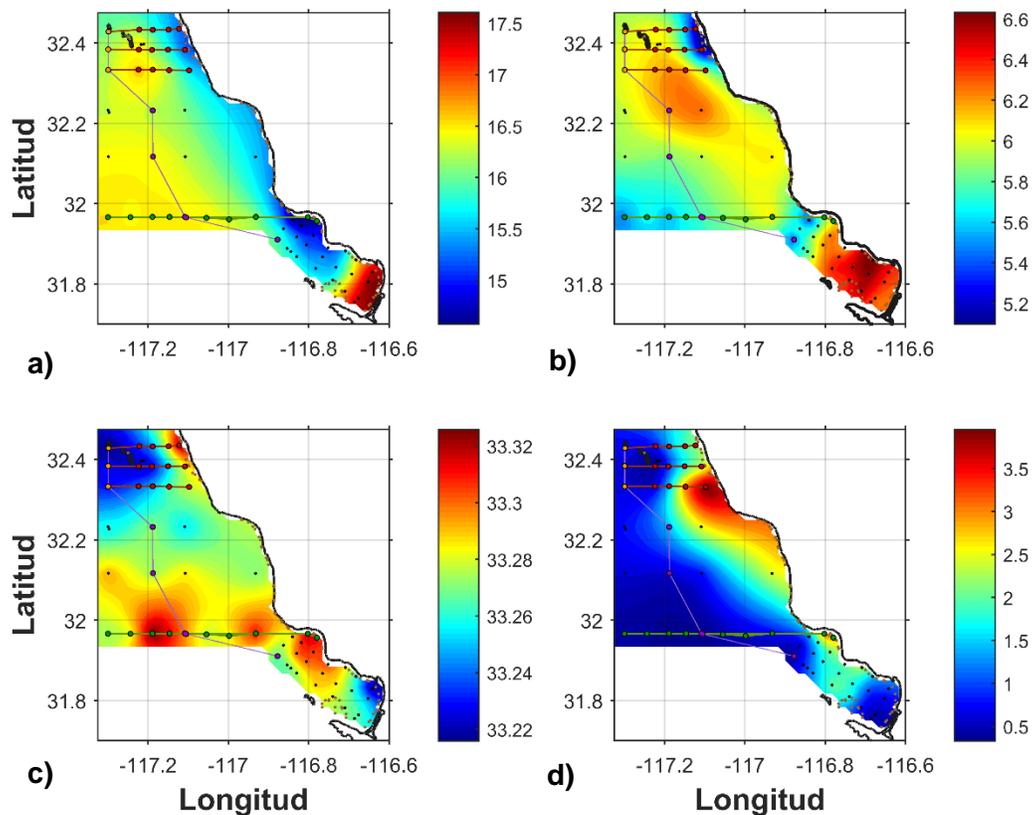


Figura 8. Distribución superficial de las variables de: a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) oxígeno disuelto (ml/L), c) salinidad y d) señal de fluorescencia (unidades arbitrarias).

Con respecto a la fluorescencia, esta se comporta de manera casi homogénea con valores entre 0.5 y 1 unidades en la mayoría del mapeo, excepto

cerca de la costa donde aumenta su concentración, principalmente en la zona de los tres transectos seleccionados en Islas Coronado. Esto corrobora la elección de los transectos, ya que denotan además de una mayor concentración de fluorescencia, la señal de una variación en la salinidad.

La concentración más alta de oxígeno disuelto superficial se encuentra dentro de la Bahía de Todos Santos (Figura 8b). Esto se puede atribuir a la producción primaria que hay reflejada en el aumento de la fluorescencia. Esta alta abundancia está asociada probablemente a que la Bahía actúa como una trampa de surgencias a causa de la dirección de las corrientes, favoreciendo la disponibilidad de nutrientes para los organismos fitoplanctónicos que se encuentran ahí. Además de la bahía, se observa un aumento notorio al sur de las Islas Coronado, donde se encuentra la sección de análisis de *Chattonella* y *Co. fulvescens*.

6.2. Distribución de *Chattonella* y *Co. fulvescens*.

6.2.1. Mapeos del muestreo superficial.

Con base en los datos obtenidos por Fimbres-Martínez (2019), la abundancia máxima de *Chattonella* fue de 1,175 células/L y se detectó en la parte noroeste de la región de las Islas Coronado. En la Figura 9 se mapeó la presencia de *Chattonella* en la superficie. Su distribución se localiza en el área de las Islas, por lo cual se escogió esta zona para un análisis más profundo de la presencia de las especies ictiotóxicas.

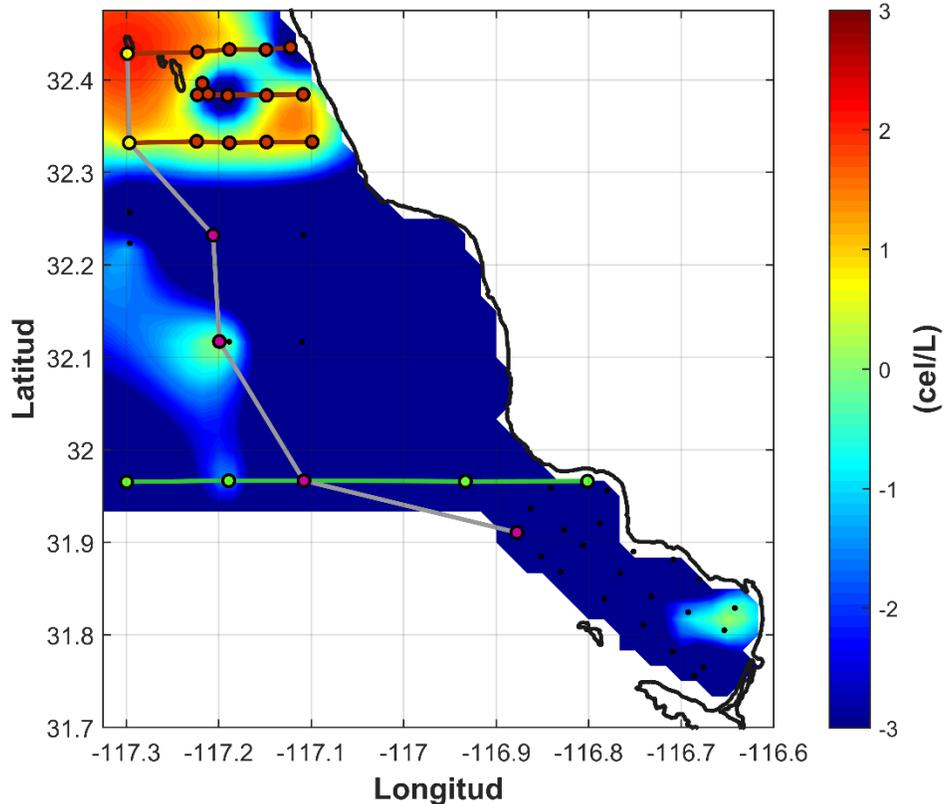


Figura 9. Muestreo superficial de *Chattonella*. La paleta de colores está en escala logarítmica base 10. Se muestran en colores los transectos seleccionados para estudios puntuales: en morado la sección profunda, en verde la sección paralela a la costa, en rojo los transectos perpendiculares a la costa y en amarillo la paralela, seleccionados para el análisis de *Chattonella* y *Co. fulvescens* (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019)).

