



**Universidad Autónoma de
Baja California**



Facultad de Ciencias Marinas

**VARIABILIDAD SUPERFICIAL TEMPORAL DE
PARÁMETROS DEL SISTEMA DEL CO₂ EN LA BAHÍA TODOS
SANTOS, ENSENADA: UNA APLICACIÓN EN LA
ACUICULTURA**

TESIS

que para obtener el título de

OCEANÓLOGO

presenta

IVAR CÓRDOVA MEDINA

Ensenada, Baja California, México

Mayo 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
CAMPUS ENSENADA



"VARIABILIDAD SUPERFICIAL TEMPORAL DE PARÁMETROS DEL SISTEMA DEL CO₂ EN LA BAHÍA TODOS SANTOS, ENSENADA: UNA APLICACIÓN EN LA ACUICULTURA"

TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE OCEANÓLOGO

PRESENTA:

IVAR CÓRDOVA MEDINA
360914

A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:


Dr. José Martín Hernández Ayón
DIRECTOR


Dra. Adriana Gisel González Silveira
SINODAL


Dra. Gabriela Yareli Cervantes Díaz
SINODAL


Dr. Carlos Orión Norzagaray López
SINODAL

"Por la Realización Plena del Ser"

C.c.p.- Archivo
C.c.p.- Minutario

RESUMEN

En las últimas décadas, se ha registrado un incremento en las concentraciones de CO₂ atmosférico, atribuido principalmente a las actividades antropogénicas, como lo es la actividad industrial. Esto afecta directamente al océano, ya que este es el responsable de absorber alrededor del 26% de estas emisiones. En la Bahía Todos Santos (BTS), Ensenada, los estudios sobre este tema son escasos, lo que ha limitado la comprensión del sistema del CO₂. El objetivo de este trabajo fue describir y analizar la variabilidad temporal de variables del sistema del CO₂, particularmente el pH y la Alcalinidad Total (AT), en las aguas superficiales de la BTS. Para ello, se realizaron 21 muestreos entre febrero del 2021 hasta abril del 2024 en cuatro puntos de la BTS, en donde se obtuvieron muestras de agua a 0 y 20 m de profundidad para su posterior análisis en laboratorio. Los resultados mostraron una dominancia del Agua Subártica (ASA) en la BTS a lo largo del periodo de estudio, con salinidades entre ~33 a 34, y temperaturas entre los 11 y 24 °C. En la segunda mitad del 2023, con el inicio de un evento El Niño, se registró un incremento del ASA en la BTS, caracterizado por baja salinidad. Esta intrusión de ASA también se reflejó en un ligero incremento en el pH, con valores mayores a ~7.9. La AT mostró una disminución gradual a lo largo del periodo de estudio, con un descenso más marcado en los últimos meses del 2023, lo cual se relaciona directamente con los valores más bajos de salinidad. Estos valores inusuales, asociados al evento El Niño, probablemente se debieron a una intensificación de la Corriente de California, debido a un incremento en la intensidad de los vientos con dirección hacia el Ecuador, lo que favoreció el transporte de un mayor volumen de ASA. Adicionalmente, se determinó una ecuación de relación AT-Salinidad para poder calcular el omega aragonita en la BTS, la cual se aplicó a muestras de cultivos de semilla de ostión de la empresa Maxmar, donde se obtuvieron valores >1.6. Se registraron variaciones estacionales e interanuales en las condiciones termohalinas y en los parámetros del sistema del CO₂, influenciadas principalmente por la advección de masas de agua y fluctuaciones interanuales del ENSO. No se encontraron evidencias de una baja saturación de iones carbonato dentro de los cultivos de semilla de ostión que pudiera afectar su desarrollo.

Palabras clave: *Química del carbono; salinidad; masas de agua; ENSO.*

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis papás por su amor y apoyo incondicional. Gracias por siempre estar para mí y por darme los valores y enseñanzas que me han hecho la persona que soy.

Gracias a mi hermano por haber sido mi compañero durante toda la carrera y por haberme apoyado en todo momento.

Gracias a mi novia por siempre ayudarme a ser la mejor persona posible y por motivarme siempre que lo necesité.

Gracias al Dr. José Martín Hernández Ayón por haberme recibido en el laboratorio de química del CO₂ y por todas las enseñanzas y el tiempo que me ha dedicado.

Agradezco a mi comité de tesis Dr. José Martín Hernández Ayón, Dra. Adriana Gisel González Silvera, Dra. Gabriela Yareli Cervantes Díaz y Dr. Carlos Orión Norzagaray López por todos los comentarios y sugerencias tan acertados.

Gracias a todo el CO₂ team por todo el apoyo, en especial a Gaby por siempre asesorarme y ayudarme en los análisis de laboratorio.

Agradezco a todos mis profesores de la licenciatura por compartir siempre con pasión sus conocimientos, en especial a la profe Karina, al profe Rubén y al profe Julio.

Muchas gracias a todos mis amigos de la carrera por todas las risas y apoyo que siempre tuvimos, en especial a Agustín, Amir e Iván.

Gracias por el apoyo brindado por el proyecto CONACyT CF-2019-13277141 y a las organizaciones POGO y Nippon Foundation (Proyecto NANO-DOAP, <https://nf-pogo-alumni.org/projects/global/>).

Gracias al grupo POPEYE por toda la ayuda y colaboración durante los muestreos.

Gracias a la empresa Maxmar por la ayuda proporcionada con las mediciones de pCO_2 en sus sistemas de cultivo. También agradezco al Dr. Burke Hales y a The Ocean Foundation por proporcionar el instrumento “ pCO_2 to Go”.

DEDICATORIA

A mis papás

*Por ser mis mayores ejemplos en la vida
y por su esfuerzo de siempre buscar mi felicidad.*

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	ANTECEDENTES	4
3	HIPÓTESIS	7
4	OBJETIVOS	7
4.1	Objetivo principal	7
4.2	Objetivos particulares	7
5	METODOLOGÍA.....	8
5.1	Área de estudio	8
5.2	Muestreo en campo	9
5.3	Análisis en laboratorio	11
5.3.1	Determinación de Alcalinidad Total (AT).....	11
5.3.2	Determinación de pH	11
5.3.3	Determinación de CID	11
5.4	Procesamiento de datos.....	12
5.4.1	Determinación de Ω_{arag}	12
5.4.2	Mapas de distribución espacial de temperatura y salinidad superficial.....	13
6	RESULTADOS	13
6.1	Variabilidad del sistema del CO ₂ y variables oceanográficas en la BTS.....	13
6.1.1	Condiciones oceanográficas interanuales en la BTS (ENSO).....	13
6.1.2	Análisis de masas de agua.....	14
6.1.3	Variables oceanográficas en la BTS.....	16
6.1.4	Variabilidad de los parámetros del sistema del CO ₂ en la BTS.....	29
6.2	Estimación de Ω_{arag} en cultivos de semilla de ostión dentro de la empresa Maxmar.....	32
7	DISCUSIÓN.....	34
7.1	Variabilidad de las condiciones oceanográficas (termohalinas)	34
7.2	Variabilidad temporal de las variables del sistema del CO ₂	36
7.3	Análisis de aplicación en la acuicultura	40
8	CONCLUSIONES.....	42
9	LITERATURA CITADA	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del área de estudio con las cuatro estaciones en las que se realizaron los muestreos. El recuadro punteado indica el cuadrante del que se obtuvieron los datos satelitales.....	9
Figura 2. Ubicaciones dentro de la empresa Maxmar donde se realizaron las mediciones de pCO ₂ . a) Primer filtro (remoción de sólidos) para el agua de mar después de ser bombeada, b) Cultivos de semilla de ostión, c) Cultivos de larva de ostión, d) Sistemas de recirculación de agua para las semillas de ostión.....	10
Figura 3. Serie de tiempo de anomalías del Índice Multivariado ENSO (MEI) para el periodo entre enero de 2013 y mayo de 2024. Los valores de este índice fueron obtenidos de http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/ . Entre las líneas punteadas se marca el periodo de muestreo en la BTS.....	14
Figura 4. Diagrama T-S 2021-2024 de la BTS. ASA: Agua Subártica, AESs: Agua Ecuatorial Subsuperficial, AStS: Agua Subtropical Superficial. Los intervalos de las masas de agua se definieron con base a Durazo y Baumgartner (2002). Los años se encuentran divididos por colores: 2021 (azul), 2022 (verde), 2023 (rojo) y 2024 (rosa).....	15
Figura 5. Serie de tiempo de salinidad determinada por el CTD durante los muestreos en la BTS febrero 2021 – abril 2024.....	16
Figura 6. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional en la BTS durante el 2021. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	17
Figura 7. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2021. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	18
Figura 8. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional en la BTS durante el 2022. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	19
Figura 9. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2022. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	20
Figura 10. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional en la BTS durante el 2023. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	21
Figura 11. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2023. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	22
Figura 12. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional en la BTS durante el 2021. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	23

Figura 13. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2021. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	24
Figura 14. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional en la BTS durante el 2022. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	25
Figura 15. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2022. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	26
Figura 16. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional en la BTS durante el 2023. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	27
Figura 17. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2023. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00021	28
Figura 18. Serie de tiempo de Alcalinidad Total entre febrero 2021 – abril 2024 en la BTS.....	29
Figura 19. Serie de tiempo de pH entre febrero 2021 – abril 2024 en la BTS.	30
Figura 20. Serie de tiempo de Carbono Inorgánico Disuelto entre abril 2023 – abril 2024 en la BTS.	31
Figura 21. Serie de tiempo de Ω arag entre febrero 2021 – abril 2024 en la BTS.	32
Figura 22. Relación Alcalinidad Total contra Salinidad BTS entre febrero 2021–abril 2024.....	33
Figura 23. Serie de tiempo de concentraciones de clorofila <i>a</i> dentro de la BTS durante febrero 2021-abril 2024. Los datos se obtuvieron de https://data.marine.copernicus.eu DOI: https://doi.org/10.48670/moi-00019	36
Figura 24. Diagrama T-S vs AT. Los puntos en colores representan las concentraciones de Alcalinidad Total.....	37
Figura 25. Esquema con los principales procesos físicos que influyen en la biogeoquímica del carbono en la BTS.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Estimaciones de Ω aragonita con base a las mediciones realizadas (S, T y pCO ₂) en cultivos de semilla de ostión de la empresa Maxmar durante marzo del 2024.	33
--	----

1 INTRODUCCIÓN

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera han aumentado considerablemente en los últimos 250 años, principalmente ocasionado por la actividad humana, en particular por la quema de combustibles fósiles. El océano desempeña un papel crucial al absorber alrededor del 26% de estas emisiones de CO_2 atmosférico, lo que ayuda a atenuar estos incrementos (Friedlingstein *et al.*, 2024). Sin embargo, este proceso provoca una disminución en los valores de pH, derivado de un aumento de las concentraciones de protones (H^+), y una disminución de las concentraciones de los iones carbonato (CO_3^{2-}), así como un aumento del ion bicarbonato (HCO_3^{-1}) en el agua. A este proceso se le denomina acidificación del océano, lo que modifica el balance químico oceánico y pone en riesgo a ecosistemas marinos como los arrecifes de coral y dificulta la supervivencia de los organismos calcáreos (Feely *et al.*, 2004; Doney *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2019).

Para comprender el sistema del CO_2 en el océano se estudian cuatro parámetros clave: pH, alcalinidad total (AT), carbono inorgánico disuelto (CID) y presión parcial del CO_2 ($p\text{CO}_2$) (Millero, 2013). A partir de la medición de dos de estos cuatro parámetros, junto con constantes de equilibrio, valores de temperatura, salinidad, presión y la concentración de microconstituyentes del agua de mar como los fosfatos y silicatos, es posible estimar las concentraciones de las diferentes especies que componen el sistema del dióxido de carbono en el océano, así como calcular los otros dos parámetros del sistema de los carbonatos (Dickson *et al.*, 2007). Otro parámetro importante, especialmente en estudios sobre organismos calcáreos, es el estado de saturación del CaCO_3 , que en el medio marino se encuentra en forma de los minerales aragonita (Ω_{arag}) y calcita (Ω_{calc}). En particular se estudia el estado de saturación de estos minerales (Ω_{arag} y Ω_{calc}), ya que representan las principales formas cristalinas del CaCO_3 . De manera general, valores de Ω_{arag} y Ω_{calc} por arriba de 1 nos indican condiciones favorables para la formación de estructuras de CaCO_3 de los organismos calcáreos, mientras que si este valor es menor a 1 nos indica que hay una deficiencia de carbonatos. Condiciones de saturación menores a 1 no son favorables para que puedan formar de buena manera sus conchas o exoesqueletos. No obstante, los rangos óptimos de estos índices varían según el organismo y la especie (Juránek *et al.*, 2011; Leung *et al.*, 2022).

El Sistema de la Corriente de California (SCC), donde fluye la Corriente de California (CC) y del cual forma parte la Bahía Todos Santos (BTS), es una zona ampliamente estudiada desde el punto de vista oceanográfico. La CC transporta Agua Subártica (ASA), lo que le atribuye un intervalo de temperatura de entre 10 °C-20 °C y salinidades de entre 32.5-33.8 (Durazo, 2015). Además, se caracteriza por la presencia de surgencias costeras, las cuales aportan altas concentraciones de nutrientes y bajas de oxígeno (Durazo, 2015). Sin embargo, con lo que respecta al sistema del CO₂, los estudios en la BTS siguen siendo escasos.

Los estudios sobre la dinámica del CO₂ en la BTS han sido enfocados en resolver su variabilidad a distintas escalas temporales. Por ejemplo, Coronado-Álvarez *et al.* (2017) analizaron series de tiempo dentro del periodo de 2008 a 2015 para identificar los procesos que modifican la presión parcial del CO₂ (pCO_2) y el flujo de CO₂ (FCO₂) entre océano-atmósfera en distintas escalas de tiempo, desde semidiurnas hasta interanuales, en una localidad ubicada en la parte sur de la Corriente de California, frente a Ensenada. Sus resultados mostraron diferencias significativas del pCO_2 y FCO₂ entre los años con condiciones de La Niña y años normales o afectados por ondas de calor (ej. El Niño y el Blob). Durante los años con la condición de La Niña, los intervalos de estas dos variables presentaron una mayor amplitud, con mínimos menores y máximos mayores en comparación con los registrados durante el resto de los años. Además de los fenómenos anteriores, los autores encontraron que eventos de surgencia, ciclos estacionales y brisas marinas también modifican el pCO_2 y el FCO₂ frente a las costas de Ensenada.

Otro estudio es el de Cervantes-Díaz (2013), quien analizó la variabilidad temporal del sistema del CO₂ en la estación Ensenada (sitio de monitoreo al sur de Punta Banda) durante el 2007-2012. Entre los principales resultados, se evidenció una marcada variabilidad estacional e interanual. Se determinó que, por debajo de los 30 m, la advección de masas de agua es el principal proceso que controla la química del CO₂ en esta región, la cual está asociada a ciclos estacionales (escala estacional) o eventos El Niño/La Niña (escala interanual). También se estableció que eventos como las surgencias, la desgasificación y los procesos biológicos contribuyen a las variaciones del sistema del dióxido de carbono.

Otro trabajo fue el realizado por Simón-Otero (2016), quien determinó la profundidad del horizonte de saturación de aragonita (ZΩarag) frente a las costas de Baja California durante El Niño 2015-2016. Dicho evento se destacó por haber sido afectado también por la anomalía cálida

el Blob. El estudio se basó en datos obtenidos de dos cruceros oceanográficos, el primero durante septiembre 2015 y el segundo en enero 2016. En el de enero 2016 se registró una mayor profundidad del Z Ω arag entre los 130 y 208 m, mientras que en el crucero de septiembre 2015 fluctuó entre los 96 y 178 m. Estos cambios estuvieron principalmente controlados por la advección de masas de agua, debido a que se encontró que cuando Z Ω arag fue menos profundo, las aguas presentaban mayor salinidad y CID. Lo anterior fue atribuido a la presencia de Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESs). En contraste, al haber una mayor intrusión de ASA, generó un hundimiento del Z Ω arag asociado con aguas de bajas concentraciones de CID.

Existen procesos interanuales que modifican las condiciones físicas y biogeoquímicas de la CC. Entre ellos, el evento de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es el principal fenómeno de escala interanual que influye en esta región. El ENSO se origina en el Pacífico ecuatorial debido a una inestabilidad en la interacción océano-atmósfera, lo que crea variaciones en el clima, en los vientos, lluvias y la circulación, lo que afecta la productividad biológica de los ecosistemas. Este fenómeno (ENSO) oscila entre dos fases: su fase cálida (El Niño) y su fase fría (La Niña), con una frecuencia de 2 a 7 años (Franco-Gordo *et al.*, 2004; Santoso *et al.*, 2017). La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) define estos eventos en base el Índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés), o también mediante el Índice Multivariado ENSO (MEI, por sus siglas en inglés). Un evento El Niño se determina cuando hay cinco meses consecutivos con una anomalía mayor o igual a +0.5 °C, mientras que durante La Niña la anomalía es menor o igual a -0.5 °C (Zhang *et al.*, 2012). Por otro lado, Oliva-Méndez *et al.* (2018) demostraron que la profundidad del horizonte de saturación del aragonita (Z Ω arag) en la BTS varía según la intensidad de las condiciones interanuales. Para este estudio, los autores estimaron el Z Ω arag a partir de mediciones de la pareja CID-AT en la BTS durante el 2011, un año influenciado por La Niña. En dicho estudio encontraron que la profundidad del Z Ω arag se ubicó a los 30 m, lo que representa un ascenso de 10 m en comparación con trabajos previos realizados frente a la BTS.

Las variaciones en las condiciones oceanográficas, provocadas por eventos como los mencionados anteriormente, no solo afectan la química del agua, sino que también se ha reportado como un estrés ambiental, afectando especialmente a los organismos marinos que habitan tanto en la columna de agua como en los sedimentos marinos. Uno de los sectores más afectados es la

acuicultura, ya que los cambios en el ambiente marino influyen directamente en los cultivos de organismos, especialmente cuando estos se desarrollan en sistemas de recirculación que utilizan agua obtenida directamente del mar. O bien, durante el proceso de engorda de bivalvos, los cuales se cultivan directamente en cuerpos de agua y que están a merced de la variabilidad ambiental. Esto es de especial interés, ya que se proyecta que en un futuro la acuicultura se convierta en la principal fuente de proteína marina a nivel mundial (Saavedra *et al.*, 2021).

En los últimos años, el cultivo de organismos marinos calcáreos ha tenido un crecimiento importante, debido a la relativa facilidad técnica para su crecimiento, además de que son considerados una fuente de proteínas sanas y de bajo costo en comparación con peces y crustáceos (Lovatelli *et al.*, 2008; Saavedra *et al.*, 2021). Sin embargo, factores como el cambio climático y la acidificación del océano, han generado mayores dificultades en su cultivo, afectando su desarrollo y crecimiento (Stewart-Sinclair *et al.*, 2020).

Especialmente la acidificación del océano juega un papel importante en el cultivo de organismos calcáreos, ya que es el sector de la acuicultura más perjudicado. Este fenómeno está avanzando rápidamente en zonas costeras y estuarinas, las cuales son zonas ideales para la producción de acuicultura. Se estima que, para finales del siglo, el pH habrá tenido un decremento de 0.4 unidades, lo que podría tener graves repercusiones en estos ecosistemas y en la producción acuícola (Reid *et al.*, 2019).

2 ANTECEDENTES

Oliva-Méndez *et al.* (2018) realizaron el único estudio sobre el sistema del CO₂ en la BTS, donde estudiaron la variación vertical del Ω_{arag} en el interior y exterior de la BTS durante el evento de La Niña 2011. Sus resultados mostraron que las diferencias en las variables físicas y químicas entre las estaciones interiores y exteriores de la BTS fueron significativas únicamente durante invierno y primavera. En estas estaciones, el interior de la BTS presentó temperaturas y valores de Ω_{arag} más bajos, así como valores de salinidad más altos, en comparación con las estaciones exteriores.