Con respecto a *Co. fulvescens*, esta se presentó durante el periodo del crucero de una manera abundante, con un máximo de 29,066 células/L registrado en superficie en la parte noroeste de la región de estudio. En su distribución superficial (Figura 10) esta especie tiene una abundancia promedio de 500 células/L cerca de la costa, a excepción de la Bahía de Salsipuedes (alrededor de los 32°N) donde su concentración es menor a las 500 células/L y disminuye conforme se alejaba de esta.

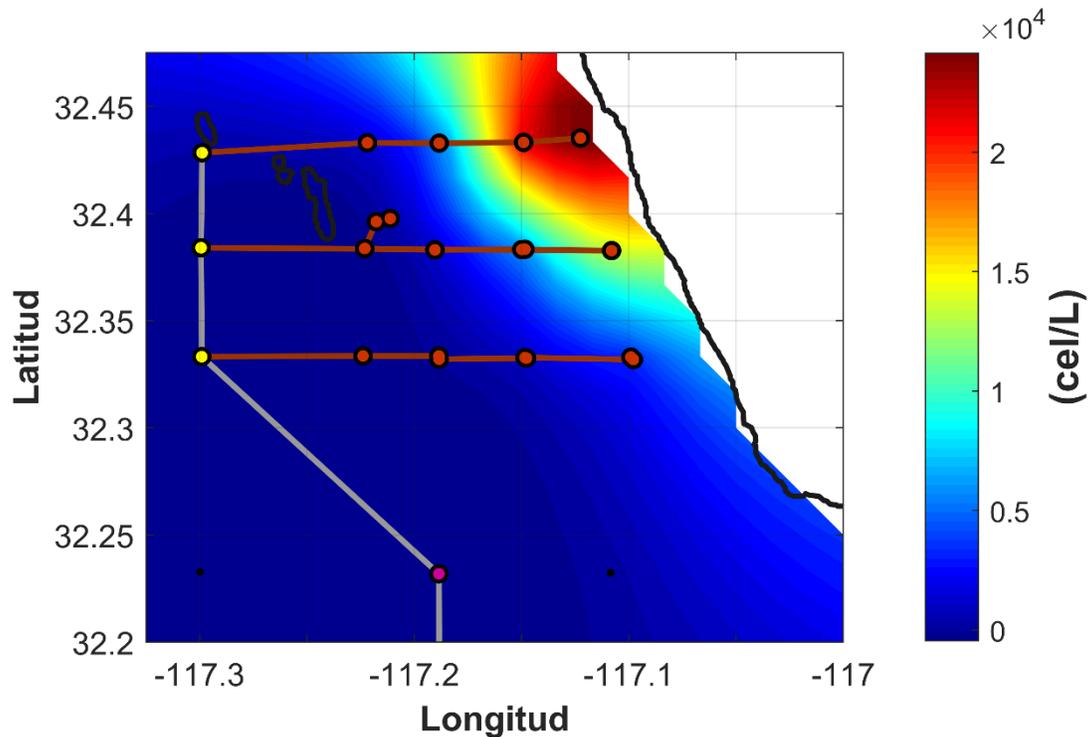


Figura 10. Muestreo superficial de *Co. fulvescens*. Presenta los mismos transectos que la Figura 9, con un acercamiento en la zona de las Islas Coronado (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019)).

6.2.2. Distribución de las especies ictiotóxicas en la sección de análisis.

Además de ser la zona con mayor abundancia de especies ictiotóxicas, la sección de análisis ubicada alrededor de las Islas Coronado es una zona donde se encuentran encierros de atún, los cuales se pueden ver afectados con la presencia de *Chattonella*, spp., y *Co. fulvescens*. En la Figura 11 se presenta la distribución de la fluorescencia y las abundancias de *Chattonella* registradas en los tres transectos realizados en la sección de análisis. Esta especie se presentó principalmente en la superficie y su abundancia no coincide con la profundidad del parche de fluorescencia, según las Figuras 11b y 11c. Esto no se cumple en la Figura 11a, donde la especie sí se encontró en la superficie en los dos puntos de

muestreo más alejados de la costa, pero en los 3 más someros no se presentó en la superficie y no se volvió a encontrar hasta la profundidad de 10 m cercana a la costa.