Durante los años de 1997-2019 se mantuvo activo el programa de IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California), en el cual se realizaron monitoreos

oceanográficos químicos, físicos y biológicos frente a la costa oeste de la península de Baja California. Como parte de este programa, [Juárez-Colunga et al. \(2010\)](#) presentaron los resultados de pH para el periodo de 2006 a 2008. En su estudio, identificaron que en la CC los principales impulsores de los cambios biogeoquímicos en la zona eufótica son dos masas de agua: el Agua Subártica (ASA) y el Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESs). Determinaron que cuando hay una mayor dominancia de ASA, el intervalo de pH es de 7.7-7.9, mientras que cuando domina la AESs el pH se encuentra entre 7.4 y 7.5. Por su parte, [León-Santos \(2018\)](#) analizó y comparó las variables hidrográficas y químicas, en particular la profundidad del Z Ω arag, durante El Niño 2015 y El Niño-Neutral 2017. Su estudio se enfocó en un transecto ampliamente estudiado por el programa IMECOCAL, denominado “Línea 100”, el cual es representativo de la respuesta del ecosistema marino a las diferentes condiciones interanuales en la región norte, frente a la BTS. Se encontró que, durante el 2015, el Z Ω arag fue en promedio más somero (entre 96-108 m) en comparación con el 2017 (entre 102-199 m). Esto se atribuyó al dominio de ASA durante el 2015, además de otros factores como vientos débiles, altas temperaturas y alta estratificación.

[González-Silvera et al. \(2020\)](#) estudiaron la variabilidad de la comunidad fitoplanctónica en la parte exterior de la BTS en función de su respuesta a eventos interanuales. Para ellos, examinaron 10 años de datos (2007-2016), periodo en el que destacaron dos eventos: La Niña (2007-2009) y un evento fuerte de Anomalía Cálida del Pacífico (2014-2015) denominado “El Blob”, el cual posteriormente desencadenó el evento El Niño (2015-2016). Durante La Niña 2007-2009, se registró una alta intensidad de surgencias, lo que incrementó las concentraciones de nutrientes y, como consecuencia, una mayor proliferación de fitoplanctón de mayor tamaño, principalmente diatomeas y dinoflagelados. En contraste, durante el periodo de El Blob y El Niño 2015-2016, se presentó una disminución en la biomasa fitoplanctónica asociada a la reducción de nutrientes, derivado de una baja intensidad de las surgencias. Sin embargo, se encontró un incremento importante de Clorofitas y Prasinofitas, grupos fitoplanctónicos característicos de condiciones cálidas y oligotróficas.

[Cruz-Rico y Rivas \(2018\)](#) utilizaron un modelo numérico físico-biológico para simular cualitativamente las condiciones oceanográficas de la BTS, con el objetivo de analizar las condiciones y los mecanismos responsables de la variabilidad de la biomasa fitoplanctónica dentro de la BTS. A partir de su modelo, encontraron que los eventos de escala interanual y decadal,

particularmente el ENSO y los modos decadales del Pacífico, son los principales factores que influyen en dicha variabilidad. Esto se debe a que estos eventos modifican los regímenes de viento y de circulación en el SCC, lo que a su vez genera cambios en las características hidrográficas dentro de la BTS.

Por su parte, [Mangi et al., \(2018\)](#) recopilaron estudios realizados entre 2005-2016 sobre el efecto de la acidificación del océano en especies marinas calcáreas de interés comercial. Esto con el fin de estimar y analizar el impacto económico que generará la acidificación del océano en la pesca y acuicultura de organismos calcificadores en Reino Unido para el 2100. Determinaron que la producción de este sector podría disminuir entre el 14% al 28%, lo que se traduciría en potenciales pérdidas económicas anuales de entre 3 a 6 billones de libras esterlinas. Ante este panorama, los autores sugirieron implementar políticas de monitoreo para evaluar el avance de la acidificación del océano tanto en aguas costeras como en mar abierto, así como el seguimiento de la respuesta de especies comerciales a los cambios a las altas concentraciones de CO₂ y bajos valores de pH.

El estudio de la variabilidad del sistema de los carbonatos, en especial de variables clave para organismos sensibles, es información fundamental para la toma de decisiones para el sector productivo acuícola. En el sector acuícola de la ciudad de Ensenada, se encuentra la empresa Maxmar, considerada una de las empresas más importante en la producción de semillas de ostión. Fundada en 1999, la empresa inició con la implementación de un laboratorio en Laguna Manuela, que se trasladó a Ensenada en 2005. Desde su inicio, el laboratorio ha operado con sistemas de flujo abierto con densidades medias altas, basado en el modelo propuesto por de John Bayes de Seasalter Shellfish, Whitstable, Reino Unido. Actualmente, Maxmar cuenta con dos granjas de cultivo, una en Laguna Manuela y otra en San Quintín. A lo largo de los años, la empresa ha producido diversas especies como el ostión japonés (*Crassostrea gigas*), el ostión Kumamoto (*Crassostrea sikamea*), la almeja manila (*Ruditapes philippinarum*) y la almeja mano de león (*Nodipecten subnodosus*). En el laboratorio de Ensenada, también se cultivan semillas y larvas de ostión, los cuales utilizan el agua de la BTS para los tanques de crecimiento. Dado que estos organismos son calcáreos, su desarrollo está directamente influenciado por los cambios en la química del CO₂ en la bahía. Por lo tanto, los monitoreos tanto en de los cultivos como en la BTS

son fundamentales para comprender y mitigar los efectos de las variaciones en las condiciones químicas y oceanográficas en su crecimiento y supervivencia.

Este estudio plantea ampliar la información pertinente al sistema del CO₂ en la BTS, sentando las bases para próximos estudios relacionados. Además, busca proporcionar una aplicación en el ámbito de la acuicultura, específicamente destinado a los cultivos de organismos calcáreos. Finalmente, este trabajo contribuye también con el objetivo ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) 14, cuyo propósito es proteger los ecosistemas marinos y costeros, así como reducir la contaminación marina y la acidificación de los océanos.

3 HIPÓTESIS

La variabilidad temporal de la química del CO₂ en las aguas superficiales de la Bahía Todos Santos (BTS) está influenciada por procesos locales, como surgencias, advección de masas de agua, la interacción entre la atmósfera-océano, y procesos biológicos como la fotosíntesis, entre otros. Además, esta variabilidad está asociada a eventos de mayor escala, como la variabilidad interanual generada por el El Niño Oscilación del Sur (ENSO). Esta fluctuación en el sistema del CO₂ marino dentro de la BTS pudiera modificar la concentración de iones carbonatos disponibles, esenciales para su crecimiento y desarrollo, condición potencialmente negativa/subóptima para los cultivos de organismos calcáreos adyacentes a la bahía.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo principal

-Describir y analizar la variabilidad temporal de parámetros del sistema del CO₂, especialmente pH y AT, en las aguas superficiales de la BTS durante febrero del 2021 a abril del 2024.

4.2 Objetivos particulares

-Aplicar los resultados de este estudio en investigaciones de oceanografía costera y de acuicultura, utilizando el valor promedio de AT obtenido de los muestreos para el cálculo de Ω_{arag} para organismos calcáreos.

-Determinar el Ω arag en cultivos de semilla de ostión, con el fin de conocer el estado de saturación de carbonatos en los cultivos y establecer su relación con la variabilidad del sistema del CO₂ encontrada en la BTS.

5 METODOLOGÍA

La metodología se dividió en tres secciones: el muestreo en campo, el análisis en laboratorio y el procesamiento de datos.

5.1 Área de estudio

La Bahía Todos Santos ([Figura 1](#)), ubicada en Ensenada, Baja California, México, es una bahía semicerrada entre los 31° 41' y 31° 56' N y 116° 34' y 116° 51' O. La BTS tiene una superficie de aproximadamente 330 km² y alrededor del 80% de la bahía tiene una profundidad de entre 10 a 50 m, mientras que el porcentaje restante corresponde a un cañón submarino que alcanza hasta 400 m de profundidad. Esta cuenca está conectada al Océano Pacífico por medio de dos entradas, una al norte entre San Miguel y la Isla Todos Santos, y otra al sur, entre la Isla Todos Santos y Punta Banda ([Aguilar-Rosas et al., 2010](#); [Gutiérrez-Galindo et al., 2010](#); [Delgadillo-Hinojosa et al., 2015](#)).

La BTS forma parte del límite sur de la CC, la cual transporta agua de origen subártico. La variabilidad hidrográfica de la BTS y la fuerza de sus corrientes internas se asocia a la variabilidad del núcleo de la CC y de las fluctuaciones de la intensidad de los vientos. La variabilidad física y química de la columna de agua en la bahía depende de las variaciones en el flujo de la CC y de eventos de surgencia ([Delgadillo-Hinojosa et al., 2015](#); [Durazo et al., 2024](#)).

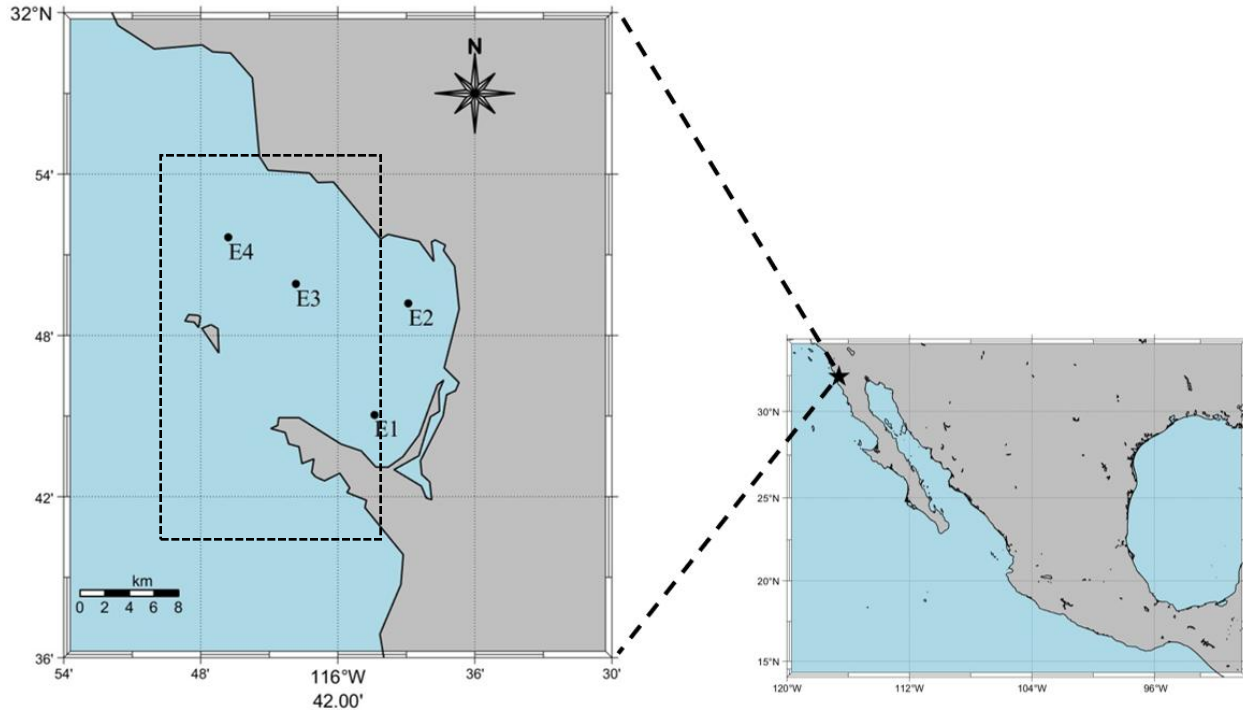


Figura 1. Mapa del área de estudio con las cuatro estaciones en las que se realizaron los muestreos. El recuadro punteado indica el cuadrante del que se obtuvieron los datos satelitales.

5.2 Muestreo en campo

En el marco del proyecto NANO-DOAP, se realizaron 21 muestreos entre febrero de 2021 y abril de 2024, durante los cuales se colectaron muestras de agua a 0 y 20 m de profundidad en cuatro estaciones (**Figura 1**), de las cuales las estaciones E4 y E2 se definieron como estaciones fijas de monitoreo. Las muestras de agua se colectaron mediante una botella Niskin de 5 L. De la botella se extrajeron 125 mL de agua y se almacenaron en botellas de borosilicato. Las muestras discretas fueron fijadas con 50 μ L de cloruro de mercurio para evitar los cambios por procesos biológicos con base en los procedimientos estándares recomendados por [Dickson *et al.*, \(2007\)](#) para el análisis de las variables del sistema del CO₂. Posteriormente estas muestras se mantuvieron selladas hasta su análisis en laboratorio. Aunado a lo anterior, en cada estación se realizaron perfiles verticales de temperatura, salinidad y profundidad, utilizando un Conductivity-Temperature-Depth (CTD) CastAway hasta una profundidad de aproximadamente 40 metros, dependiendo de la batimetría de la estación.

Por otra parte, se realizaron mediciones de pCO_2 en el agua con los cultivos de semilla de ostión en la empresa de acuicultura Maxmar, ubicada en las costas de la BTS, en Ensenada. Los

muestreos se realizaron durante el periodo de enero del 2024 hasta mayo del mismo año. Las mediciones de pCO_2 en los cultivos de semilla de ostión se realizaron utilizando un sistema de medición de bajo costo desarrollado por el Dr. Burke Hales en colaboración con The Ocean Foundation, denominado “ pCO_2 to Go”, el cual posee una precisión de $\pm 20 \mu atm$. Este instrumento fue diseñado con el objetivo de medir el CO_2 disuelto en el agua de los tanques de cultivo, lo que permite conocer la química del carbono en el agua de los cultivos de organismos calcificadores. De igual manera, además de las mediciones de pCO_2 , también se realizaron también se registraron temperatura y salinidad en los sistemas de cultivo. Las mediciones se realizaron en cuatro sitios dentro de la empresa: 1) en los cultivos de larvas, 2) en los cultivos de semilla de ostión, 3) en los sistemas de recirculación de agua para las semillas y 4) en el tanque con agua de mar recién bombeada con un primer filtro para sólidos (Figura 2).



Figura 2. Ubicaciones dentro de la empresa Maxmar donde se realizaron las mediciones de pCO_2 . a) Primer filtro (remoción de sólidos) para el agua de mar después de ser bombeada, b) Cultivos de semilla de ostión, c) Cultivos de larva de ostión, d) Sistemas de recirculación de agua para las semillas de ostión.

5.3 Análisis en laboratorio

5.3.1 Determinación de Alcalinidad Total (AT)

Las mediciones de AT fueron realizadas con el método potenciométrico descrito por [Hernández-Ayón *et al.* \(1999\)](#). Para las mediciones se utilizó material de referencia de laboratorio del Dr. Andrew Dickson de Scripps Institution of Oceanography y la exactitud alcanzada con respecto al material de referencia fue de $\pm 2 \mu\text{mol/kg}$. Las titulaciones fueron realizadas en una celda abierta utilizando aproximadamente 60 g de muestra previamente pesada. El sistema de titulación es automático (Model P-TA, PONTUS, México; <http://www.pontusbaja.com>) y consiste en un electrodo y una jeringa programable Metrohm, controlado a través de un programa en Visual Basic. En la primera etapa de la titulación, durante la protonación de carbonatos a bicarbonatos, se realizan una primera adición de 1 mL de HCl 0.1 N mezclado con KCl 0.7 M, seguido de adiciones progresivas de 40 μl . Posteriormente, se realizan adiciones de 15 μl donde el bicarbonato remanente es convertido a ácido carbónico. El cálculo de la AT el programa lo determina utilizando el método de la derivada.

5.3.2 Determinación de pH

El pH se determinó mediante un método espectrofotométrico, utilizando la técnica descrita por [Clayton y Byrne \(1993\)](#) y el software OceanView. Para la determinación, se utilizó el indicador meta-cresol púrpura (mCP) con una concentración de 10 mM siguiendo las recomendaciones del manual de buenas prácticas SOP 6b ([Dickson *et al.* 2007](#)). Las mediciones de absorbancia fueron realizadas utilizando un espectrofotómetro USB 4000, acoplado a una lámpara de tungsteno Ocean View. La temperatura de las muestras estuvo controlada a 25°C. Como parte del control de calidad, se utilizó un estándar certificado de pH Tris, generado por el laboratorio del Dr. Andrew Dickson de Scripps Institution of Oceanography. La precisión obtenida fue de ± 0.007 unidades de pH, con una exactitud de ± 0.02 y un error de medición de 0.25%.

5.3.3 Determinación de CID

El carbono inorgánico disuelto se midió utilizando la técnica de [Johnson *et al.* \(1987\)](#), el cual es un método coulométrico. El sistema funciona a base de un coulómetro de la marca UIC, en el cual se convierten el carbonato y bicarbonato en CO₂ gas utilizando ácido fosfórico al 8.5%. El CO₂ gas es transportado con nitrógeno hasta una celda que contiene una solución catódica con etanolamida donde el gas forma un ácido carbámico. Posteriormente se genera una corriente que

libera OH^- de un electrodo de platino el cual realiza la liberación hasta neutralizar la solución. Durante este proceso se va registrando un número de conteos equivalentes a la concentración del CO_2 , los cuales son utilizados para determinar el valor final de CID de la muestra de agua. Durante los análisis se trabajó con una precisión y exactitud de $\pm 3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ determinado con material certificado.

5.4 Procesamiento de datos

Se utilizaron los programas de Ocean Data View y MatLab para la generación de gráficas, mapas y esquemas para la presentación de los resultados. Con los datos obtenidos de los parámetros del CO_2 en la BTS, se realizó un análisis para encontrar una relación entre los cambios en los cultivos de semilla de ostión y los cambios en la química de la BTS. Con este análisis se planteó dar un diagnóstico sobre las condiciones de la disponibilidad de carbonatos disponibles en los tanques de cultivos mediante el cálculo del Ω_{arag} , y determinar si las condiciones son favorables o no para el desarrollo de los organismos cultivados.

Se realizaron también diagramas T-S (Temperatura-Salinidad) con las series de datos recopiladas en las cuatro estaciones para analizar las condiciones oceanográficas ante la variabilidad de las masas de agua a lo largo del periodo de estudio. Además, se realizaron series de tiempo de pH, AT y Ω_{arag} , con el fin de evaluar la variabilidad durante el mismo periodo de estudio. Finalmente, para presentar de una manera más visual la variación del ENSO y sus efectos en las mediciones termohalinas y de las variables del carbono medido, se realizó un análisis de anomalías del índice MEI y se evaluó su correlación.

5.4.1 Determinación de Ω_{arag}

Con los datos obtenidos de $p\text{CO}_2$ en los cultivos de Maxmar se calculó el omega aragonita mediante el programa CO2sys (Lewis y Wallace, 1998). Para esto, se utilizaron los datos de $p\text{CO}_2$, temperatura, presión y salinidad medidos en los cultivos de semilla de ostión, así como el valor promedio de AT registrado durante los 21 muestreos. En el caso de las muestras de la BTS, se siguió el mismo procedimiento, pero con la diferencia de que se utilizó la pareja pH-AT, y específicamente para la AT, se utilizó el valor correspondiente a cada muestreo, en lugar del valor promedio. Para el cálculo de Ω_{arag} en ambos casos, se utilizó la escala de pH Seawater y las constantes de disociación de carbonatos de Lueker *et al.* (2000) dentro del programa CO2sys.

5.4.2 Mapas de distribución espacial de temperatura y salinidad superficial

Se obtuvieron datos diarios satelitales superficiales de temperatura potencial del mar y de salinidad en la BTS y frente a la costa oeste de Ensenada, obtenidos de la plataforma de Copernicus Marine Service (<https://data.marine.copernicus.eu>), con una resolución espacial de 0.083° (Fig. 1). Los datos abarcaron el periodo de febrero del 2021 a diciembre del 2023. Se utilizó el programa MatLab para dividir los datos por año y, dentro de cada año, por estación (invierno, primavera, verano y otoño). Se realizaron mapas de distribución espacial de los promedios de ambas variables para cada estación y para cada año en la BTS y en la costa oeste frente a Ensenada. Se utilizó la misma escala para todos los mapas (cada variable con su propia escala) con el fin de obtener una mejor comparación interanual.

6 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con este trabajo, los cuales se dividen en dos principales secciones. En la primera sección se presentan los resultados referentes al análisis de variabilidad del sistema del CO₂ durante el periodo de estudio. En la segunda sección, se presentan los resultados sobre la estimación del Ω rag aplicada a los cultivos de semilla de ostión de la empresa Maxmar.