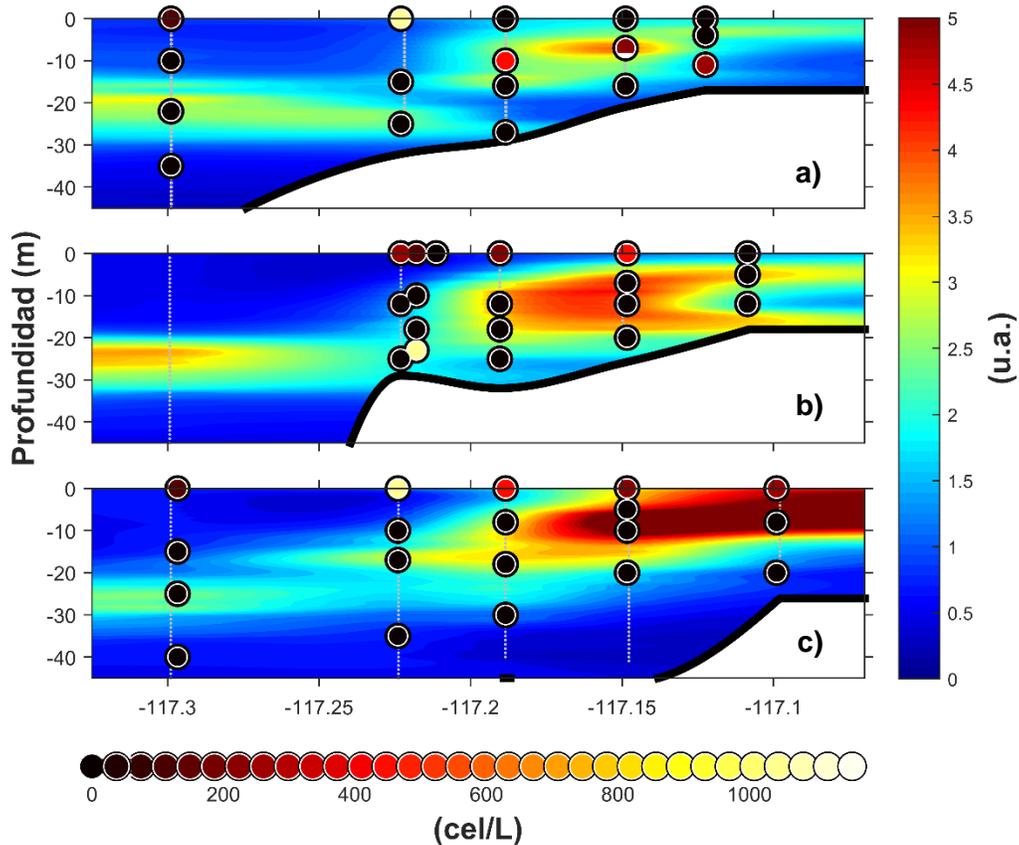


Figura 11. Secciones de las Islas Coronado para *Chattonella* (ver Figura 1). El panel (a) corresponde al transecto más norteño y el panel (c) al más sureño. Entre la sección intermedia y la sección sur se encuentran las Islas Coronado. Los puntos sobre la distribución de la señal de fluorescencia corresponden a los muestreos discretos de agua para el conteo de células. (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019)).

Continuando con el mismo comportamiento de los transectos mostrados en las Figuras 11b y 11c, en la Figura 12 se muestra el transecto paralelo a la costa, perpendicular a los tres transectos de la Figura 11. En este transecto *Chattonella* sólo se detectó en superficie, en la parte más al norte.

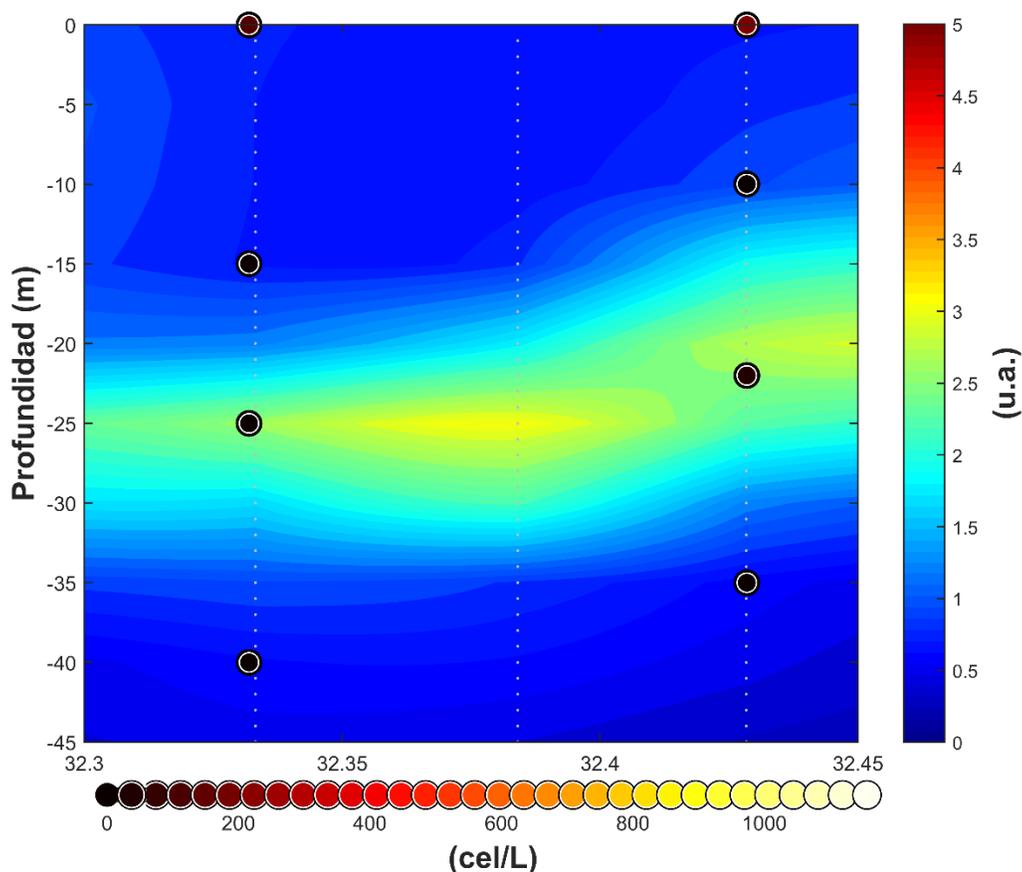


Figura 12. Sección paralela a la costa de *Chattonella*. Se muestra señal de fluorescencia (barra derecha) y células/L (barra inferior). (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019)).

En el caso de *Co. fulvescens*, es tal su abundancia que se encontró en toda el área de derrotero. En el caso de las Figuras 13 y 14 no significa que no exista la presencia de la especie, sino que la escala es tan amplia (0-25,000 células/L) que aparenta no estar presente. Sin embargo, los puntos más oscuros (casi negros) de estas figuras varían entre las 150 y 250 células/L.

Enfatizando las características de cada transecto, en la Figura 13a muestra que las altas abundancias (10,000-25,000 células/L) se presentaron cercanas a la costa en las dos estaciones más someras del transecto localizado más al norte de la región. En el transecto intermedio (Figura 13b) se presentó el mismo patrón, sólo

que en este caso la profundidad del fondo permite al organismo alcanzar la profundidad de 20 m, sin disminuir las altas concentraciones que presenta en las Figuras 13a y 13b.

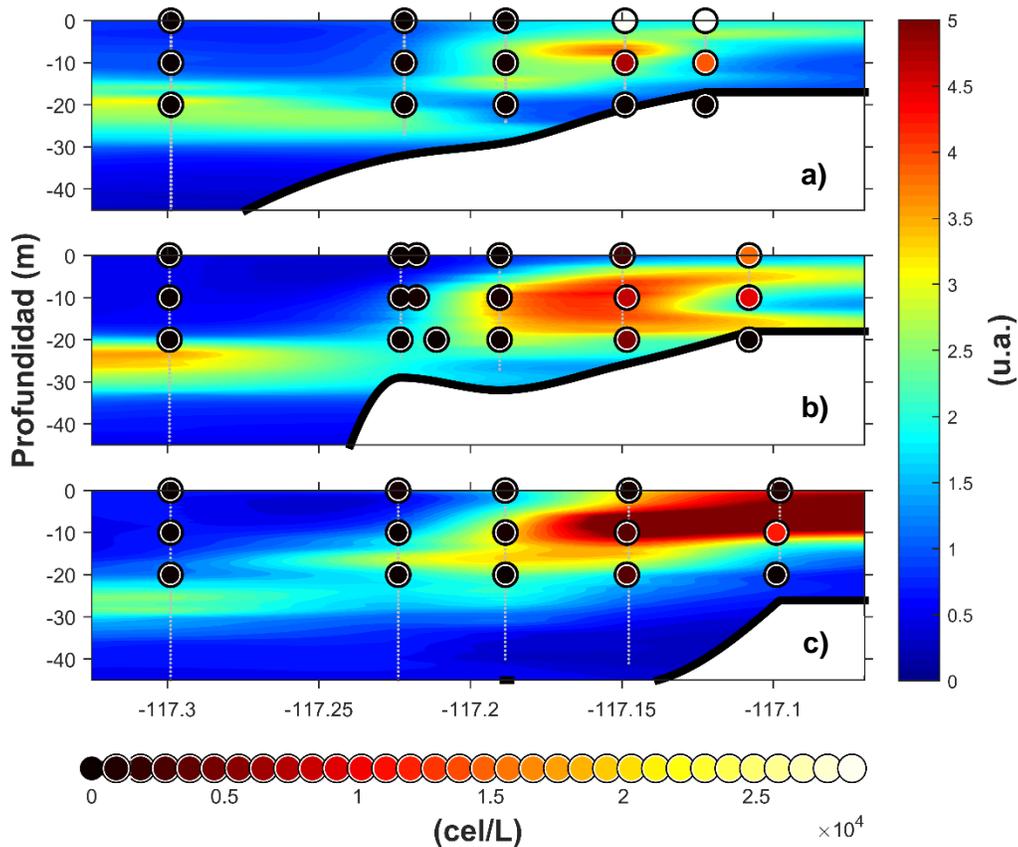


Figura 13. Secciones de las Islas Coronado para *Co. fulvescens*; el panel (a) corresponde a la más norteña y el panel (c) a la más sureña, ubicándose entre ambas las Islas Coronado. Representando el mapeo de fondo, la barra de colores de lado izquierdo cuantifica la fluorescencia y la barra de abajo la escala de colores asignada a la cantidad de células/L que se encontró en las muestras de agua. (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019)).

A diferencia de las secciones de *Chattonella*, *Co. fulvescens* no se acumuló sólo en la superficie del muestreo, sino que se encontró de manera abundante en las estaciones más someras. A pesar de esto, sí se encontró presencia de *Co. fulvescens* en el resto de la superficie, pero disminuye su concentración a 500-1,500 células/L.

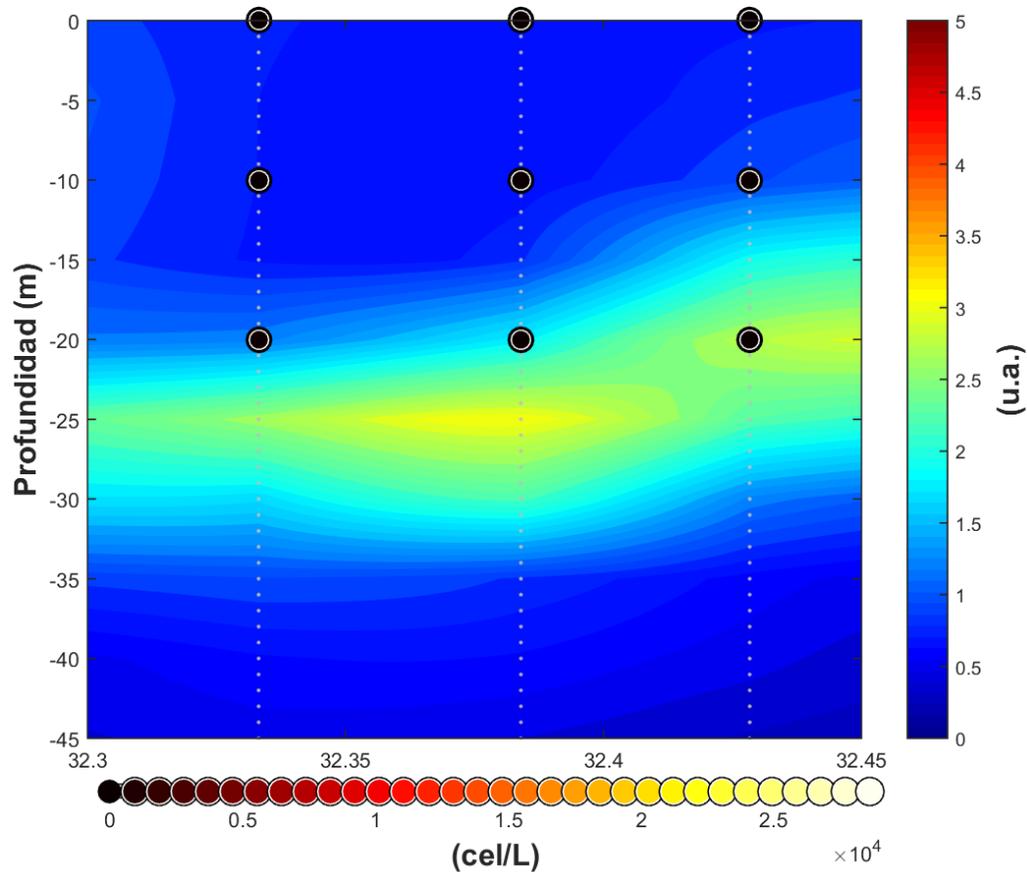


Figura 14. Sección paralela a la costa de *Co. fulvescens*. Representando el mapeo de fondo, la barra de colores de lado izquierdo cuantifica la fluorescencia y la barra de abajo la escala de colores asignada a la cantidad de células/L que se encontró en las muestras de agua. (Datos de distribución obtenidos de Fimbres-Martínez (2019)).

La abundancia de *Co. fulvescens* en el transecto paralelo a la costa muestra que esta especie tiene una distribución costera (Figura 14). En comparación con las estaciones cercanas a la costa, la presencia de *Co. fulvescens* es mínima, se registraron en algunas estaciones más oceánicas abundancias de 100-150 células/L en las tomas más profundas, alrededor de los 20 m.

7. Discusión

Durante marzo de 2017 se realizó una campaña oceanográfica con el objetivo de identificar y caracterizar la distribución de especies con potencial ictiotóxico que causaron una mortandad importante de atunes entre el verano de 2016 e invierno 2017.

Las especies identificadas y cuantificadas por Fimbres (2019) fueron *Chattonella* (radiofita que era el objetivo de la campaña) y *Co. fulvescens* (dinoflagelado descubierto durante la campaña). Los resultados de la cuantificación de las células en las muestras de agua a lo largo del crucero, dieron como resultado que durante este había una abundancia baja de *Chattonella* (máximos de 500 células/L), y en comparación al florecimiento de *Co. fulvescens*, con un máximo aproximado de 29,000 células/L.

Las características físicas que favorecieron la formación de los florecimientos vienen desde la disponibilidad de nutrientes hasta condiciones de variables físicas como salinidad y temperatura favorables para determinadas especies.