6.1 Variabilidad del sistema del CO₂ y variables oceanográficas en la BTS.

6.1.1 Condiciones oceanográficas interanuales en la BTS (ENSO)

Es importante considerar las anomalías del índice del ENSO para obtener una visión más completa y precisa de la variabilidad de las condiciones oceanográficas en las que se realizaron los muestreos. Durante la mayor parte del periodo de estudio (2021-2024) las anomalías fueron negativas (Figura 3), lo que indica la presencia de La Niña. Este fenómeno alcanzó su punto de mayor intensidad a mediados del 2022, convirtiéndose en el evento de La Niña más fuerte de los últimos 10 años. A finales del 2023, comenzó el retorno a condiciones normales (-0.5 °C a 0.5 °C), pero rápidamente se tornó en el inicio de un evento de El Niño, alcanzado una anomalía mayor a 1 a inicios del 2024. De los 21 muestreos realizados, los primeros 16 se llevaron a cabo bajo la condición de La Niña, mientras que los últimos 5 se realizaron bajo condiciones El Niño.

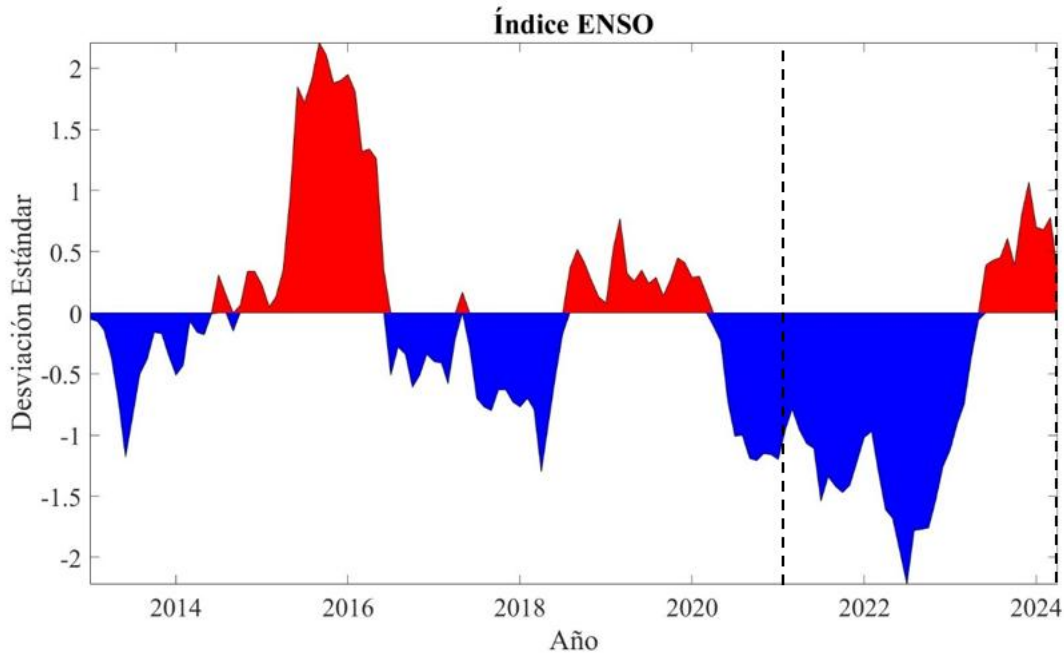


Figura 3. Serie de tiempo de anomalías del Índice Multivariado ENSO (MEI) para el periodo entre enero de 2013 y mayo de 2024. Los valores de este índice fueron obtenidos de <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/>. Entre las líneas punteadas se marca el periodo de muestreo en la BTS.

6.1.2 Análisis de masas de agua

Se realizó un diagrama T-S (Temperatura-Salinidad) usando los datos obtenidos con el CTD, esto con el fin de analizar la variabilidad de las masas de agua incluidas en los primeros 40 m. En la **Figura 4** se presenta este diagrama, en el cual se observó una marcada variabilidad anual aun cuando la mayoría de los datos se encontraron dentro de los límites de ASA. Por ejemplo, en los muestreos del 2021, la salinidad fue más alta, acercándose a los límites de 33.8 unidades, y en algunos casos siendo mayores, sobre todo en las muestras más profundas, lo que sugiere cierta influencia del Agua Subsuperficial Ecuatorial. El caso opuesto se presentó en las condiciones oceanográficas del 2023 y 2024, los datos en general muestran que la salinidad fue menor desde el fondo hasta la superficie. Por tanto, las condiciones termohalinas antes del 2022 fueron más cálidas y salinas, mientras que después fueron más frías y menos salinas. El 2022 aparenta ser el punto intermedio entre estos dos eventos, coincidiendo este año con el pico mínimo de las condiciones de la Niña.

Durante el 2023 se puede apreciar la disminución de los valores de salinidad, alcanzando valores alrededor de los 33, lo que se mantuvo en gran parte de las mediciones del 2024, lo que

indica una mayor presencia del ASA dentro de la BTS. Por otro lado, los valores más altos de salinidad, alrededor de 34, que se presentaron durante el 2021, nos hablan de una ligera influencia de AESs.

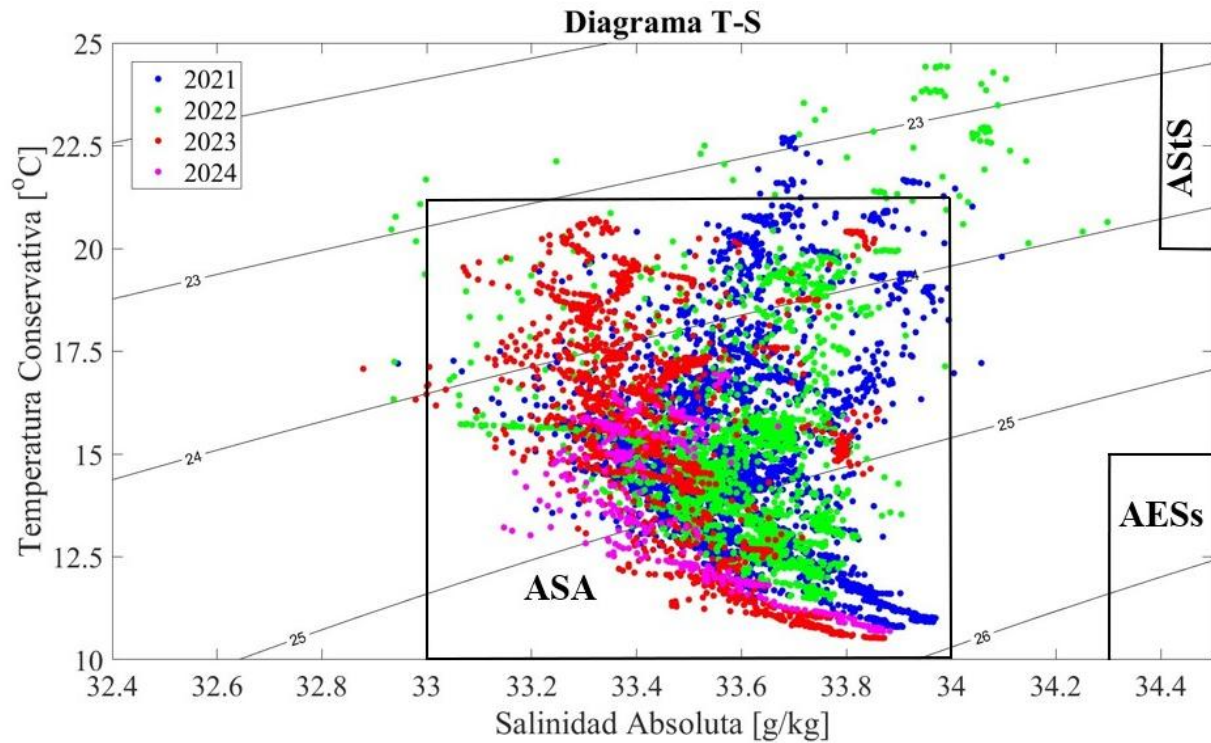


Figura 4. Diagrama T-S 2021-2024 de la BTS. ASA: Agua Subártica, AESs: Agua Ecuatorial Subsuperficial, ASStS: Agua Subtropical Superficial. Los intervalos de las masas de agua se definieron con base a Durazo y Baumgartner (2002). Los años se encuentran divididos por colores: 2021 (azul), 2022 (verde), 2023 (rojo) y 2024 (rosa).

Lo anterior se visualiza de mejor manera en la Figura 5, en donde se presenta una serie de tiempo con los datos de salinidad recopilados con el CTD en las cuatro estaciones a lo largo del periodo de estudio. A partir de la segunda mitad del 2023 se comenzaron a registrar los valores más bajos de salinidad (~33). Los más altos se registraron en la primera mitad del 2021, con valores de alrededor de 33.8. Verticalmente se puede apreciar que no hay una gran variabilidad en los valores de salinidad, sin embargo, suelen ser ligeramente más altos en la superficie, probablemente debido a las temperaturas más altas registradas aquí.

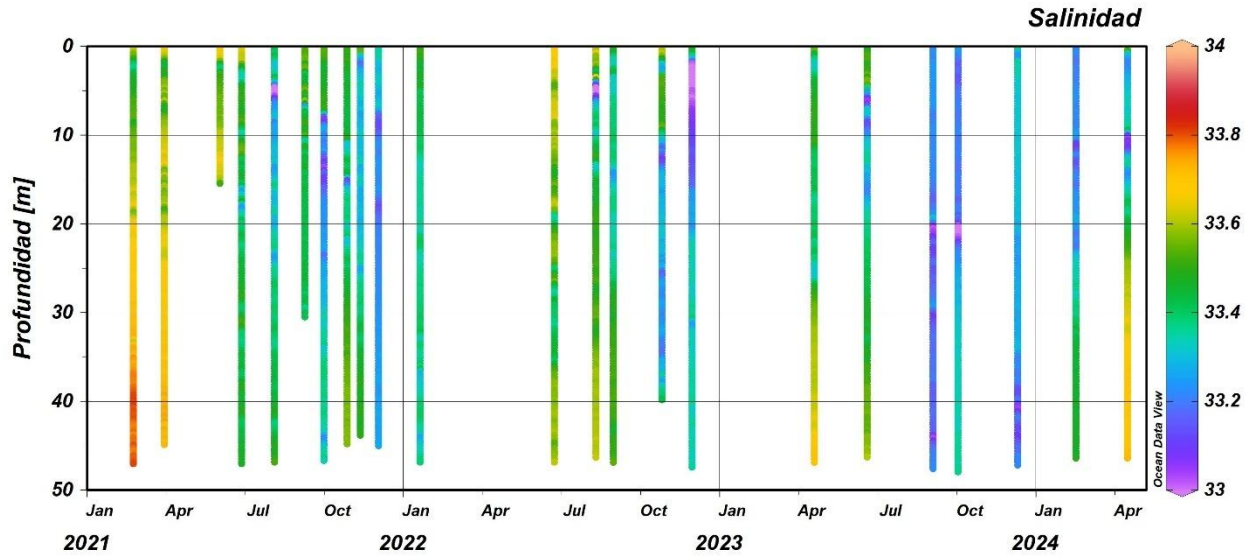


Figura 5. Serie de tiempo de salinidad determinada por el CTD durante los muestreos en la BTS febrero 2021 – abril 2024.

6.1.3 Variables oceanográficas en la BTS

6.1.3.1 Temperatura

El año 2023 se caracterizó por ser el más frío de los tres (2021-2023), con un intervalo de temperatura entre 14.5 y 19.5 °C, mientras que el 2022 fue en general el más cálido, alcanzando temperaturas de alrededor de 20.5 °C. A lo largo de los tres años, se encontró un patrón recurrente en cuanto a las variaciones estacionales: el invierno fue la temporada más fría, con temperaturas entre los 14.5 y 16 °C, mientras que el verano fue la temporada más cálida con valores de entre 19 y 20.5 °C. Se pudo distinguir la llegada de El Niño durante el otoño 2023 debido a la presencia de aguas con temperaturas más cálidas (~19 °C), en comparación con otoños anteriores (~18 °C), ingresando a la bahía principalmente por la boca sur (Figs. 6-11).

En la Figura 6 se presenta la variabilidad espacial promedio de la temperatura potencial superficial del mar dentro de la BTS durante cada estación del año en el 2021, mientras que la Figura 7 presenta esta variabilidad frente a la costa oeste de Ensenada. Dentro de la bahía, el intervalo de temperatura fue de entre 14.5 – 20.5 °C. Las temperaturas más bajas se registraron en invierno, con valores por debajo los 15 °C, mientras que las más altas fueron durante el verano, con valores entre 19 y 20 °C. Durante la primavera, la temperatura comenzó a aumentar respecto al invierno, alcanzando temperaturas de alrededor de 17 °C. En otoño, las temperaturas descendieron a comparación del verano, con valores de 18 °C aproximadamente. En ambas escalas

(Figs. 6 y 7) se puede apreciar que los valores de temperatura fuera de la BTS fueron consistentes con lo que se registró dentro de la bahía.

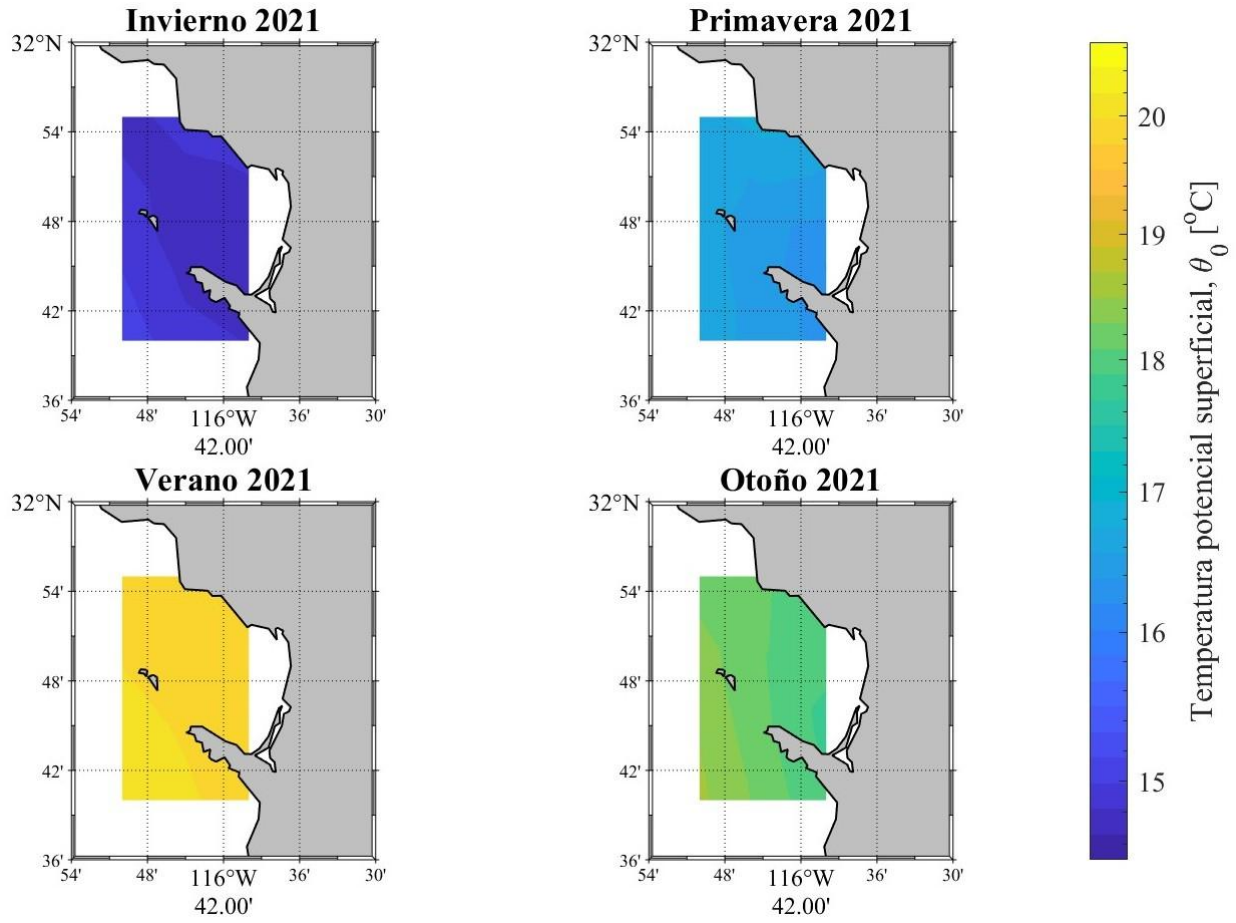


Figura 6. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional en la BTS durante el 2021. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

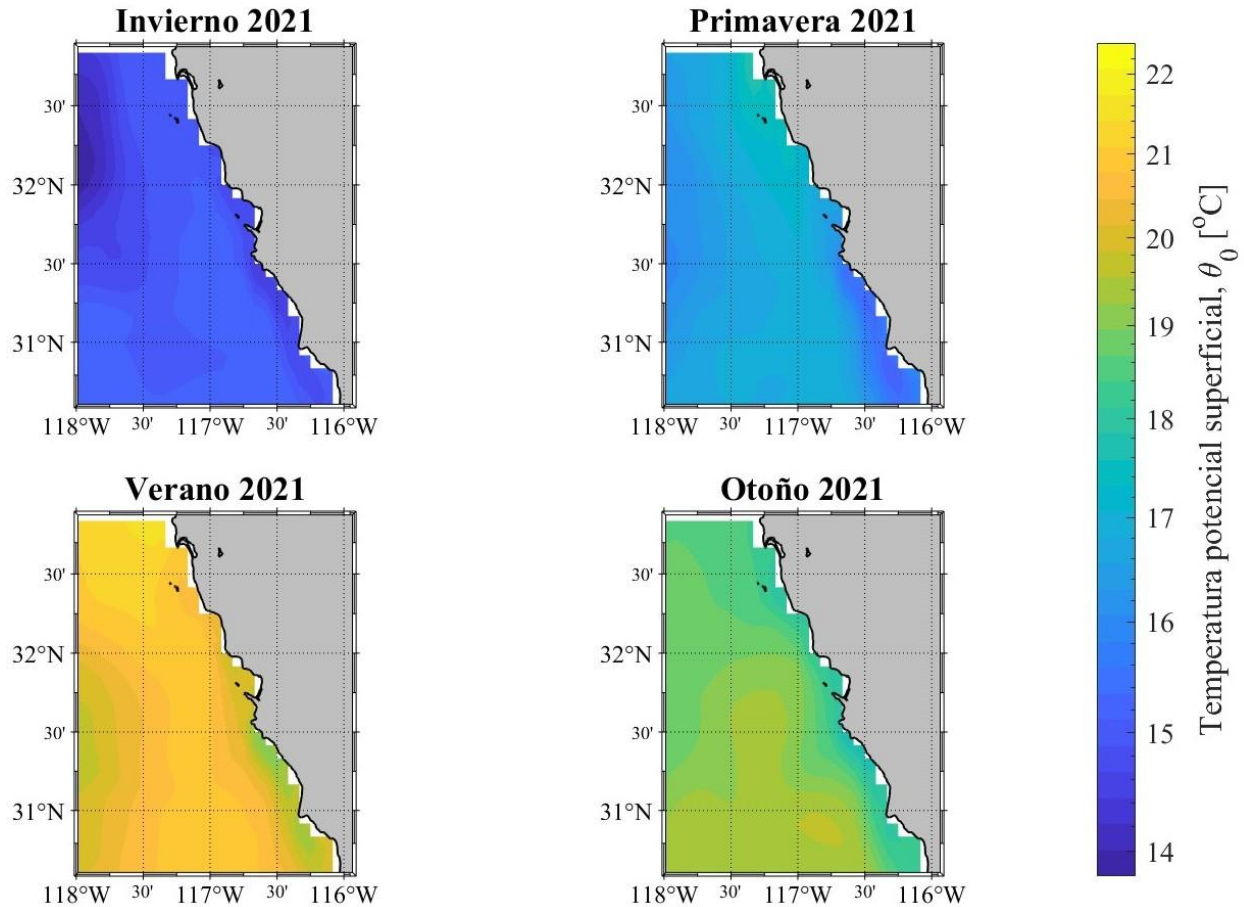


Figura 7. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2021. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

Durante el 2022 (Figs. 8 y 9) las temperaturas más frías se presentaron durante el invierno, con un intervalo entre 15.5 y 16 °C dentro de la BTS. En primavera las temperaturas fueron aproximadamente de 1 °C mayor que en invierno, con valores de 16.5 – 17 °C. En verano se observaron las temperaturas más altas del año (20 – 20.5 °C), mientras que en otoño descendieron hasta valores de aproximadamente 18 °C. Al igual que en el 2022 los valores dentro y fuera de la BTS son similares, además de presentar la misma estacionalidad.