En este caso, la presencia de especies de *Chattonella* que se registraron por primera vez en la Bahía de Todos Santos y alrededores entre los meses de junio y agosto de 2016, estuvo asociada al aumento de temperatura en la columna de agua (Fimbres-Martínez, 2019).

7.1. Condiciones Hidrográficas

7.1.1. Secciones Verticales

En este caso en particular, el análisis de la hidrografía durante el periodo de muestreo, se puede observar la interacción de masas de agua con distintas características (Figura 2), donde se puede suponer la presencia de una estructura subsuperficial. Para corroborar lo anterior, en la sección vertical profunda, en la distribución de salinidad y oxígeno disuelto se puede observar que estas se comportan de manera similar entre ellas, alrededor de los 250 m donde se observa una estructura, misma que se presenta en la temperatura de forma inversa.

En la velocidad geostrófica (Figura 4) se observa una corriente (de magnitud de alrededor de 10 cm/s) que está relacionada con estas variaciones, además de que alrededor de esta corriente se presentan cambios de signo en su velocidad (excepto en al fondo). De esto se pueden discutir dos aspectos dinámicos, que parecen estar presentes al mismo tiempo.

Uno de los aspectos dinámicos es una corriente asociada al frente de surgencia, la cual se genera a consecuencia del desplazamiento de las masas de agua superficiales modificando la distribución de las isopicnas que se ajustan a causa del desplazamiento de agua y generan esta corriente (Rivas y Samelson, 2011) mediante un ajuste esencialmente geostrófico. En este caso se ve en general una relajación de la surgencia durante los días de crucero, ya que se observa una disminución de la intensidad del viento días antes del periodo del crucero (ver Figura 3). Desde la perspectiva de la columna de agua, en el mapeo de la temperatura

(Figura 4a) apenas se alcanza a observar cómo la termoclina se eleva hacia la costa.

La estructura antes mencionada presenta un comportamiento similar a un remolino subsuperficial, como el descrito por Almazán-Becerril *et al.* (2012) frente a la zona de Bahía Vizcaíno, Baja California Sur. De acuerdo a estos autores, estas estructuras influyen en la distribución de la clorofila en la columna de agua modificando la profundidad y magnitud del máximo subsuperficial de clorofila. Esto también puede apreciarse en la distribución de la señal fluorescencia de la sección vertical profunda (Figura 5), donde se observan los parches de fluorescencia que parecen estar relacionados con la forma de la estructura subsuperficial.

Se necesita un mayor análisis para reforzar lo observado y llegar a una conclusión sobre la presencia de estas estructuras. Se podría profundizar más en este tema mediante el uso de un modelo numérico, pero esto está fuera del alcance de esta tesis.

7.1.2. Distribución de las variables obtenidas de CTD

Las variaciones de la temperatura en la región han sido el principal foco de atención debido a la influencia atípica de una masa de agua caliente conocida como “El Blob” o “La Macha”. Esta masa cálida permaneció afectando el área desde 2013 a 2016 y trajo consigo temperaturas que llegaron a superar los 20°C y salinidades hasta ~33.7 (Durazo et al., 2017) mientras que la temperatura típica de la región ha sido alrededor de 15 a 19°C dependiendo de la estación (Durazo et al., 2010). y ~33.5 de salinidad en general (Durazo et al., 2017).

Las temperaturas aquí reportadas son de $\sim 16^{\circ}\text{C}$, disminuyendo en la costa ($\sim 14^{\circ}\text{C}$) a causa de la leve surgencia y aumentando dentro de la bahía ($\sim 17^{\circ}\text{C}$), situaciones típicas en la zona en la temporada de primavera. La salinidad se mantiene a alrededor de 33.3 y esta es ligeramente menor al norte de las Islas Coronado y dentro de la Bahía (~ 33.22), lo cual se le atribuye al aporte de agua continental por el río Tijuana y los arroyos de Ensenada, respectivamente.

En comparación con los valores típicos de la Corriente de California descritos por Durazo *et al.* (2010), la disminución de la salinidad en marzo de 2017 se debe a las precipitaciones que se presentaron a principios de año. De acuerdo a los datos del NARR, el último registro de precipitación en la región fue un día antes del inicio de la campaña oceanográfica (Figura 15). Además de que se tuvo registro de mayores precipitaciones durante el mes de febrero, concluyendo en parte la temporada de lluvias del invierno 2016-2017.

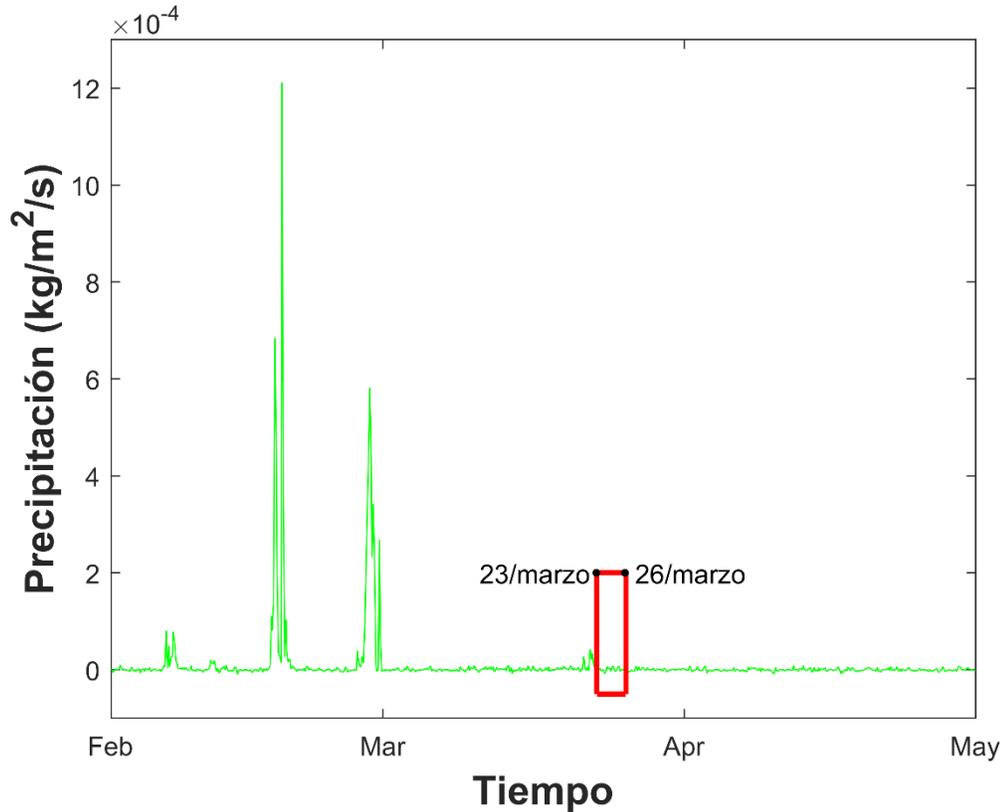


Figure 15. Razón de precipitación obtenida del NARR para los meses de febrero a abril de 2017. El rectángulo indica las fechas de la campaña oceanográfica.