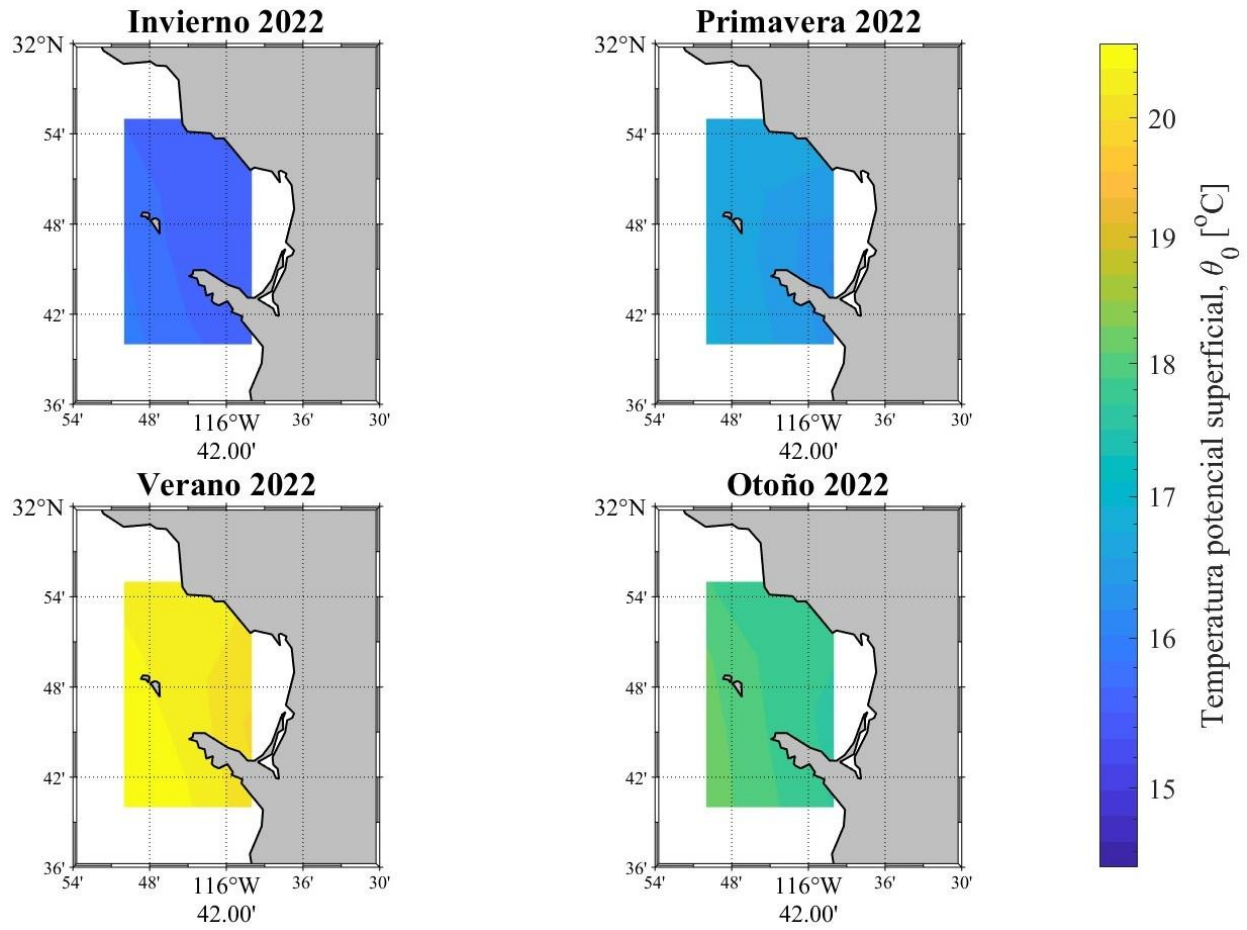


Figura 8. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional en la BTS durante el 2022. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

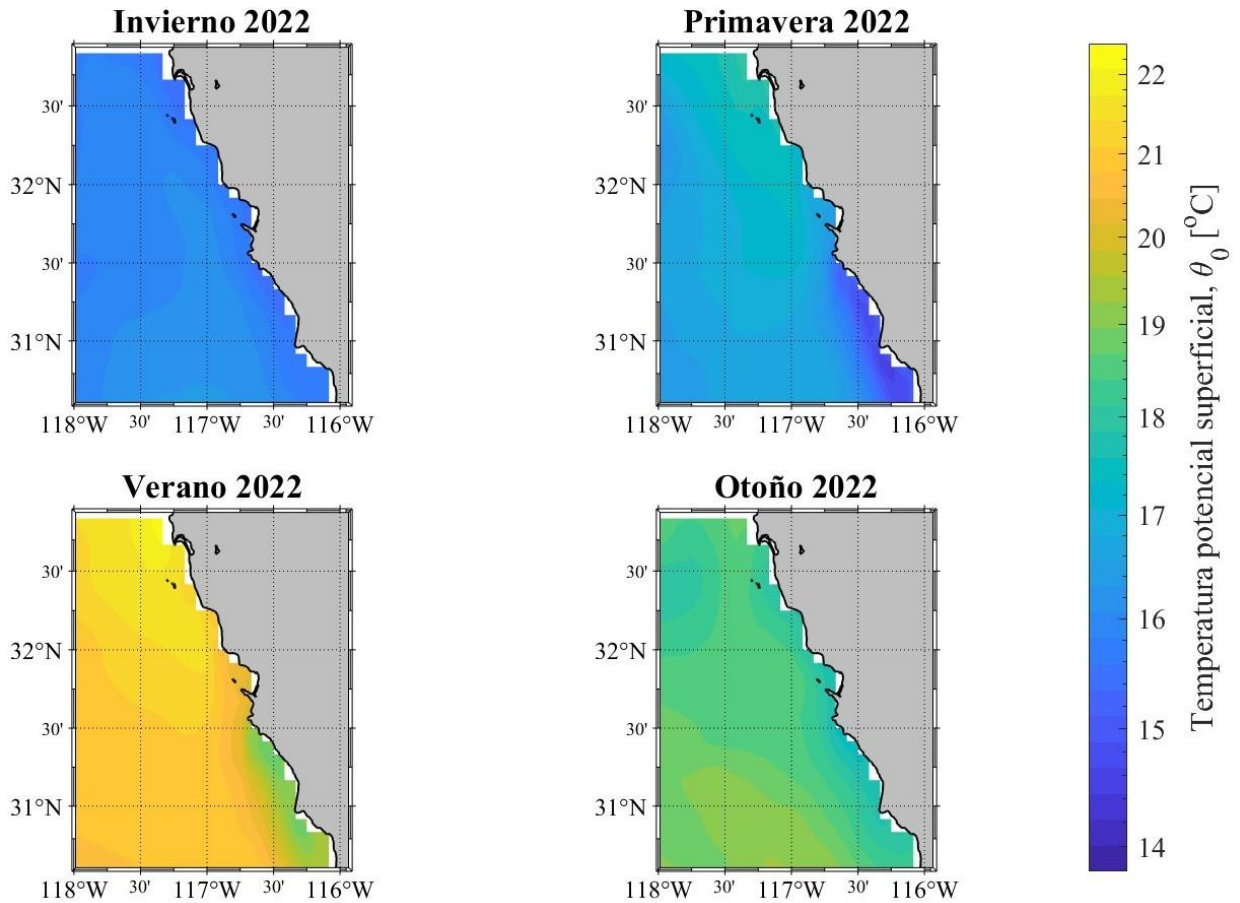


Figura 9. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2022. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

Durante el invierno del 2023 (**Figura 10**), las temperaturas se mantuvieron alrededor de 14.5 °C, siendo las más bajas del año dentro de la BTS. En primavera la temperatura ascendió, con registros de aproximadamente 16 °C, mientras que en verano nuevamente fue cuando se presentaron las temperaturas más altas (19 – 19.5 °C). En otoño la temperatura promedio descendió casi 1 °C, con valores de entre 18 – 19 °C. Al igual que en los años anteriores, las condiciones del océano adyacente (**Figura 11**) fueron las que determinaron las condiciones de temperatura dentro de la BTS.

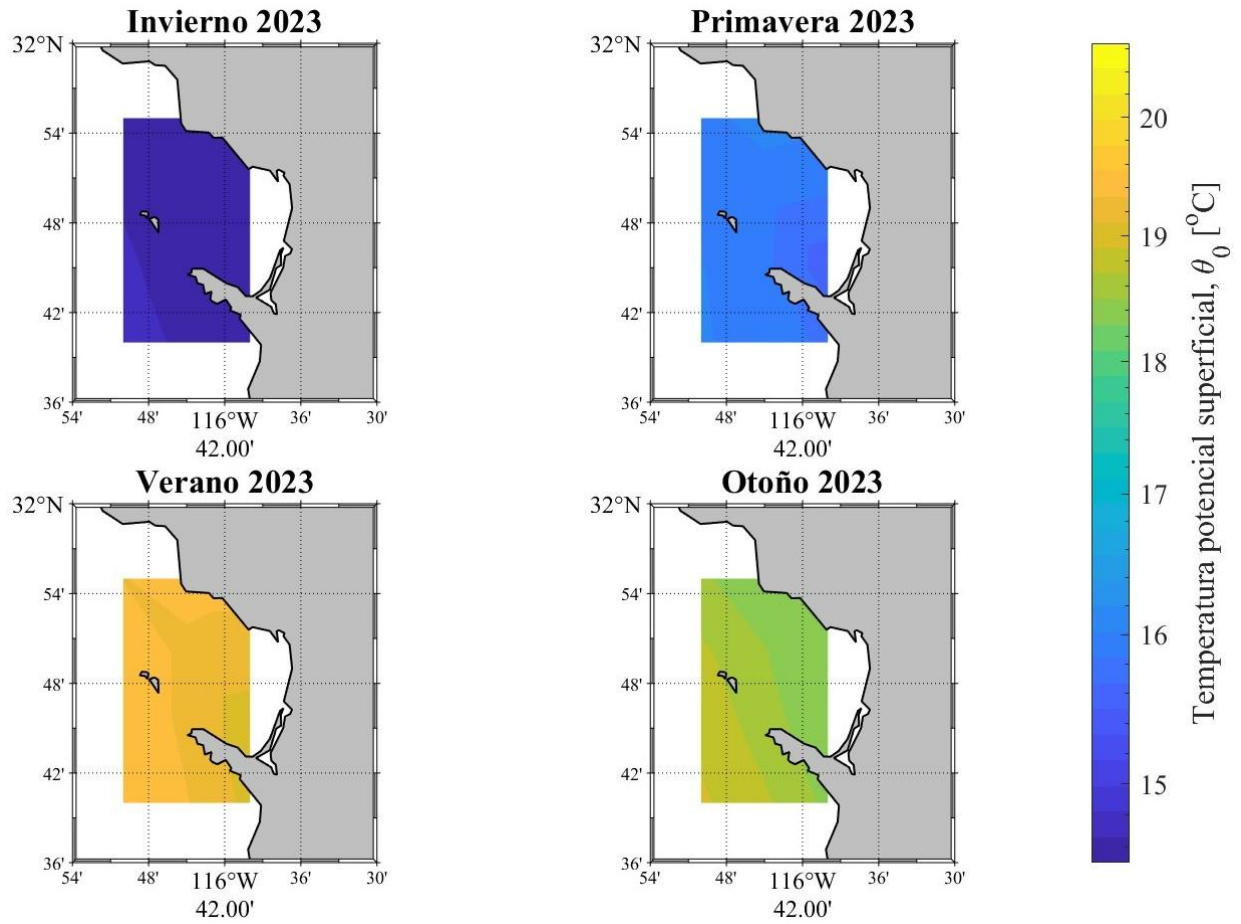


Figura 10. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional en la BTS durante el 2023. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

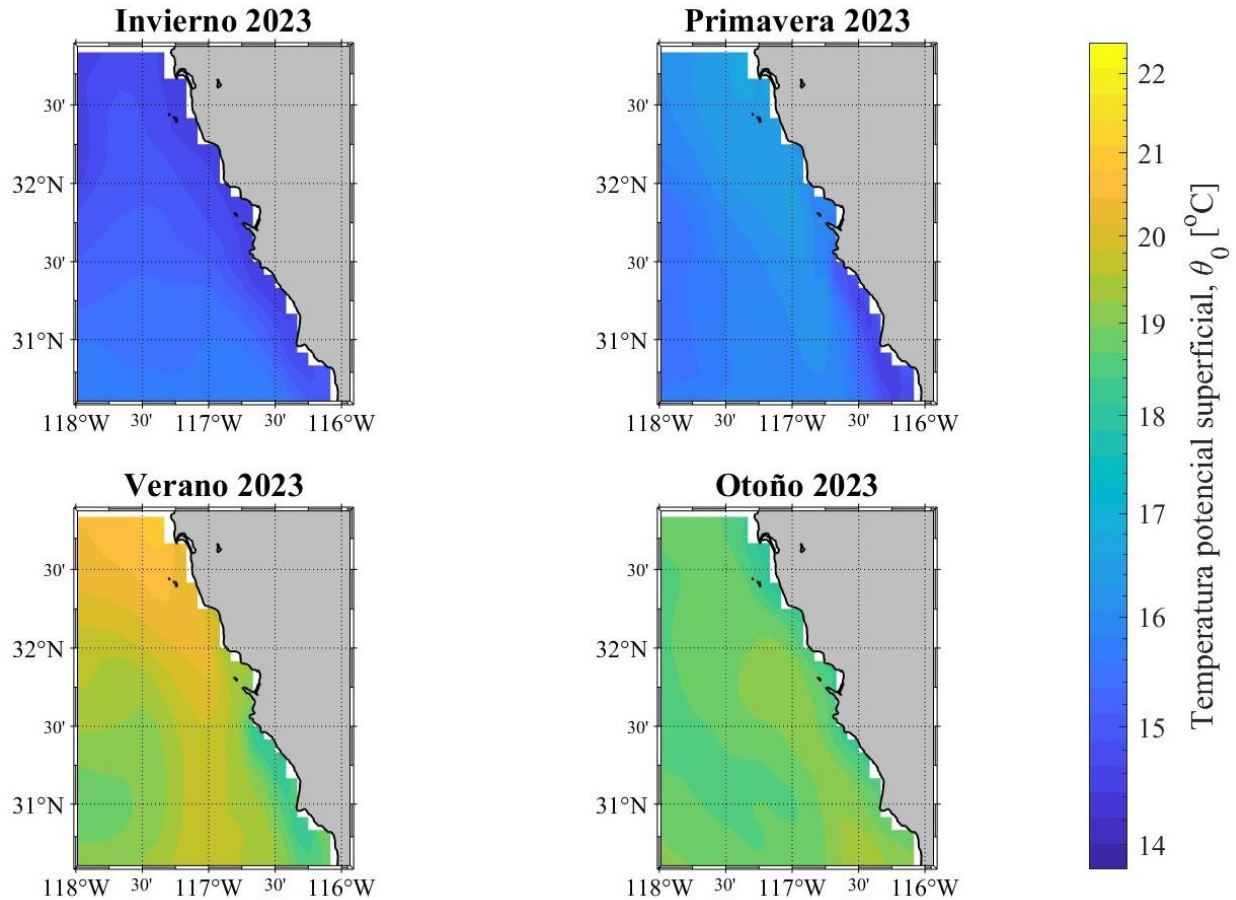


Figura 11. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2023. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

6.1.3.2 Salinidad

Al igual que la temperatura, la salinidad superficial derivada de información satelital, también presentó cambios interanuales. A pesar de que el rango de valores de salinidad satelital a lo largo de los tres años fue de ~ 0.4 unidades, se observó que el año 2023 registró, indiscutiblemente, las menores concentraciones de salinidad. Además, en otoño de 2023, se evidenció la intrusión de aguas más cálidas y salinas por la entrada sur de la BTS, lo que coincide con el inicio de El Niño y que también se reflejó en la temperatura. Por otro lado, en coincidencia con la temperatura, el 2022 fue el año en el que se registraron los valores más altos de salinidad, especialmente durante el invierno (~ 33.47).

La salinidad en el 2021 (Figura 12) mostró una variabilidad reducida, con valores que fluctuaron entre 33.21 y 33.46 dentro de la BTS. A pesar de esta pequeña fluctuación los valores

más altos de salinidad se registraron en otoño. Durante el resto de las estaciones del año (invierno, primavera y verano), la salinidad fue prácticamente la misma ($\sim 33.3 \pm 0.03$). Durante invierno, primavera y verano, la distribución de la salinidad fue similar, con valores más bajos en la entrada norte de la BTS y más altos hacia el interior y boca sur de la BTS. En contraste, en la época de otoño, las mayores concentraciones de salinidad se detectaron en la entrada sur de la BTS, mientras que en el interior y hacia el norte de la bahía los valores fueron disminuyendo. En la [Figura 13](#) se puede apreciar que el océano adyacente en general tuvo salinidades >33.3 . Sin embargo, al norte de la BTS se distingue la presencia de una masa de agua con menor salinidad (alrededor de los 33 o incluso inferior en algunos casos como el verano), la cual alcanza a incursionar ligeramente dentro de la BTS. Esto nos habla de una probable mezcla de masas de agua, una masa de agua de transición, lo que explicaría la variabilidad en los valores de la salinidad encontrados dentro de la bahía.

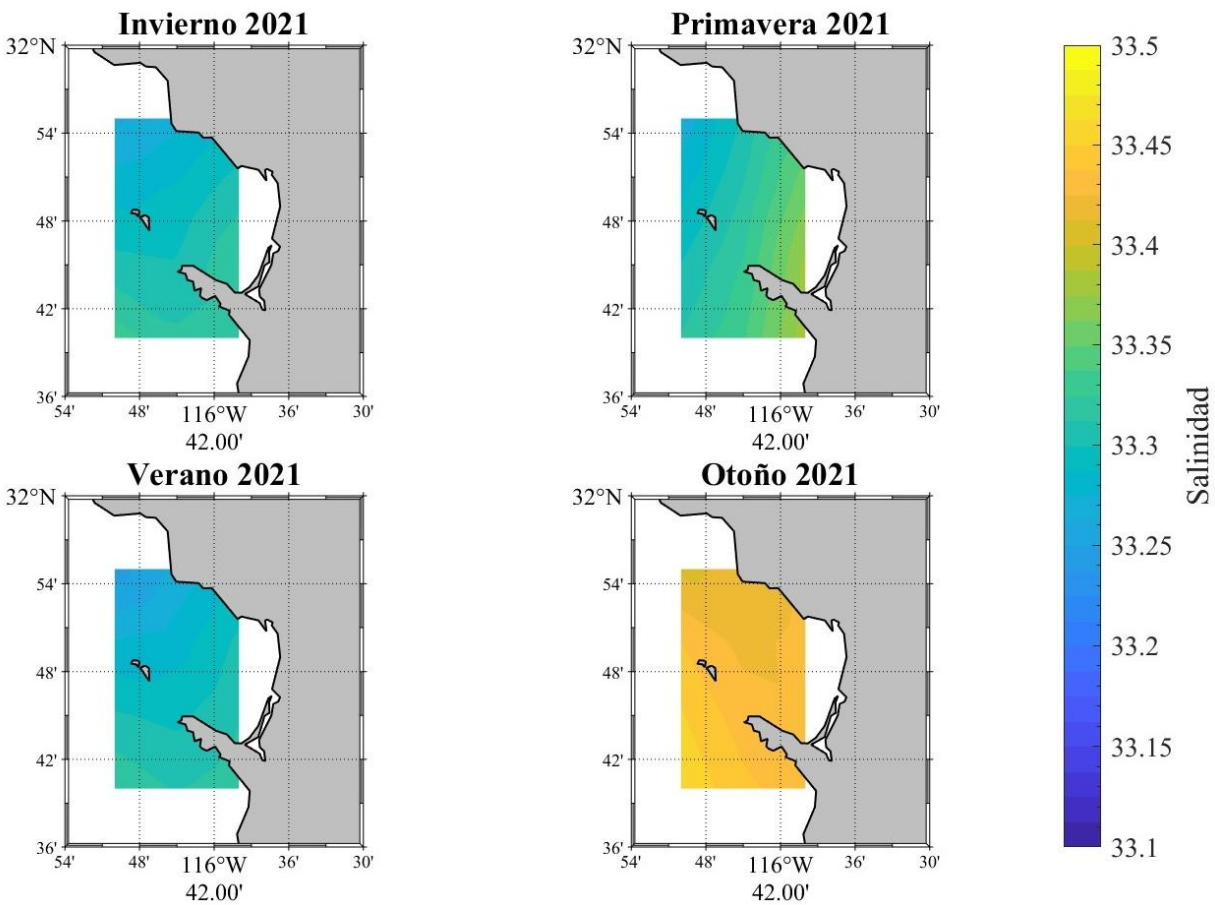


Figura 12. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional en la BTS durante el 2021. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

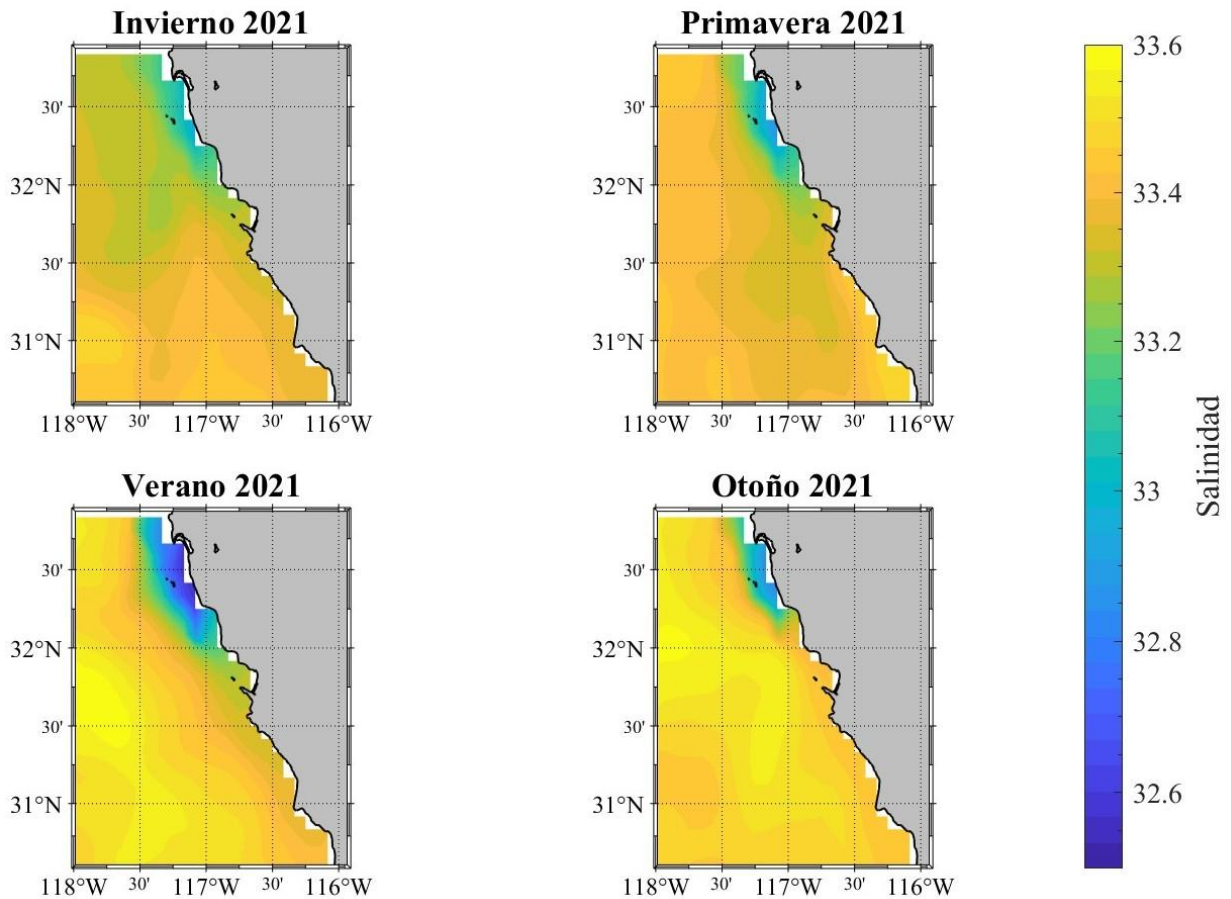


Figura 13. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada durante el 2021. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

Durante el 2022 (Figura 14), a diferencia del 2021, la salinidad más alta se encontró en la temporada de invierno, mientras que los valores más bajos fueron medidos durante el verano. Adicionalmente, en este año el intervalo de salinidad se mantuvo entre valores 33.13 a 33.48. Este patrón contrastó con el de la temperatura, ya que en invierno se tuvieron las temperaturas más bajas y en el verano las más altas. Durante primavera y otoño, la salinidad se mantuvo aproximadamente en 33.4. La distribución espacial de la salinidad en el 2022 tuvo un patrón parecido al del 2021: en invierno, primavera y verano, las salinidades más bajas se encontraban en la boca norte de la BTS, mientras que las más altas hacia el interior y la parte sur de la BTS. Durante el otoño, al igual que en el 2021, la distribución de salinidad se invirtió, con salinidades más altas en la entrada sur de la bahía y más bajas hacia el interior y el norte de esta.

Al igual que en el 2021, la salinidad en el océano adyacente (Figura 15) fue en general mayor a 33.3 pero con valores más bajos encontrados al norte de la BTS. Esto fue notoriamente más presente durante el verano, lo cual coincide con las bajas salinidades que se dieron dentro de la bahía durante esta estación.

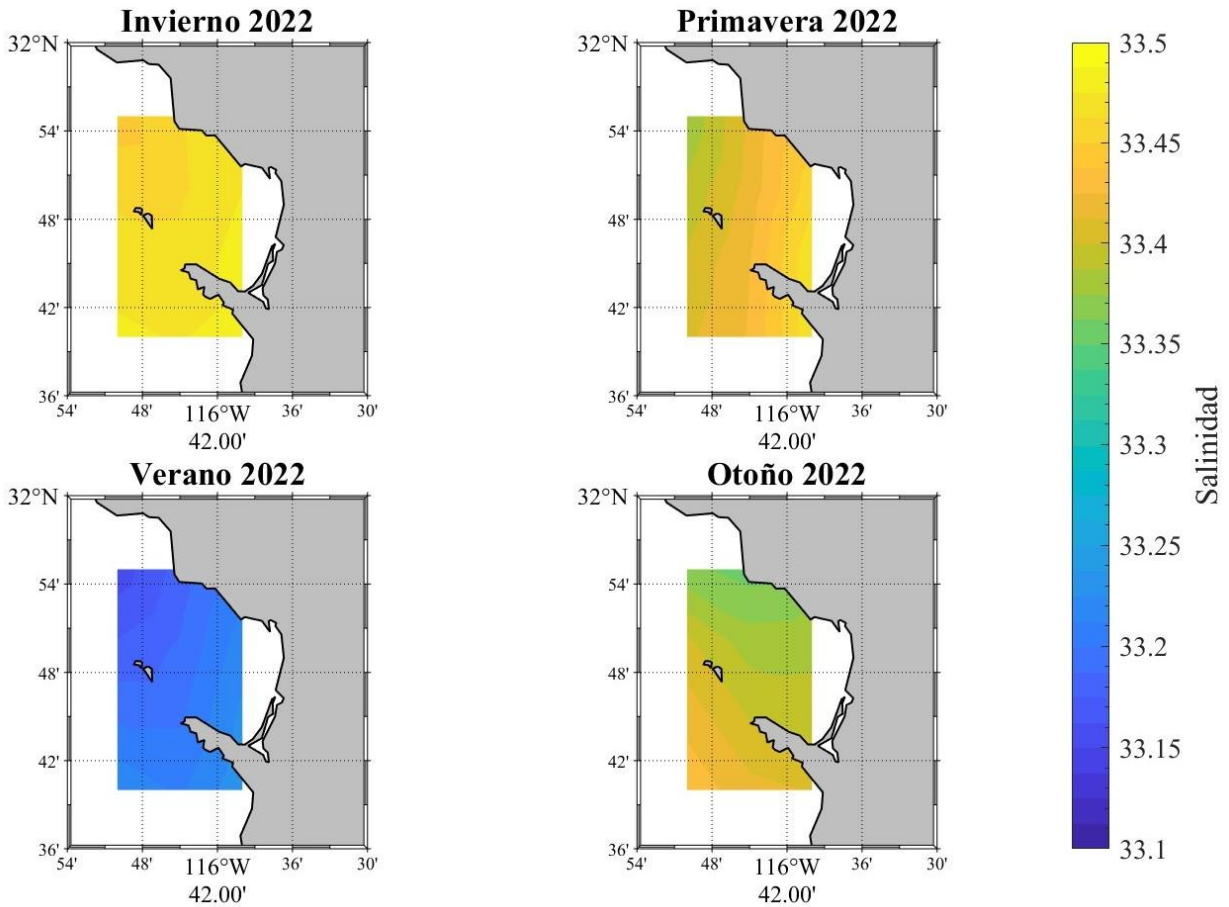


Figura 14. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional en la BTS durante el 2022. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

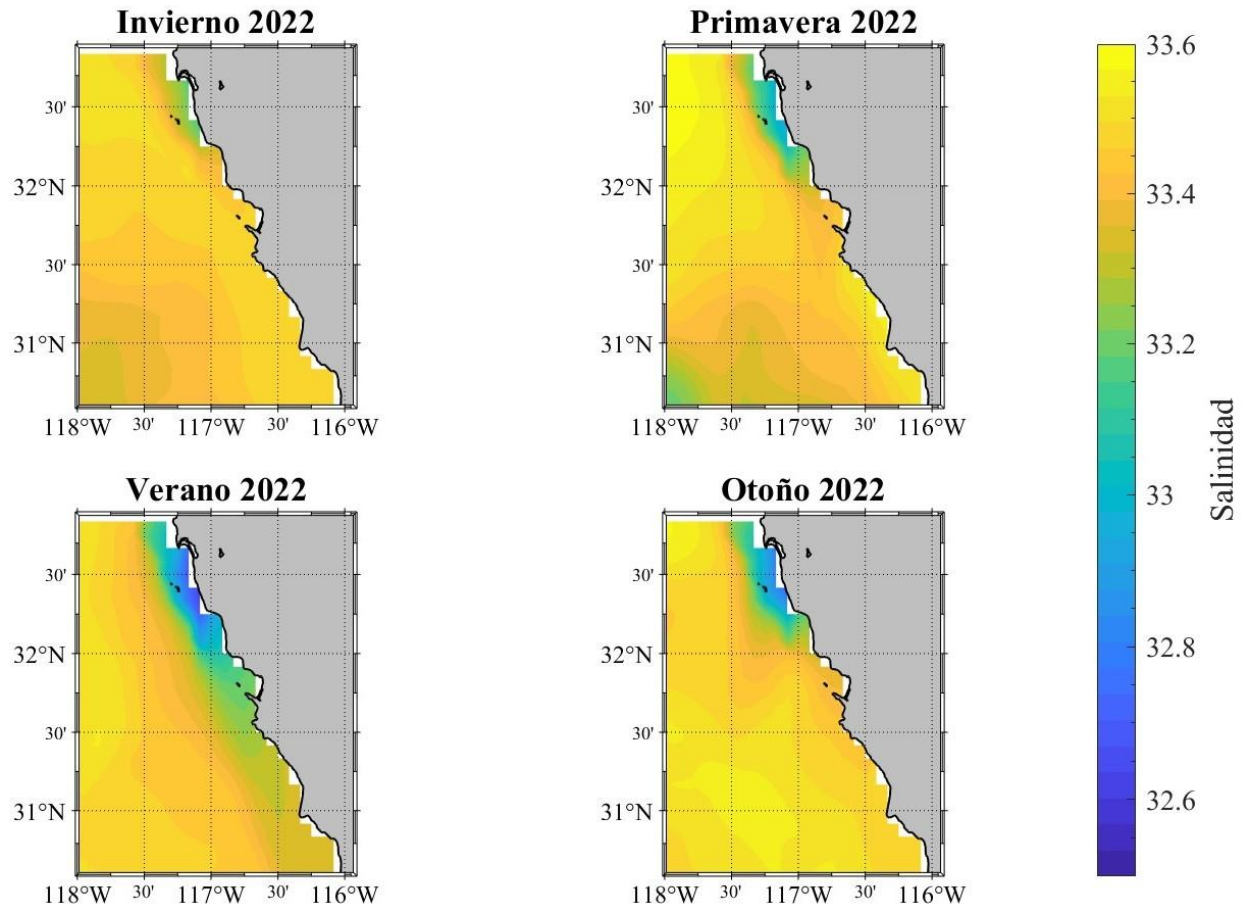


Figura 15. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2022. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

La salinidad en la BTS durante el 2023 (Figura 16) presentó valores entre 33.15 y 33.47. Durante el invierno, primavera y verano los valores de salinidad fueron bajos y similares a lo largo de estas tres estaciones, con valores de alrededor de 33.2. Por otro lado, durante el otoño ocurrió un incremento de salinidad en la bahía, con valores de aproximadamente 33.4. El patrón de distribución en el 2023 presentó una anomalía con respecto a los dos años anteriores. Durante el invierno, los valores más bajos de salinidad se identificaron en la boca norte de la BTS, aumentando gradualmente hacia el interior y el sur. Sin embargo, en primavera, verano y otoño, la distribución siguió el mismo patrón observado en los años previos para estas temporadas.

En la Figura 17 nuevamente se aprecia que las características frente a la costa de Ensenada fueron las que determinaron los valores de salinidad dentro de la bahía. En este año, la masa de

agua de transición ubicada al norte de Ensenada presentó una mayor incursión dentro de la BTS durante invierno, primavera y verano. Durante el otoño se distingue una mayor influencia de aguas con mayores salinidades (~ 33.4) proveniente del sur.

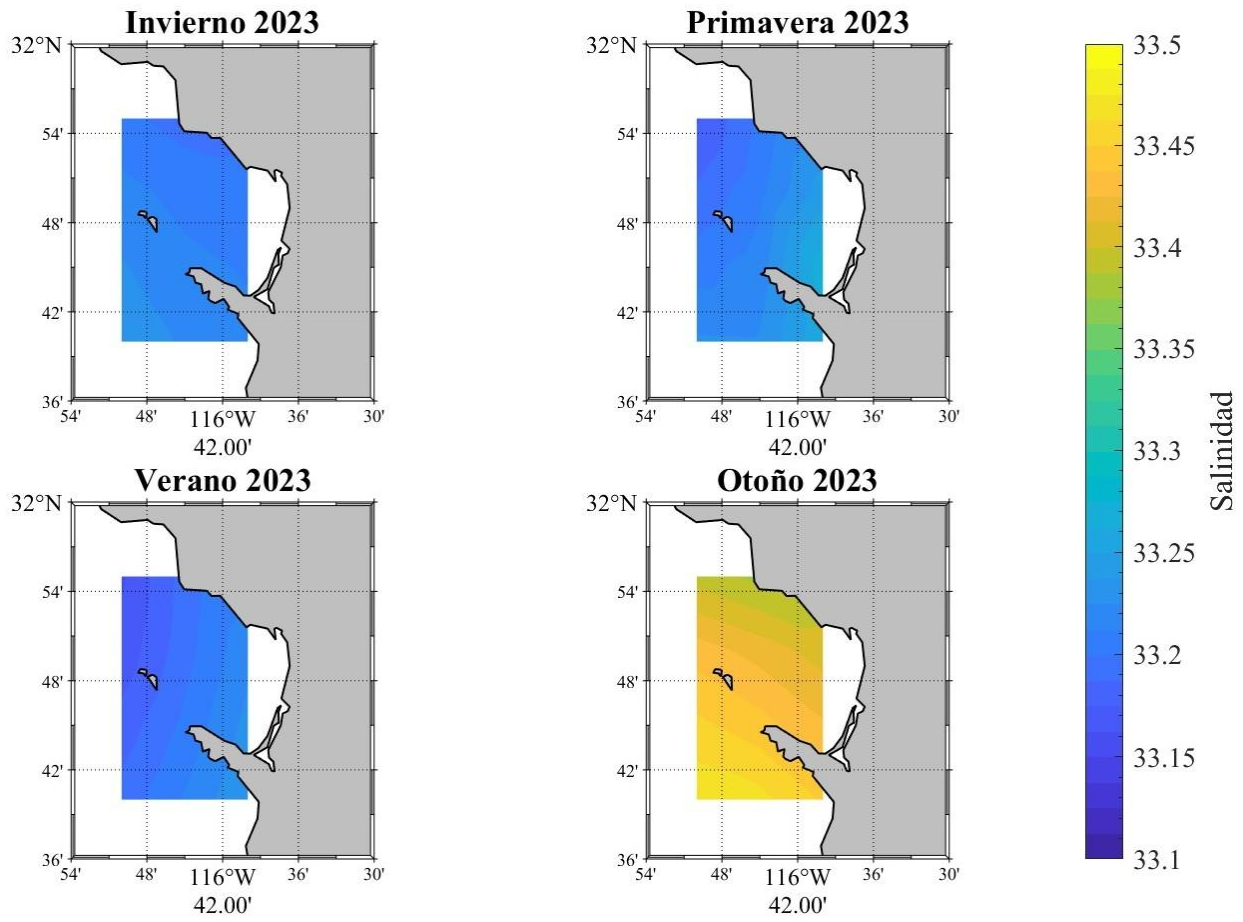


Figura 16. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional en la BTS durante el 2023. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

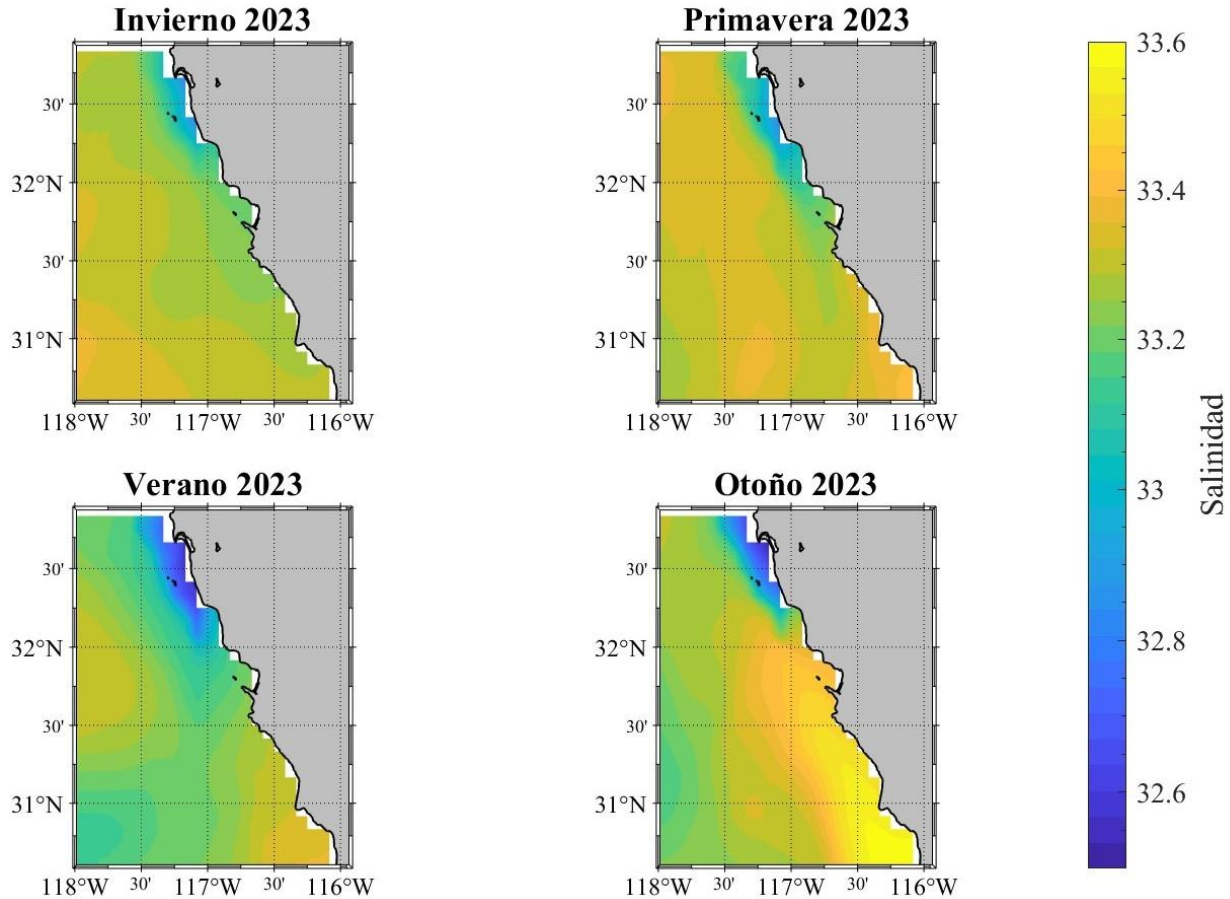


Figura 17. Distribución espacial de la salinidad superficial estacional a lo largo de la costa oeste frente a Ensenada en durante el 2023. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00021>

En resumen, al realizar la comparación interanual, durante los tres años las temperaturas más altas se registraron en la temporada de verano y las más bajas en el invierno. El 2021 y 2022 fueron años más cálidos y salinos, sin embargo, durante el 2022 se registraron las temperaturas y salinidades más altas (~ 20.6 °C y ~ 33.5 , respectivamente). En general el 2023 se caracterizó por ser el año más frío de los tres, así como el que tuvo las salinidades más bajas. A pesar de esto, se puede apreciar que el otoño del 2023, a diferencia de los otros dos años, fue más cálido y salino. Esto no coincide con el resto de las estaciones del año del 2023, las cuales fueron las más frías de los tres años, es probable que esta anomalía esté relacionada con el inicio de El Niño.