Después de menos de un año de que se presentó el “El Blob”, regresar a las condiciones típicas pudo ser causante del cambio de la comunidad fitoplanctónica en el área de estudio. A pesar de que el objetivo de la campaña fue buscar quistes de *Chattonella*, se encontró un florecimiento de *Co. fulvescens* y la comunidad cambió de radiofitas (especies afines a temperaturas cálidas) a dinoflagelados (afines a temperaturas bajas) (Fimbres-Martínez, 2019).

7.2. Distribución de *Chattonella* y *Co. fulvescens*.

Chattonella y *Co. fulvescens* no son las únicas especies de la columna de agua. La abundancia del fitoplancton se muestra en la señal de fluorescencia en

forma de parches. Esto está relacionado con el máximo subsuperficial de clorofila que tiene como característica particular “preferir” distintas profundidades.

En particular, *Chattonella* se presenta en el área de estudio sólo dentro de la Bahía de Todos Santos y al sur de las Islas Coronado donde tuvo su mayor concentración en superficie (Figura 9). Con respecto a su comportamiento en la columna de agua, *Chattonella* (Figuras 11 y 12) muestra en general una preferencia por la superficie a excepción del transecto más norteño (Figura 11a), pero en las estaciones más someras prefiere estar a la profundidad del parche de fluorescencia.

Al igual que en Fimbres-Martínez (2019), en el caso de *Co. fulvescens* las mayores concentraciones sólo se encontraron cerca de la costa (en las dos estaciones más cercanas a esta). En las otras 3 estaciones alejadas de la costa sí se presenta este organismo, pero en menor cantidad.

En relación con los parches de fluorescencia, *Co. fulvescens* no se asocia como tal en cuestión de profundidad y probablemente sea otro factor que determine su acumulación en el área somera. Sin embargo, sí se encontró una pequeña asociación en el transecto paralelo a la costa, donde se muestra en concentraciones de 150 células/L en las tomas más profundas, justo debajo del parche de fluorescencia.

8. Conclusiones

Se encontró una estructura subsuperficial que podría ser un remolino el cual aparentemente interaccionaba con una corriente costera asociada al frente de surgencia. Después de analizar la estructura vertical de la densidad, se observó que la posición de las isopícnas concuerda con la distribución de los parches de fitoplancton, por lo que se puede deducir que el aparente remolino influye la distribución de estos en la columna de agua.

Las condiciones de temperatura volvieron a su comportamiento típico en la región, teniendo un registro promedio de $\sim 15^{\circ}\text{C}$ en la campaña, después del evento anómalo de “*El Blob*” y “El Niño” que afectó las aguas de las Californias.

La salinidad por su parte varió a causa de los aportes de agua continental después de alrededor de 2 meses de lluvias intermitentes en la región. Condición que fertilizó la costa, además de las surgencias típicas de la temporada.

Ambas situaciones favorecieron la proliferación de la especie de *Cochlodinium cf. fulvescens* en marzo de 2017.

9. Bibliografía

Aguilar-Martínez, P. (2015). Variación estacional de parámetros ambientales e hidrológicos de la laguna Chacmochuch, Quintana Roo. Centro de investigación Científica de Yucatán, A. C.

Almazán-Becerril, A., Rivas, D., y García-Mendoza, E. (2012). The influence of mesoscale physical structures in the phytoplankton taxonomic composition of

the subsurface chlorophyll maximum off western Baja California. *Deep-Sea Research I*. 70, 91-102.

Bravo-Sierra, E. (2004). Fitoflagelados potencialmente tóxicos y nocivos de costas del Pacífico mexicano. *Revista Biológica Tropical*, 52(1), 5-16.

Durazo, R., Ramírez-Manguilar, A.M., Miranda, L. E., y Soto-Mardones, L. A. (2010) Climatología de variables hidrográficas. Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007. Primera edición 2010.

Durazo, R., Castro, R., Miranda, L. E., Delgadillo-Hinojosa, F., & Mejía-Trejo, A. (2017) Anomalous hydrographic conditions off the northwestern coast of the Baja California Peninsula during 2013–2016. *Ciencias Marinas*, 43(2), 81-92.

Fimbres Martínez, M. (2019) Distribución y abundancia de microalgas ictiotóxicas en la costa noroeste de Baja California, México. Tesis de Maestría. CICESE.

Gill, A. E. (2016) *Atmospheric-Ocean Dynamics*. Elsevier, 682 pp.

Ichiro, I., y Mineo, Y. (2012). Life cycle, physiology, ecology and red tide occurrences of the fish-killing raphidophyte *Chattonella*. *Harmful Algae*, 14, 46-70.

Kudela, R. M., y Gobler, C. J. (2012). Harmful dinoflagellate blooms caused by *Cochlodinium* sp.: Global expansion and ecological strategies facilitating bloom formation. *Harmful Algae*. 14, 71-86.

Mesinger F, DiMego G, Kalnay E, Mitchell K, Shafran PC, Ebisuzaki W, Jovic

D, Woollen J, Rogers E, Berbery EH, Ek MB, Fan Y, Grumbine R, Higgins W,

Li H, Lin Y, Manikin G, Parrish D, Shi W. 2006. North American Regional

Reanalysis. Bull. Am. Meteor. Soc. 87: 343-360.

Pérez-Brunius, P., López, M., y Pineda, J. (2006). Hydrographic conditions near the coast of northwestern Baja California: 1997-2004. *Continental Shelf Research*, 26(8), 885-901.

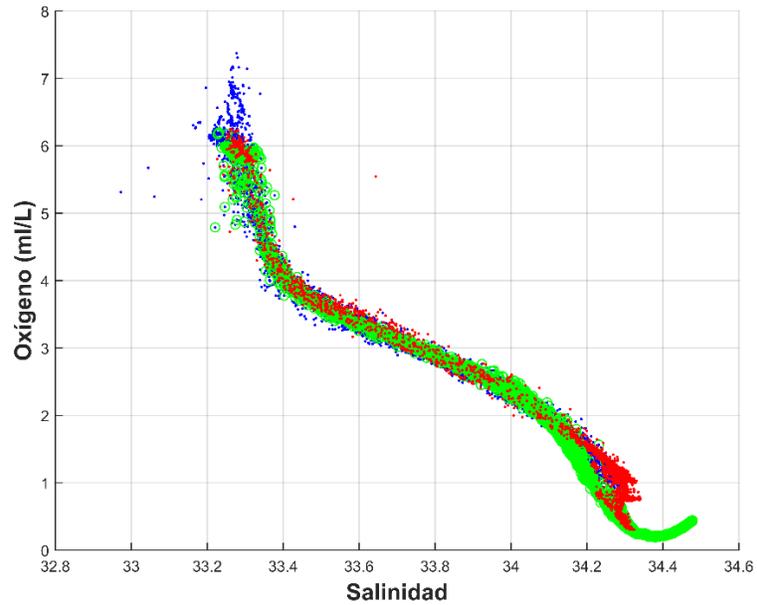
Pérez Morales, A. (2011). Efecto tóxico de cepas de *Chattonella*, spp., (Raphidophyceae) sobre las fases iniciales de vida de *Paralabrax maculatofasciatus* (Teleostei: Serranidae) y *Litopenaeus vannamei* (Decapoda: Penaeidae). Tesis Doctor en Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional.