6.1.4 Variabilidad de los parámetros del sistema del CO₂ en la BTS.

6.1.4.1 Alcalinidad Total

Los datos medidos de AT (Figura 18) no presentaron una gran variabilidad durante el estudio, con una desviación estándar de $\pm 9.3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ a lo largo de los tres años. Sin embargo, los valores más bajos se registraron a partir del segundo semestre del 2023, con concentraciones de alrededor de $2220 \mu\text{mol kg}^{-1}$, mientras que los valores máximos se observaron en el 2021 con $\sim 2250 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Estos valores coinciden con los valores más bajos de salinidad medidos en el 2023, lo cual es consistente con la relación directa previamente documentada que hay entre estas dos variables (Jiang *et al.*, 2014). El promedio que se obtuvo de los datos de AT durante el estudio fue de $2233 \pm 9.3 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

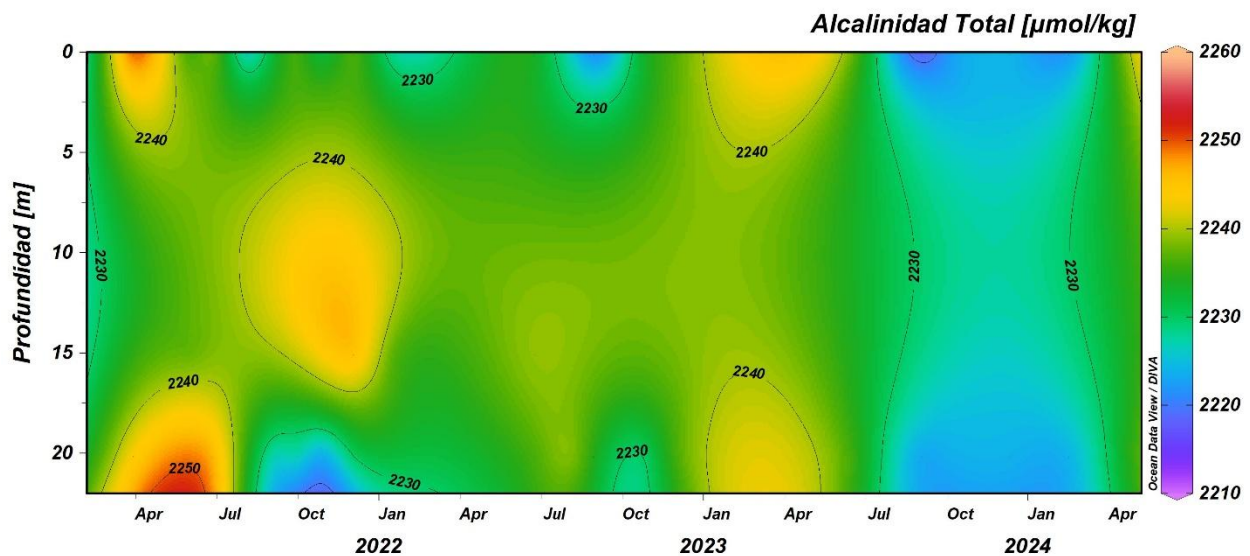


Figura 18. Serie de tiempo de Alcalinidad Total entre febrero 2021 – abril 2024 en la BTS.

6.1.4.2 pH

La variabilidad del pH (Figura 19) presentó un comportamiento distinto a la AT, debido a que no se tuvo un patrón distintivo en ninguno de los años. El intervalo de valores de pH en general fue de entre 7.6-8.1, presentando valores más bajos durante las temporadas de primavera y otoño en la profundidad de 20 metros, a excepción del 2023 donde el pH no tuvo una gran variación a esta profundidad.

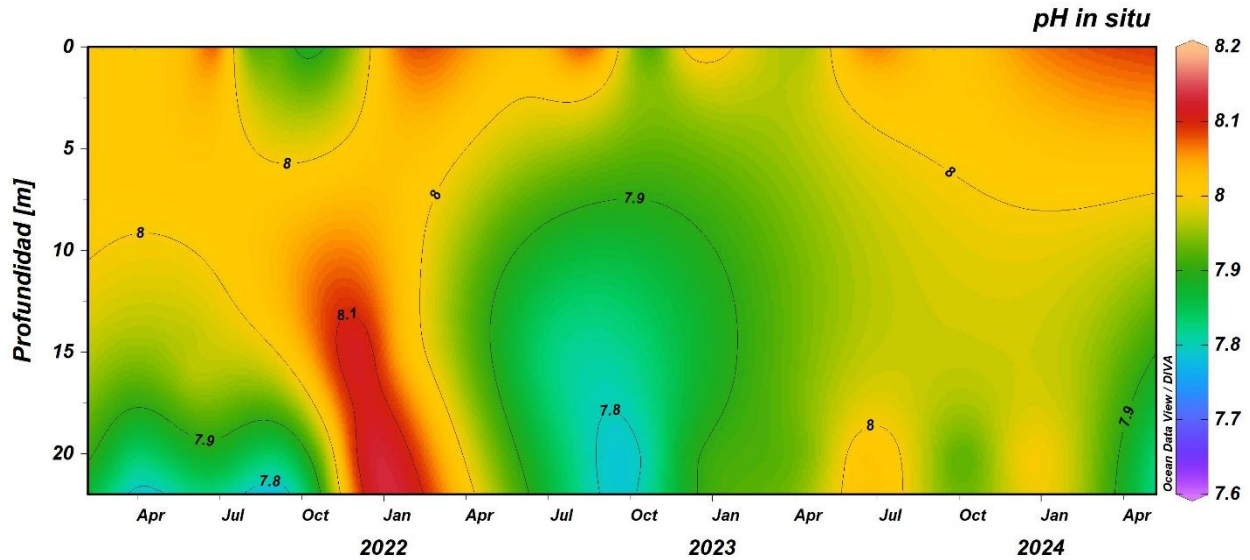


Figura 19. Serie de tiempo de pH entre febrero 2021 – abril 2024 en la BTS.

6.1.4.3 Carbono Inorgánico Disuelto

Para el caso del carbono inorgánico disuelto (CID), únicamente se tienen mediciones a partir de abril del 2023. En la Figura 20 se presenta la variabilidad de este parámetro, el cual presentó un intervalo de ~ 1950 - $2150 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Se puede apreciar que en general los valores fueron más bajos en la superficie, con valores de entre 1950 a $2000 \mu\text{mol kg}^{-1}$. No se identificó un patrón de variabilidad estacional concreto, al igual que con el pH. Sin embargo, durante los meses de marzo y abril del 2024 fue donde se observaron las concentraciones más altas ($>2100 \mu\text{mol kg}^{-1}$), lo que coincide con la época de surgencias en Ensenada (Durazo, 2015), donde una de las principales características es el ascenso de aguas ricas en CO_2 (Linacre *et al.*, 2010), lo que explicaría las altas concentraciones de CID.

A pesar de solamente tener registros de un año de mediciones (abril 2023 – abril 2024), se encontró una buena relación inversa entre el pH y el CID, ya que a menor pH mayores fueron las concentraciones de CID y viceversa. Por ejemplo, durante abril del 2024 los valores de pH fueron menores a 7.9, mientras que los de CID fueron mayores a $2100 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Durante ese mismo mes, pero en superficie (0 m), ocurrió el caso contrario. Los valores de pH fueron altos (>8.1) y los de CID fueron bajos, con concentraciones cercanas a los $2000 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Esta relación se atribuye a que el principal factor que determina el pH es la concentración de CO_2 .

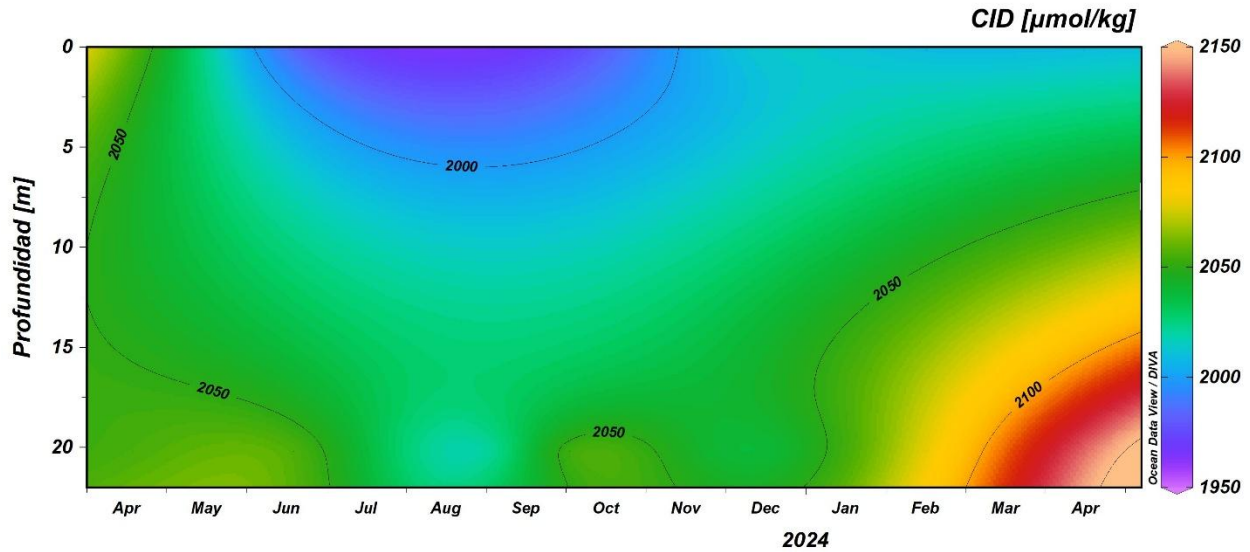


Figura 20. Serie de tiempo de Carbono Inorgánico Disuelto entre abril 2023 – abril 2024 en la BTS.

6.1.4.4 Omega Aragonita

El promedio de Ω_{arag} a lo largo del periodo de estudio fue de 2.17 ± 0.57 , lo que indica que en general las condiciones son ideales para los organismos calcáreos que habitan dentro de la BTS. Sin embargo, se puede observar que los valores más bajos del Ω_{arag} se encontraron durante las temporadas de primavera y verano por debajo de los 15 m (Figura 21). El 2023 resultó ser la excepción de este patrón debido a que a lo largo del año no se presentó mucha variabilidad estacional, a comparación del resto de años. Verticalmente se pudo apreciar que los valores más bajos se ubicaron a los 20 m, mientras que los más altos (>2.5) estuvieron en superficie durante casi la totalidad del periodo de muestreos.

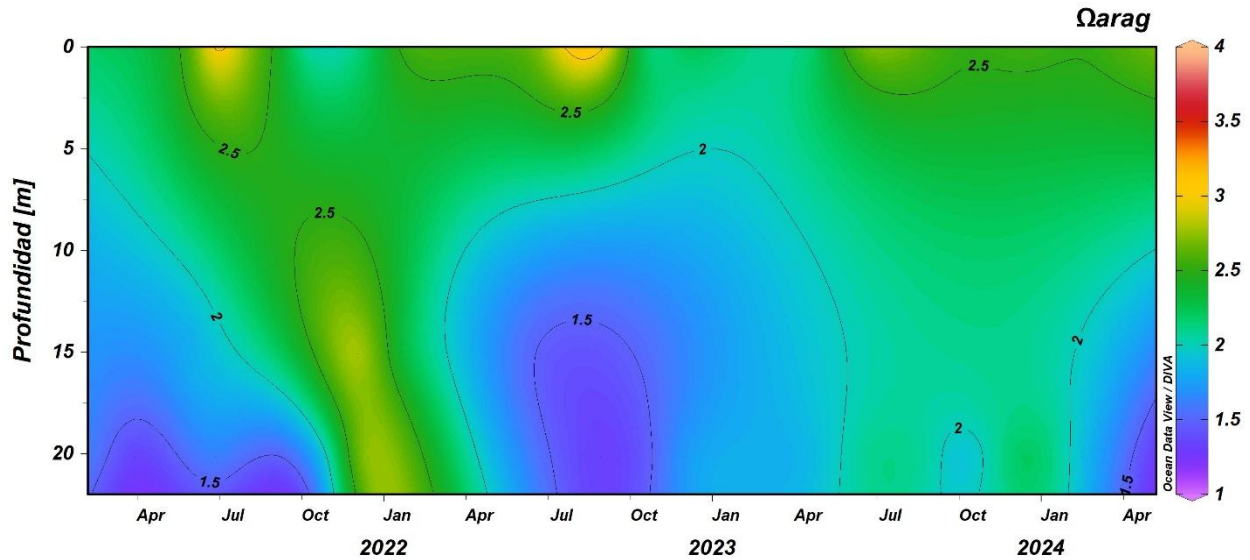


Figura 21. Serie de tiempo de Ω_{arag} entre febrero 2021 – abril 2024 en la BTS.

6.2 Estimación de Ω_{arag} en cultivos de semilla de ostión dentro de la empresa Maxmar

Con la finalidad de poder determinar el Ω_{arag} dentro de los sistemas de cultivo de semilla de ostión en Maxmar utilizando el valor promedio de AT, se analizó la relación entre esta variable y la salinidad, así como mediciones de pCO_2 . En la Figura 22 se presenta el resultado de esta relación, en la cual se graficaron todos los valores de AT contra sus respectivas mediciones de salinidad obtenidas con el CTD. Si bien el coeficiente de regresión entre ambas variables fue bajo ($R^2=0.2283$), se encontró en general una relación directa entre estas variables, ya que, en la mayoría de las mediciones, un aumento en los valores de salinidad estuvo acompañado por un incremento en la AT. Se esperaba obtener un bajo coeficiente de regresión, debido a que en zona costera existen diversos procesos que pueden complicar esta relación. Sin embargo, al aplicar la ecuación generada y calcular los valores de AT, la mayoría de los resultados estuvieron dentro de un valor cercano. Además, la baja variabilidad de AT y de la salinidad (desviación estándar de $9.3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ y 0.24 , respectivamente), permitió utilizar el valor promedio de AT ($2233 \mu\text{mol kg}^{-1}$) para el cálculo del Ω_{arag} .

Aunque no se encontró una correlación fuerte entre la AT y la salinidad, se determinaron promedios de AT para salinidades mayores y menores a 33.5 y otro promedio para valores de salinidad menores a 33.5 . Para $S > 33.5$, el promedio de AT calculado fue de $2236 \pm 8 \mu\text{mol kg}^{-1}$, mientras que para $S < 33.5$, el promedio fue de $2229 \pm 10 \mu\text{mol kg}^{-1}$. Estos resultados indican que,

en general, valores más altos de salinidad corresponden un promedio de AT ligeramente más alto en comparación con salinidades más bajas.

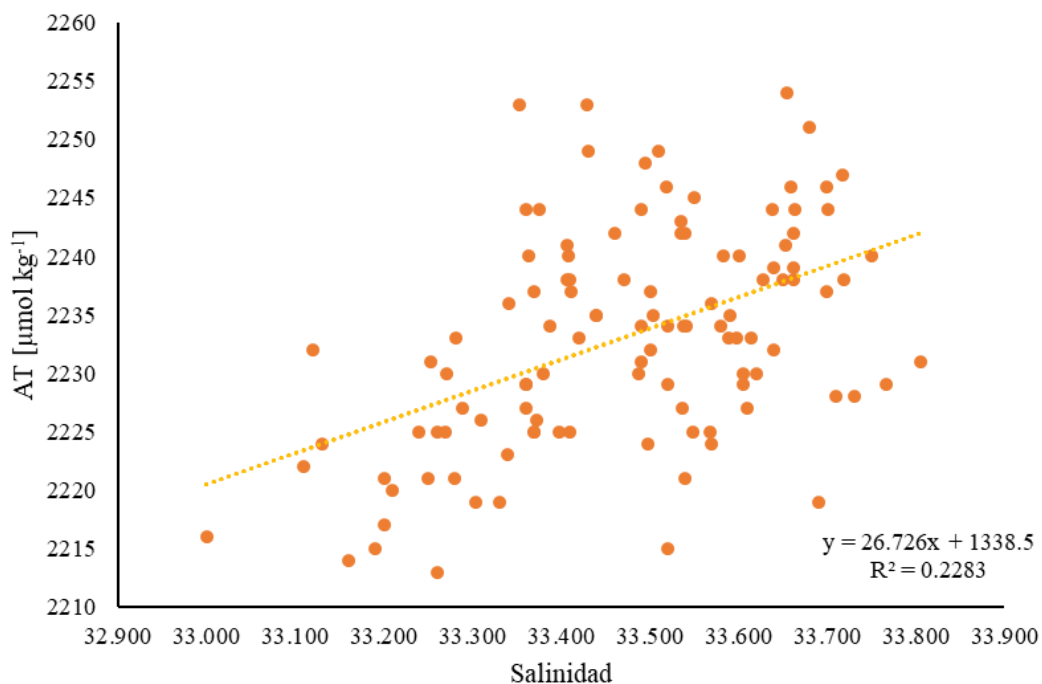


Figura 22. Relación Alcalinidad Total contra Salinidad BTS entre febrero 2021–abril 2024.

Desde enero de 2024 hasta abril del mismo año se calcularon los valores de Ω_{arag} dentro de la empresa Maxmar. Los valores obtenidos durante el mes de marzo (Tabla I) estuvieron dentro del intervalo de 2.01-2.94, lo que indica que las condiciones son buenas para los organismos calcáreos. Se puede apreciar una relación inversa entre los valores de Ω_{arag} y de $p\text{CO}_2$, siendo el valor más alto de Ω_{arag} el correspondiente al valor más bajo de $p\text{CO}_2$ y viceversa.

Tabla I. Estimaciones de Ω aragonita con base a las mediciones realizadas (S, T y $p\text{CO}_2$) en cultivos de semilla de ostión de la empresa Maxmar durante marzo del 2024.

Salinidad	T [°C]	$p\text{CO}_2$ [μatm]	Ω Aragonita
33	17.4	344	2.72
33	17.9	368	2.64
32	23	481	2.60
32	17.5	303	2.94
33	16.3	352	2.57
33	17.2	485	2.12
33	17.1	516	2.01

7 DISCUSIÓN

7.1 Variabilidad de las condiciones oceanográficas (termohalinas)

La BTS forma parte de la costa oeste frente a Baja California y se ha caracterizado como una zona de transición, específicamente en la zona sur, frente a la localidad de Punta Eugenia, Baja California Sur. En esta región, dos masas de agua interactúan en la superficie: Agua Subártica (ASA) y Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESs). Estas masas de agua presentan una estacionalidad a lo largo del año, además de verse influenciadas por procesos interanuales como el ENSO. Lo anterior se refleja en variaciones de las condiciones oceanográficas (Durazo, 2015; Espinoza-Carreón *et al.*, 2015).

Durazo *et al.* (2010) calcularon promedios climatológicos de temperatura y salinidad para el Sistema de la Corriente de California frente a la península de Baja California mediante datos de cruceros hidrográficos de IMECOCAL y CalCOFI (California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations), realizados entre los periodos de 1950-1978 y de 1997-2008. Entre los principales resultados, encontraron que, en general al norte de Punta Eugenia, hay una mayor dominancia de ASA prácticamente a lo largo de todo el año. En cambio, al sur de Punta Eugenia, durante las estaciones de verano y otoño se registra un incremento de AESs que fluye hacia el norte. Los resultados de las condiciones termohalinas en este estudio coinciden con lo planteado anteriormente, en especial en lo que respecta a la temperatura. Durante los años 2021-2023, las temperaturas más altas se presentaron en verano y en otoño, mientras que las más bajas durante las dos temporadas restantes, sobre todo en el invierno. En el caso de la salinidad, no se presentó el mismo patrón que en la temperatura; sin embargo, el rango de salinidad fue pequeño (con un delta de ~ 0.4) en comparación con el de la temperatura que fue de ~ 6 °C. Además, la variabilidad de la temperatura pudo haberse visto afectada por las fluctuaciones estacionales del intercambio aire-mar (Linacre *et al.*, 2010), al igual que por la variabilidad inherente de la temperatura atmosférica.

Respecto a la variabilidad de las masas de agua, de acuerdo con Durazo y Baumgartner (2002), el ASA tiene un intervalo de temperatura de 8-21 °C y de salinidad de 33.0-34.0; mientras que el AESs presenta un intervalo de 8-15 °C de temperatura y 34.3-35.0 de salinidad. Con esta clasificación y analizando el diagrama T-S, se puede identificar que hubo una completa dominancia de ASA durante todo el periodo de estudio.

Durante el 2023 se observó un escenario similar al descrito por [Durazo *et al.* \(2005\)](#), quienes analizaron las condiciones oceanográficas frente a la costa oeste de Baja California durante el periodo 2002-2003. Los autores describieron condiciones termohalinas anómalas, atribuidas a la presencia de un evento débil El Niño (2002-2003). A pesar de ello, se detectaron valores bajos de salinidad (~ 33) durante gran parte del estudio y una presencia dominante de ASA. Este enmascaramiento de El Niño se atribuyó a un incremento en la intensidad de los vientos con dirección hacia el ecuador, lo que ocasionó un mayor transporte de agua subártica hacia el sur. En este trabajo, los valores de salinidad registrados durante el 2023 fueron similares a los reportados por [Durazo *et al.* \(2005\)](#), evidenciando nuevamente una mayor dominancia de ASA. Además, también coincidió con que se encontraba en desarrollo un evento El Niño (ver [Figura 3](#)), especialmente en la segunda mitad del 2023, que fue cuando alcanzó una anomalía de temperatura mayor a $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto demuestra que la variabilidad interanual de las condiciones termohalinas se encuentra relacionada a las anomalías generadas en los flujos, tanto de la bahía como del océano, debido a los cambios en las masas de agua derivados del ENSO ([Linacre *et al.*, 2010](#)).

La variabilidad de las condiciones termohalinas, generada por fluctuaciones estacionales e interanuales, también se ve reflejada en la concentración de clorofila *a*, variable indicadora de la biomasa de fitoplancton ([Pérez-Arvizu *et al.*, 2013](#)). En la [Figura 23](#) se presenta una serie de tiempo de esta variable dentro de la BTS de datos diarios satelitales con una resolución espacial de 0.25° , obtenida de Copernicus Marine Service. A escala estacional, se aprecian las temporadas de surgencias durante primavera-verano, caracterizadas por picos de altas concentraciones de clorofila *a* debido a un ascenso de aguas ricas en nutrientes, lo que genera una mayor producción de fitoplancton ([Durazo *et al.*, 2005](#)). Este patrón de los picos de clorofila *a* en general coincide con los valores más bajos de pH y Ω_{arag} , así como con los valores más altos de CID durante la primavera del 2024. El principal mecanismo que controla la variabilidad de la clorofila *a* dentro del Sistema de la Corriente de California es el flujo vertical de nutrientes, el cual es modificado por el viento ([Di Lorenzo *et al.*, 2008](#)). Estas variaciones en la velocidad y dirección del viento son responsables tanto de generar las surgencias como del movimiento de masas de agua, por lo que la clorofila *a* es un buen indicador de estos cambios hidrográficos a nivel estacional e interanual. En contraste, los valores más bajos se presentaron generalmente durante la temporada de invierno, lo cual es una condición típica de esta estación del año debido a las escasas o débiles surgencias, lo que genera un pobre flujo de nutrientes ([Durazo *et al.*, 2005](#)). Esto también coincide

con las temporadas en las que se registraron los valores más altos de pH y Ω_{arag} (especialmente en invierno del 2022).

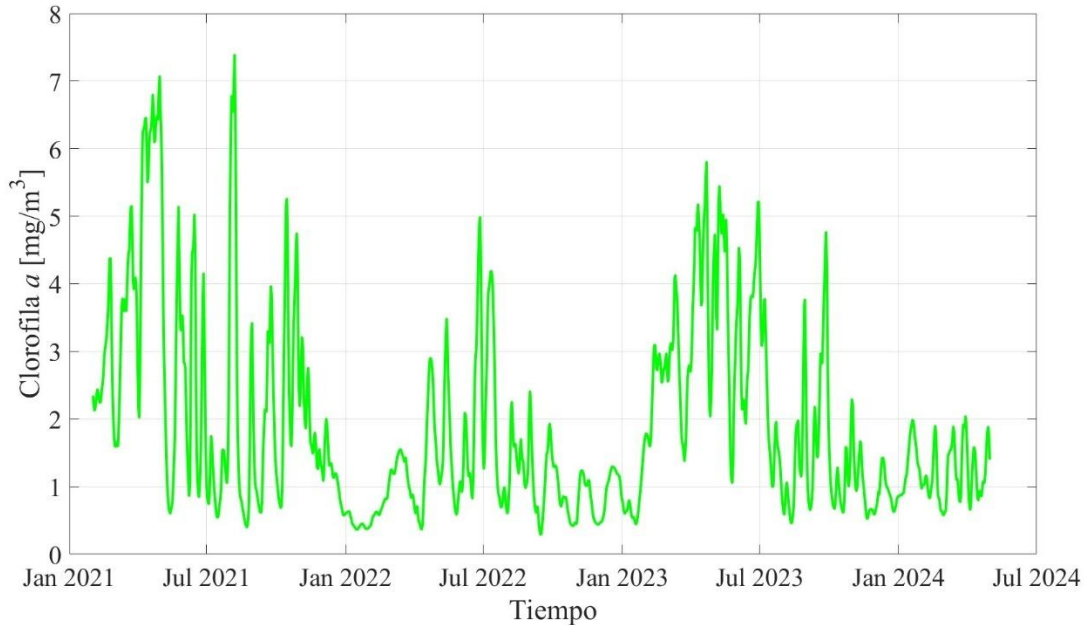


Figura 23. Serie de tiempo de concentraciones de clorofila a dentro de la BTS durante febrero 2021-abril 2024. Los datos se obtuvieron de <https://data.marine.copernicus.eu> DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00019>

7.2 Variabilidad temporal de las variables del sistema del CO_2

La relación AT-Salinidad (AT-S) está bien descrita para el océano abierto, debido a que la AT se encuentra principalmente controlada por procesos como la precipitación o la disolución (Albuquerque *et al.*, 2025). Esta relación AT-S se encuentra estrechamente conectada debido a que dentro de la composición de la salinidad del agua de mar se incluyen a los bicarbonatos y boratos, los cuales son aniones que también se contemplan en la definición de la AT (Millero *et al.*, 2008). Sin embargo, en las zonas costeras esta relación es más complicada debido a los diversos procesos presentes, por ejemplo: evaporación, surgencias, aportes de río, advección de masas de agua, procesos biológicos, entre otros (Jiang *et al.*, 2014). Es por esto, que la AT presentó una variabilidad estacional similar a la de la salinidad, pero el valor de regresión lineal fue bajo ($R^2=0.28$, ver Figura 15). En general, los valores más bajos de AT ($<2230 \mu\text{mol kg}^{-1}$) coincidieron con valores aproximados < 33.3 de salinidad, mientras que por arriba de ~ 33.4 se encontraron los valores más altos de AT ($>2240 \mu\text{mol kg}^{-1}$) (ver Figura 24). El bajo coeficiente de regresión lineal se explica debido que la BTS es una zona en la que se presentan eventos de surgencias, de aportes

de ríos y advección de masas, así como la influencia de procesos biológicos, los cuales también se pueden ver modificados por eventos como las surgencias. Otra razón es que tanto la salinidad como la AT tuvieron intervalos relativamente pequeños, por ejemplo ~33 a 33.8 en la salinidad. Por otro lado, considerando todo el océano abierto, este gradiente de salinidad puede llegar a ser mayor a tres unidades (Millero, 2013), lo que le permite tener un mejor ajuste a la relación AT-S.

Schneider *et al.* (2007) realizaron un estudio sobre la relación AT-S en el Mar Mediterráneo en el 2001. Encontraron, al igual que en el presente estudio, una mala relación entre ambas variables, y lo atribuyeron a procesos de evaporación y de aportes de ríos.

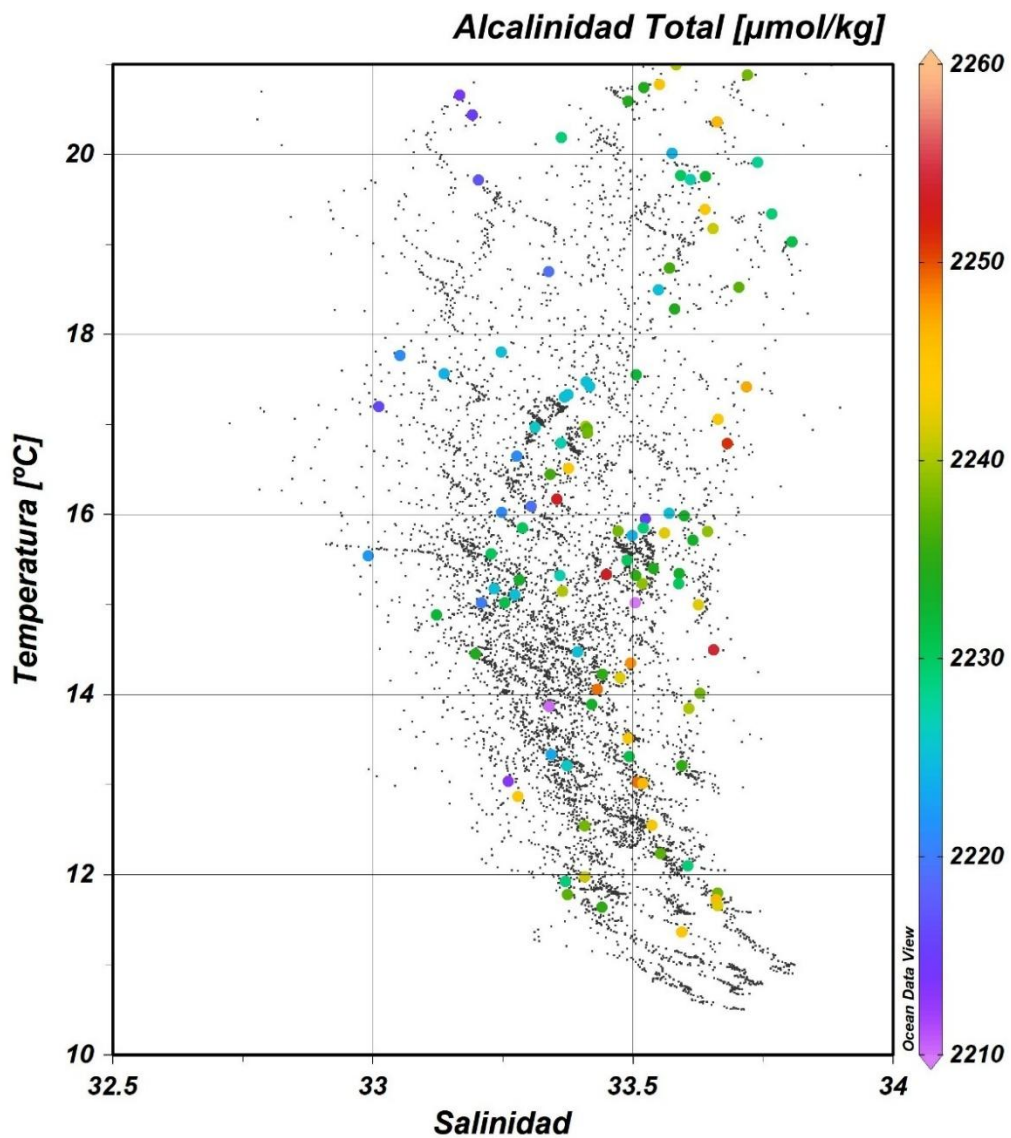


Figura 24. Diagrama T-S vs AT. Los puntos en colores representan las concentraciones de Alcalinidad Total.

El pH, no presentó un claro patrón de estacionalidad, y esto se debe a que hay diversos factores que lo modifican, como contaminación, lluvias, cambios en la temperatura, descargas de aguas residuales, entre otros. Sin embargo, para el sitio de estudio, las surgencias son de los principales procesos físicos que modifican al pH debido a que este ascenso de aguas ricas en nutrientes promueve la producción primaria, lo que modifica la química del carbono (Cheresh y Fiechter, 2020).

En este estudio, el pH presentó sus valores más bajos durante las temporadas de surgencias, mientras que el CID sus concentraciones más altas, a pesar de únicamente tener registrados del último año. La excepción de este patrón fue la primavera del 2023, la cual resultó ser una temporada anómala, como se ha destacado anteriormente. Esta excepción se puede deber a las variaciones en la intensidad de las surgencias costeras ocasionadas por las variaciones interanuales de los eventos ENSO (Linacre *et al.*, 2010).

Los valores calculados de Ω_{arag} coinciden con los reportados por Oliva-Méndez *et al.* (2018), quienes documentaron valores de entre 0.5-3 dentro de la BTS durante el 2011, mientras que los estimados en este trabajo fueron de entre 1 a 3.9. En dicho estudio se realizó un crucero oceanográfico cada estación del año con el fin de comparar la variabilidad estacional del Ω_{arag} y su distribución vertical. Encontraron que dentro y fuera de la BTS únicamente había diferencias en el Ω_{arag} en las estaciones de invierno y primavera. Mientras que, para el resto de las estaciones, los valores registrados en la superficie (0 m) estuvieron alrededor de 2, lo que coincide con el promedio de Ω_{arag} de este estudio, que fue de 2.17 ± 0.57 .

Como se mencionó anteriormente, durante la temporada de surgencias se generó el ascenso de aguas ricas en CO_2 , lo que se reflejó en valores más altos de CID y más bajos de pH. Sin embargo, este proceso también conlleva una reducción en el índice de saturación de carbonatos. Esta tendencia se apreció claramente en los datos de la serie de tiempo de Ω_{arag} , donde se registraron valores de aproximadamente 1.5 (a una profundidad de ~ 15 m; Fig. 21) durante las primaveras del 2021, 2022 y 2024, e inclusive se alargó hasta los meses de verano en el 2021 y 2022. Un resultado similar fue reportado por Oliva-Méndez *et al.* (2018), quienes registraron valores de Ω_{arag} de ~ 1 a una profundidad similar (30 m) durante las temporadas de surgencias en la BTS en el 2011.

Las condiciones hidrográficas de la BTS se encuentran fuertemente asociadas a las corrientes dominantes del océano adyacente (Durazo *et al.*, 2024), y de acuerdo con lo encontrado en este trabajo, se puede determinar que, de igual manera, la variabilidad del sistema del CO₂ en la BTS responde principalmente a las variaciones de las condiciones oceanográficas del océano adyacente que se modifican por la variabilidad estacional e interanual. En la Figura 25 se presenta un esquema con los principales mecanismos físicos dentro de la BTS, donde se pueden apreciar en flechas moradas los flujos de las variaciones interanuales. Cuando hay un evento El Niño, se presenta un flujo hacia el norte de agua de origen tropical, mientras que en La Niña, se espera un flujo hacia el ecuador de ASA. Sin embargo, el inicio del evento El Niño registrado en este estudio, presentó condiciones de circulación diferentes a lo esperado, evidenciado con una mayor presencia de ASA. De igual manera, dentro de la escala estacional, las flechas naranjas y verdes se presentan los flujos de ASA y AESs, los cuales ya se demostraron tener una variabilidad tanto interanual como estacional (Linacre *et al.*, 2010), con base a las condiciones de temperatura y salinidad (ver Figs. 6-17), a pesar de que en este trabajo se registró una mayor dominancia de ASA.

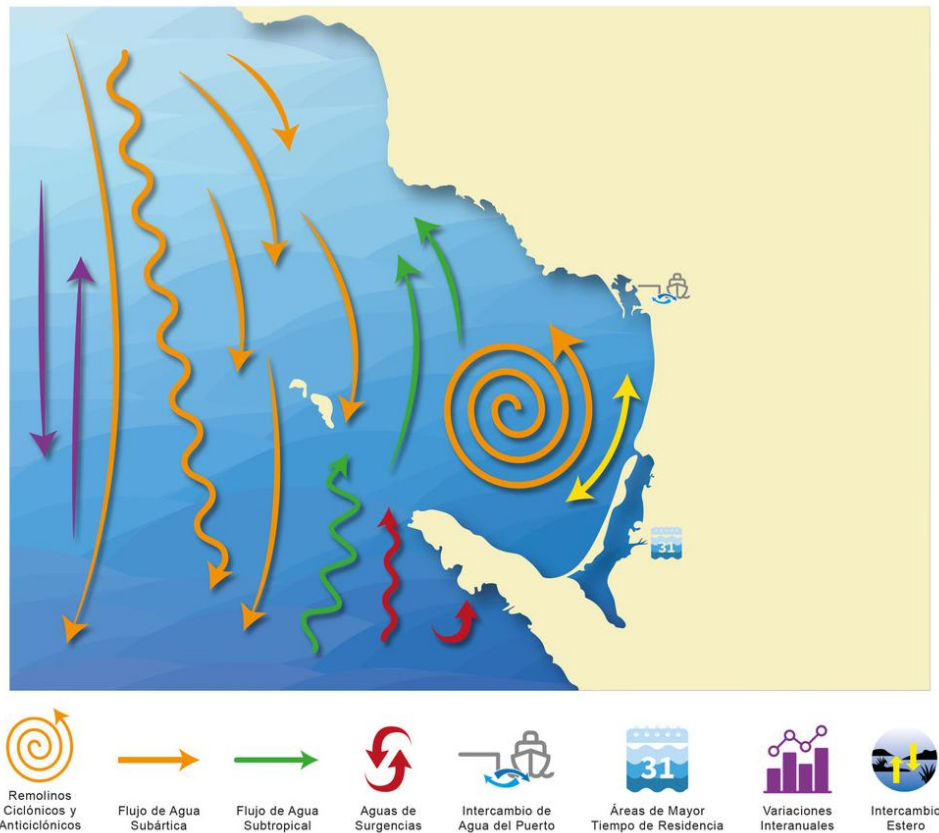


Figura 25. Esquema con los principales procesos físicos que influyen en la biogeoquímica del carbono en la BTS.

La circulación superficial interna de la BTS fue ampliamente descrita por [Durazo et al. \(2024\)](#) mediante datos obtenidos por radares de alta frecuencia desde el 2009-2020. Entre sus principales resultados encontraron que agua de la Corriente de California (CC) entra por la boca norte de la bahía generando una circulación promedio ciclónica, la cual tiene un patrón similar a lo largo del año, pero con pequeñas variaciones especialmente en la intensidad de la corriente. Estas variaciones en la intensidad de la corriente se deben principalmente a los cambios en el forzamiento del viento, los cuales se ven modificados a lo largo de todo el año, siendo de mayor intensidad durante la época de primavera, dando lugar a las surgencias y modificando las condiciones oceanográficas en la columna de agua.