Periáñez, R. 2010. Fundamentos de Oceanografía Dinámica. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 284 pp.

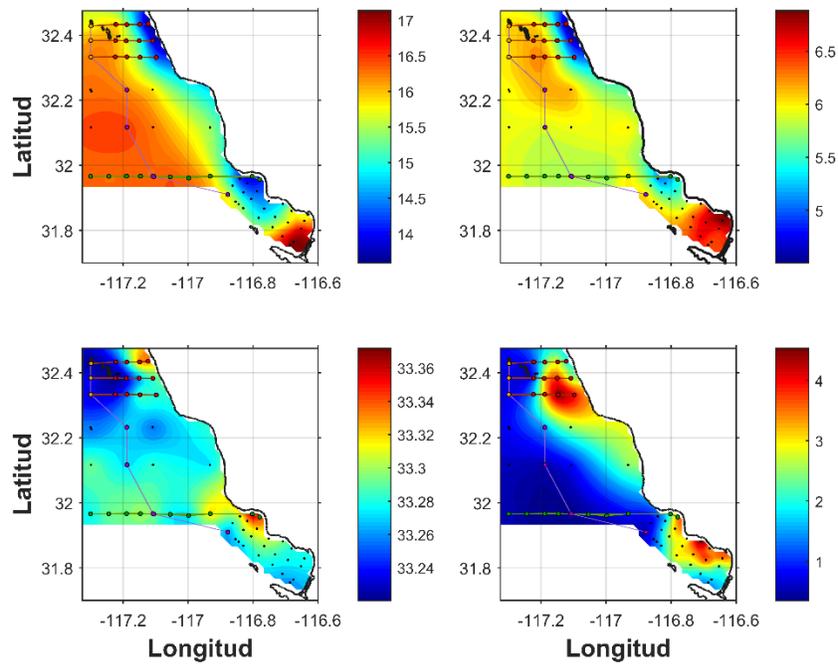
Rivas, D. y Samelson, R. M. (2011) A numerical modeling of the upwelling source waters along the Oregon coast during 2005. *Journal of Physical Oceanography*. 41, 88-112.

Roemmich, D. (1983). Optimal Estimation of hydrographic station data and derived fields. *Journal of Physical Oceanography*, 13, 1544-1549.

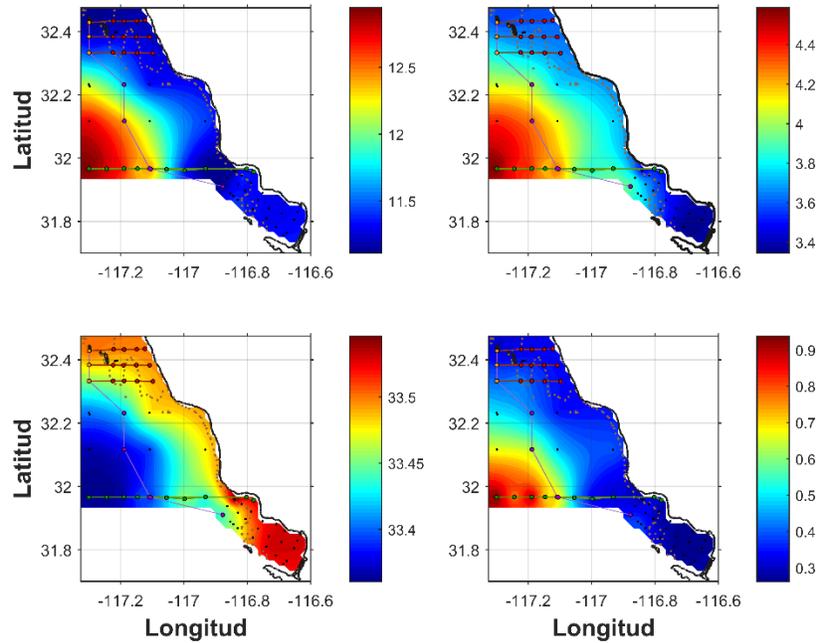
Anexos



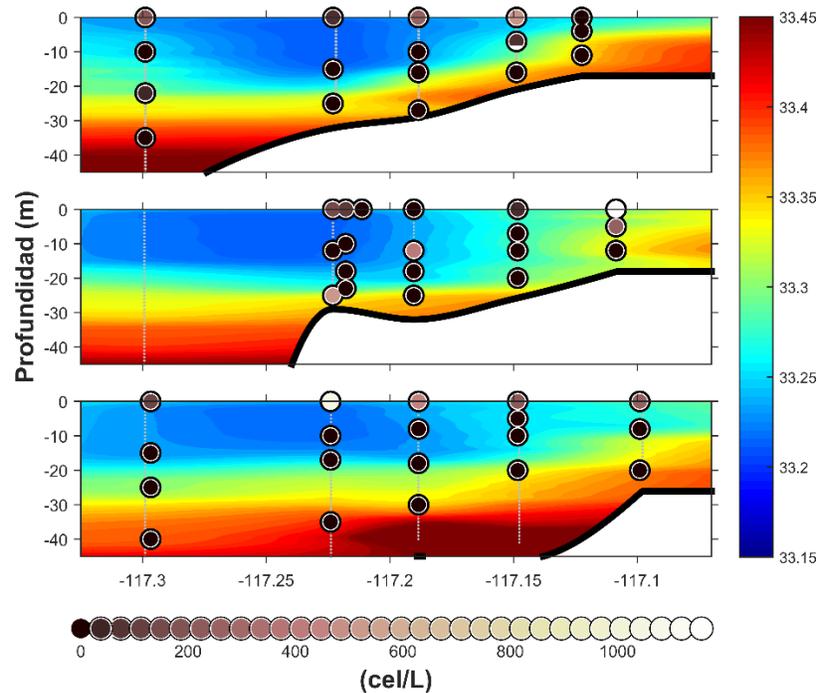
Anexo 1. Diagrama O-S (Oxígeno-Salinidad), relación entre ambas variables. En rojo y verde se muestran estaciones seleccionadas para describir la estructura de la sección profunda.