7.3 Análisis de aplicación en la acuicultura

Como se mencionó anteriormente en este trabajo, uno de los objetivos de este estudio era el poder utilizar los datos recopilados para ofrecer una aplicación que contribuya a resolver problemáticas, en este caso información para la acuicultura de organismos calcáreos en la zona de estudio. Una baja tasa de calcificación dentro cultivos puede afectar el desarrollo de los organismos, e incluso provocar su muerte, lo que se refleja en pérdidas económicas para la empresa ([Mangi et al., 2018](#)). Para organismos bivalvos se ha reportado una respuesta proporcional entre el índice/tasa de calcificación y el estado de saturación del aragonita ([Leung et al., 2022](#)). Por esta razón, determinar el Ω_{arag} es fundamental para evaluar si la baja calcificación es un problema presente en los cultivos. Sin embargo, es necesario medir dos de los cuatro parámetros del sistema del CO_2 , además de temperatura, salinidad y presión. Esto resulta ser un obstáculo para el sector de acuicultura debido a que es complicado poder determinar estas variables y sobre todo con una buena precisión. Para el caso de la empresa Maxmar, cuenta con un sistema donde se utiliza el agua de la bahía para sus cultivos de semillas de ostión, por lo que para calcular dos parámetros del sistema del CO_2 (AT y $p\text{CO}_2$ en este caso) resultó ser una buena opción el utilizar los datos recolectados de AT durante los muestreos en la BTS, además del sistema de bajo costo para medir $p\text{CO}_2$ “ $p\text{CO}_2$ to Go” de The Ocean Foundation.

El valor de AT que se utilizó fue $2233 \pm 9.3 \mu\text{mol kg}^{-1}$, que fue el promedio de todos los datos obtenidos de los muestreos de la bahía. Esta desviación estándar ($\sim \pm 10 \mu\text{mol kg}^{-1}$) se aplicó en el cálculo de Ω_{arag} con el fin de validar que este valor promedio funciona para estimar el Ω_{arag} a lo largo del periodo de estudio. Se encontró que al utilizar $+10 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ($2243 \mu\text{mol kg}^{-1}$) el valor

de Ω_{arag} aumentó ~ 0.02 , mientras que cuando se utilizó $-10 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ($2223 \mu\text{mol kg}^{-1}$) el Ω_{arag} disminuyó ~ 0.02 . Esto nos permite identificar que la variación de $\sim \pm 10 \mu\text{mol kg}^{-1}$ no representa cambios importantes en el cálculo del Ω_{arag} .

De acuerdo con [GOA-ON \(2019\)](#) se han definido dos términos relacionados a la calidad de las mediciones del sistema del CO_2 en el agua de mar. El término “Climate” hace referencia a mediciones que tiene la suficiente calidad (precisión) para utilizarse en estudios de tendencias a largo plazo, especialmente en la parte oceánica. El segundo término es el de “Weather” el cual se utiliza en mediciones del sistema de carbonatos que pretenden analizar la respuesta de ecosistemas, por lo que su precisión tiene un rango más amplio, a comparación de las mediciones de “Climate”. Actualmente, existe un debate sobre la precisión necesaria para medir el sistema del CO_2 dentro del área de acuicultura, ya que los acuicultores buscan métodos prácticos y funcionales. Un ejemplo de ello es el sistema “ $p\text{CO}_2$ to Go”, que tiene una precisión de alrededor de $\pm 20 \mu\text{atm}$. Según los criterios de [GOA-ON \(2019\)](#), esta precisión no se ajusta estrictamente a ninguna de las dos categorías establecidas. Sin embargo, en este estudio se encontró que esta variación de $\pm 20 \mu\text{atm}$ en $p\text{CO}_2$ se traduce en una variación de apenas ± 0.07 en Ω_{arag} , lo cual no representa una variación importante dentro del sector de acuicultura. Por ello, en lugar de clasificaciones rígidas, resulta más útil emplear términos como “óptimo” y “no óptimo” dentro del área de acuicultura. Por lo que las mediciones obtenidas en este trabajo pueden considerarse óptimas, dada la poca variación que presentó el equipo utilizado.

La principal especie de ostión que se cultiva en esta empresa es *Crassostrea gigas*. [Barton et al. \(2012\)](#) mencionan que el valor de Ω_{arag} ideal para el desarrollo de las larvas es > 1.6 . Los valores que se presentan en la Tabla I estuvieron entre 2-2.9, por lo que se encuentran por arriba del valor óptimo, sin embargo, este valor podría ser mejor. Es importante recordar que la CC presenta, en general, bajos valores de pH y Ω_{arag} , debido principalmente por las surgencias estacionales, lo que amplifica los efectos de acidificación del océano ([Hauri et al., 2012](#)).

Por esta razón, aunque los resultados obtenidos son favorables, es necesario continuar con este tipo de monitoreos, especialmente durante temporada de surgencias. Se ha encontrado que, durante la temporada de surgencias, que inicia en primavera y puede extenderse hasta el otoño, las aguas subsuperficiales (100 – 200 m), caracterizadas por altas concentraciones de CID (bajo pH) y subsaturadas en cuestión del Ω_{arag} , ascienden hacia la plataforma continental. Estas condiciones

pueden afectar a los organismos calcáreos al exponerlos a un ambiente corrosivo para ellos (Feely *et al.*, 2008). Es necesario realizar más investigaciones para estudiar los efectos que estas aguas corrosivas generan en los organismos calcáreos de la BTS.

8 CONCLUSIONES

1. Se encontraron variaciones estacionales e interanuales respecto a las condiciones termohalinas dentro de la BTS, asociado principalmente por las variaciones del océano adyacente, como la influencia del ENSO a escala interanual.
2. Los parámetros del sistema del CO₂ presentaron variaciones temporales asociadas principalmente por la advección de masas de agua, las cuales transportan agua con distintas características químicas, que varían tanto estacional como interanualmente.
3. Se registró una dominancia de ASA durante la totalidad del periodo de estudio con pequeños pulsos de agua de origen ecuatorial. El 2023 resultó ser el año con menores salinidades, indicando una mayor intrusión de ASA, probablemente asociado a una mayor intensidad de la CC hacia la BTS debido a una intensificación de los vientos hacia el ecuador.
4. Se encontró una relación positiva entre la Alcalinidad Total y Salinidad, donde, en términos generales, los valores más bajos de AT coincidieron con menores salinidades y viceversa. Sin embargo, esta relación presentó un coeficiente de regresión lineal bajo, posiblemente debido a los procesos típicos de zonas costeras que influyen en su variabilidad.
5. Los valores de pH, CID y Ω arag dentro del periodo de muestreo mostraron una relación esperada, en la que un aumento en los valores de CID se asoció con una disminución en el pH y el Ω arag. Dichas variaciones se atribuyen principalmente a la advección de masas de agua.
6. Se logró utilizar el valor promedio de AT obtenido a lo largo de los muestreos en la BTS, junto con las mediciones de pCO_2 con el equipo “ pCO_2 to Go” para obtener mediciones de Ω arag en cultivos de semilla de ostión de la empresa Maxmar. Con base a dichas mediciones, se determinó que no hay evidencia de problemas de baja saturación de carbonatos dentro de los cultivos.

9 LITERATURA CITADA

- Aguilar-Rosas, R., Aguilar-Rosas, L. E., Ávila Serrano, G. E., González Yajimovich, Ó., & Becerril Bobadilla, F. (2010). Macroalgas submareales de la bahía de Todos Santos, Baja California, México Submareal macroalgae of the Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 601 – 618
- Albuquerque, C., Miguel, G., de Oliveira Farias, C., Pinho, L., Marotta, H., Orselli, I. B. M., de Carvalho-Borges, M., Campos, E., Kerr, R., & da Cunha, L. C. (2025). Regional relationship between total alkalinity and salinity in the surface waters of the western South Atlantic margin. *Regional Studies in Marine Science*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103992>
- Barton, A., Hales, B., Waldbusser, G. G., Langdon, C., & Feely, R. A. (2012). The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects. *Limnology and Oceanography*, 57(3), 698–710. <https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.3.0698>
- Cervantes-Díaz, G.Y. (2013). Variabilidad Temporal del Sistema del CO₂ y Nutrientes frente a las Costas de Baja California. Universidad Autónoma de Baja California. Tesis de Maestría. Ensenada, Baja California, México. 128 pp.
- Cheresh, J., & Fiechter, J. (2020). Physical and Biogeochemical Drivers of Alongshore pH and Oxygen Variability in the California Current System. *Geophysical Research Letters*, 47(19). <https://doi.org/10.1029/2020GL089553>
- Clayton T.D. & R.H. Byrne. (1993). Spectrophotometric seawater pH measurements: total hydrogen ion concentration scale calibration of m-cresol purple and at-sea results. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 40(10): 2115-2129.
- Coronado-Álvarez, L. de L. A., Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, J. R., Solana-Arellano, E., Hernández-Ayón, J. M., & Zirino, A. (2017). Variaciones temporales de pCO₂ del agua y flujos aire-agua de CO₂ en una localidad costera en el sur del Sistema de la Corriente de California: De la escala diaria a la interanual. *Ciencias Marinas*, 43(3), 137–156. <https://doi.org/10.7773/cm.v43i3.2707>

- Cruz-Rico, J., & Rivas, D. (2018). Physical and biogeochemical variability in Todos Santos Bay, northwestern Baja California, derived from a numerical NPZD model. *Journal of Marine Systems*, 183, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.04.001>
- Delgadillo-Hinojosa, F., Camacho-Ibar, V., Huerta-Díaz, M. A., Torres-Delgado, V., Pérez-Brunius, P., Lares, L., Marinone, S. G., Segovia, J. A., Peña-Manjarrez, J. L., García-Mendoza, E., & Castro, R. (2015). Seasonal behavior of dissolved cadmium and Cd/PO₄ ratio in Todos Santos Bay: A retention site of upwelled waters in the Baja California peninsula, Mexico. *Marine Chemistry*, 168, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.10.010>
- Dickson, A. G., Sabine, C. L., & Christian, J. Robert. (2007). Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. North Pacific Marine Science Organization.
- Di Lorenzo, E., Schneider, N., Cobb, K. M., Franks, P. J. S., Chhak, K., Miller, A. J., McWilliams, J. C., Bograd, S. J., Arango, H., Curchitser, E., Powell, T. M., & Rivière, P. (2008). North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophysical Research Letters*, 35(8). <https://doi.org/10.1029/2007GL032838>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: The other CO₂ problem. In *Annual Review of Marine Science* (Vol. 1, pp. 169–192). <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Durazo, R., & Baumgartner, T. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Prog. Ocean* 54, 7–31. [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00041-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00041-1).
- Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Lavaniegos, B., Castro-Valdez, R., Gómez-Valdés, J., & da S. Mascarenhas Jr., A. (2005). Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002–2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas*, 31, 537–552. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48031308>
- Durazo, R., Flores-Vidal, X., Castro, R., Ocampo-Torres, F. J., Saavedra, J., Rodríguez-Padilla, I., & Larrañaga, M. (2024). Surface circulation in Todos Santos Bay, Baja California, México. *Continental Shelf Research*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105171>

- Durazo, R. (2015). Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2), 1173–1196. <https://doi.org/10.1002/2014JC010405>
- Espinosa-Carreón, T. L., Gaxiola-Castro, G., Durazo, R., de la Cruz-Orozco, M. E., Norzagaray-Campos, M., & Solana-Arellano, E. (2015). Influence of anomalous subarctic water intrusion on phytoplankton production off Baja California. *Continental Shelf Research*, 92, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.10.003>
- Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., & Millero, F. J. (2004). Impact of Anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ System in the Oceans. *Science*, 305, 362–366
- Feely, R. A., Sabine, C. L., Hernandez-Ayon, J. M., Ianson, D., & Hales, B. (2008). Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the continental shelf. *Science*, 320(5882), 1490–1492. <https://doi.org/10.1126/science.1155676>
- Franco-Gordo, C., Godínez-Domínguez, E., Filonov, A. E., Tereshchenko, I. E., & Freire, J. (2004). Plankton biomass and larval fish abundance prior to and during the El Niño period of 1997–1998 along the central Pacific coast of México. *Progress in Oceanography*, 63(3), 99–123. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.10.001>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Li, H., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Berghoff, C. F., Bittig, H. C., Bopp, L., Cadule, P., Campbell, K., Chamberlain, M. A., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Colligan, T., Decayeux, J., Djeutchouang, L., Dou, X., Duran Rojas, C., Enyo, K., Evans, W., Fay, A., Feely, R. A., Ford, D. J., Foster, A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Heinke, J., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jacobson, A. R., Jain, A., Jarníková, T., Jersild, A., Jiang, F., Jin, Z., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Liu, Z., Liu, J., Ma, L., Maksyutov, S., Marland, G., Mayot, N., McGuire, P., Metzger, N., Monacci, N. M., Morgan, E. J., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Niwa, Y., Nützel, T., Olivier, L., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Qin, Z., Resplandy, L., Roobaert, A., Rosan,

- T. M., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Smallman, T. L., Smith, S., Sospedra-Alfonso, R., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Séférian, R., Takao, S., Tatebe, H., Tian, H., Tilbrook, B., Torres, O., Tourigny, E., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G., Wanninkhof, R., Wang, X., Yang, D., Yang, X., Yu, Z., Yuan, W., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, N., and Zeng, J.: Global Carbon Budget 2024, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2024-519>, in review, 2024.
- GOA-ON (Global Ocean Acidification Observing Network), 2019. “Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON) Implementation Strategy, 2019.” www.goa-on.org
- González-Silvera, A., Santamaría-del-Ángel, E., Camacho-Ibar, V., López-Calderón, J., Santander-Cruz, J., & Mercado-Santana, A. (2020). The effect of cold and warm anomalies on phytoplankton pigment composition in waters off the Northern Baja California Peninsula (Mexico): 2007-2016. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/JMSE8070533>
- Gutiérrez-Galindo, E. A., Muñoz-Barbosa, A., Mandujano-Velasco, M. R., Daesslé, L. W., & Orozco Borbón, M. v. (2010). Distribution and enrichment of silver and cadmium in coastal sediments from Bahía Todos Santos, Baja California, México. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 85(4), 391–396. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0103-0>
- Hauri, C., Gruber, N., Vogt, M., Doney, S. C., Feely, R. A., Lachkar, Z., Leinweber, A., McDonnell, A. M. P., Munnich, M., & Plattner, G.-K. (2012). *Spatiotemporal variability and long-term trends of ocean acidification in the California Current System*. <https://doi.org/10.5194/bg-9-10371-2012>
- Hernández-Ayón, J.M., S.L. Belli and A. Zirino. 1999. pH, alkalinity, and total CO₂ in coastal seawater by potentiometric titration with a difference derivative readout. *Anal. Chim. Acta*, 394:101-108.
- Jiang, L. Q., Carter, B. R., Feely, R. A., Lauvset, S. K., & Olsen, A. (2019). Surface ocean pH and buffer capacity: past, present and future. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55039-4>

- Jiang, Z.-P., T. Tyrrell, D. J. Hydes, M. Dai, and S. E. Hartman (2014), Variability of alkalinity and the alkalinity-salinity relationship in the tropical and subtropical surface ocean, *Global Biogeochem Cycles*. 28: 729–742. DOI:10.1002/2013GB004678.
- Johnson, K., J. Sieburth, Williams, P. y Brändström, L. (1987). Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: Automation and calibration. *Marine Chemistry*, 21(2), 117-133. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(87\)90033-8](https://doi.org/10.1016/0304-4203(87)90033-8).
- Juárez-Colunga, M.C., Hernández-Ayón, J.M., Durazo, R., Lara-Lara, R., Gaxiola-Castro, G., Siqueiros-Valencia, A. & Salmerón-García, O. (2010). Variación espacial y temporal del pH. En G. Gaxiola-Castro & R. Durazo (Eds.), *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007* (pp. 181–195). SEMARNAT.
- Juranek, L. W., Feely, R. A., Gilbert, D., Freeland, H., & Miller, L. A. (2011). Real-time estimation of pH and aragonite saturation state from Argo profiling floats: Prospects for an autonomous carbon observing strategy. *Geophysical Research Letters*, 38(17). <https://doi.org/10.1029/2011GL048580>
- León-Santos, G.S. (2018). *Respuesta del Sistema del Dióxido de Carbono Frente a Baja California en Dos Condiciones Oceanográficas Distintas*. Universidad Autónoma de Baja California. Tesis de Licenciatura. Ensenada, Baja California, México. 46 pp.
- Leung, J. Y. S., Zhang, S., & Connell, S. D. (2022). Is Ocean Acidification Really a Threat to Marine Calcifiers? A Systematic Review and Meta-Analysis of 980+ Studies Spanning Two Decades. In *Small* (Vol. 18, Issue 35). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/sml.202107407>
- Lewis, E. y Wallace, D. W. R. (1998). Program Developed for CO₂ System Calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. <https://doi.org/10.2172/639712>.
- Linacre, L., Durazo, R., Hernández-Ayón, J. M., Delgadillo-Hinojosa, F., Cervantes-Díaz, G., Lara-Lara, J. R., Camacho-Ibar, V., Siqueiros-Valencia, A., & Bazán-Guzmán, C. (2010). Temporal variability of the physical and chemical water characteristics at a coastal

- monitoring observatory: Station ENSENADA. *Continental Shelf Research*, 30(16), 1730–1742. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.07.011>
- Lovatelli, A., Farías, A., & Uriarte, I. (2008). Estado actual del cultivo y manejo de moluscos bivalvos y su proyección futura. Factores que afectan su sustentabilidad futura en América Latina. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*, 12: 359.
- Lueker, T. J., Dickson, A. G. y Keeling, C. D. (2000). Ocean pCO₂ calculated from dissolved inorganic carbon, alkalinity, and equations for K₁ and K₂: validation based on laboratory measurements of CO₂ in gas and seawater at equilibrium. *Marine Chemistry*, 70(1-3), 105-119. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(00)00022-0).
- Mangi, S. C., Lee, J., Pinnegar, J. K., Law, R. J., Tyllianakis, E., & Birchenough, S. N. R. (2018). The economic impacts of ocean acidification on shellfish fisheries and aquaculture in the United Kingdom. *Environmental Science and Policy*, 86, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.008>
- Millero, F. J., Feistel, R., Wright, D. G., & McDougall, T. J. (2008). The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(1), 50–72. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2007.10.001>
- Millero, F. (2013). *Chemical Oceanographic*. Fourth edition. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida. 571 p.
- Oliva-Méndez, N., Delgadillo-Hinojosa, F., Pérez-Brunius, P., Valencia-Gasti, A., Huerta-Díaz, M. A., Palacios-Coria, E., & Hernández-Ayón, J. M. (2018). The carbonate system in coastal waters off the northern region of the Baja California Peninsula under La Niña conditions. *Ciencias Marinas*, 44(3), 203–220. <https://doi.org/10.7773/cm.v44i3.2833>
- Pérez-Arvizu, E. M., Aragón-Noriega, E. A., & Espinosa-Carreón, T. L. (2013). Seasonal variability of chlorophyll *a* and their response to El Niño and La Niña conditions in the Northern Gulf of California. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 48(1), 131–141. <https://doi.org/10.4067/s0718-19572013000100011>

- Reid, G. K., Gurney-Smith, H. J., Flaherty, M., Garber, A. F., Forster, I., Brewer-Dalton, K., Knowler, D., Marcogliese, D. J., Chopin, T., Moccia, R. D., Smith, C. T., & de Silva, S. (2019). Climate change and aquaculture: Considering adaptation potential. *Aquaculture Environment Interactions*, 11, 603–624. <https://doi.org/10.3354/AEI00333>
- Saavedra, L. M., Saldías, G. S., Broitman, B. R., & Vargas, C. A. (2021). Carbonate chemistry dynamics in shellfish farming areas along the Chilean coast: Natural ranges and biological implications. *ICES Journal of Marine Science*, 78(1), 323–339. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa127>
- Santoso, A., Mcphaden, M. J., & Cai, W. (2017). The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55, 1079–1129. <https://doi.org/10.1002/2017RG000560>
- Schneider, A., Wallace, D. W. R., & Körtzinger, A. (2007). Alkalinity of the Mediterranean Sea. *Geophysical Research Letters*, 34(15). <https://doi.org/10.1029/2006GL028842>
- Simón-Otero, I. (2016). Distribución del horizonte de saturación de la aragonita empleando un modelo empírico durante condiciones de “El Niño” en las costas de Baja California. Universidad de Vigo. Tesina de Licenciatura. Vigo, Pontevedra, España. 17 pp.
- Stewart-Sinclair, P. J., Last, K. S., Payne, B. L., & Wilding, T. A. (2020). A global assessment of the vulnerability of shellfish aquaculture to climate change and ocean acidification. *Ecology and Evolution*, 10(7), 3518–3534. <https://doi.org/10.1002/ece3.6149>
- Zhang, Y., Qian, Y., Dulière, V., Salathé, E. P., & Leung, L. R. (2012). ENSO anomalies over the Western United States: Present and future patterns in regional climate simulations. *Climatic Change*, 110(1–2), 315–346. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0088-7>