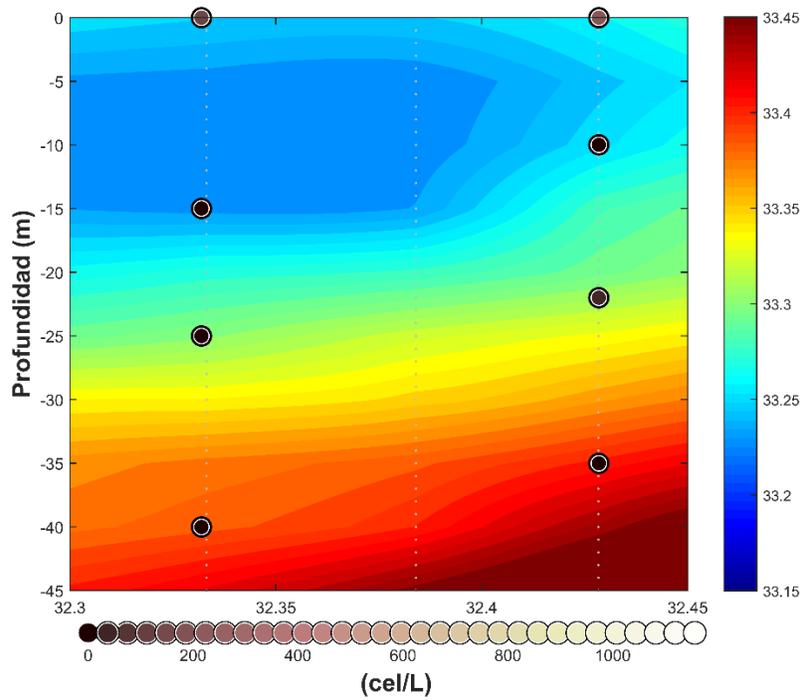
Anexo 2. Mapeos a 10 m de: a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) oxígeno disuelto (ml/L), c) salinidad y d) fluorescencia (unidades arbitrarias).



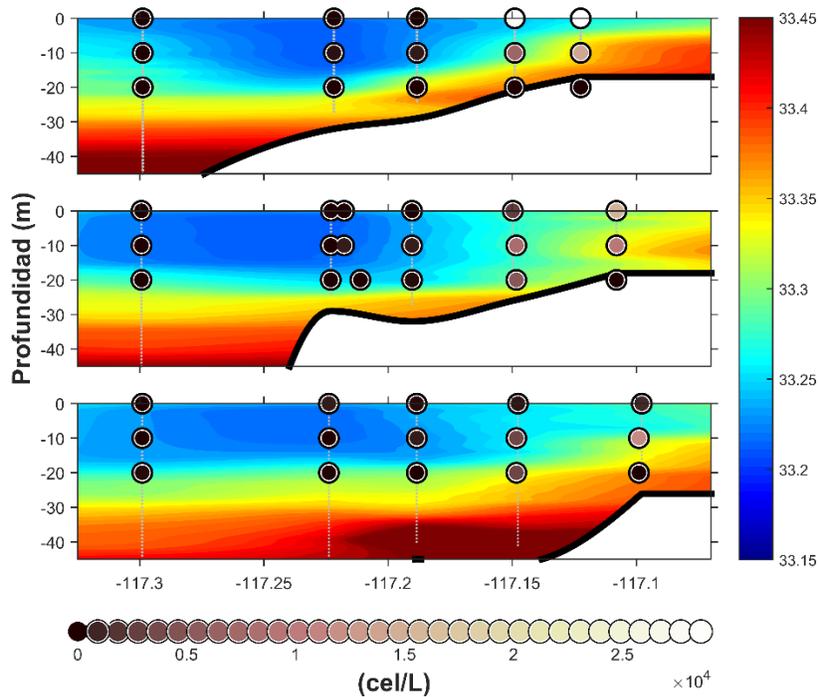
Anexo 3. Mapeos a 50 m de: a) temperatura (°C), b) oxígeno disuelto(ml/L), c) salinidad y d) fluorescencia (unidades arbitrarias).



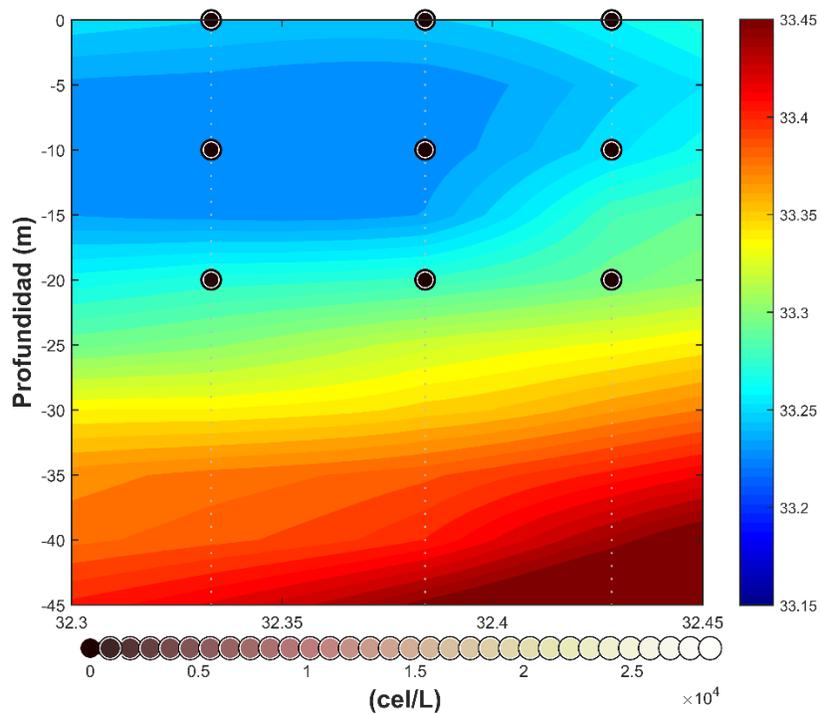
Anexo 4. Secciones de las Islas Coronado para *Chattonella*. Representando el mapeo de fondo, la barra de colores de lado izquierdo cuantifica la salinidad y la barra de abajo la escala de colores asignada a la cantidad de células/Litro que se encontró en las muestras de agua.



Anexo 5. Sección paralela a la costa de *Chattonella*. Presenta la misma simbología que el Anexo 6, en barra de colores y escala de color en puntos.



Anexo 6 Secciones de las Islas Coronado para *Co. fulvescens*. Al igual que los Anexos 4 y 5, la barra de colores cuantifica la salinidad y la barra de puntos las células/L que se encontró en cada muestra de agua.



Anexo 7. Sección paralela a la costa de *Co. fulvescens*. La barra de colores cuantifica la salinidad y los puntos la cantidad de células/L de cada muestra.