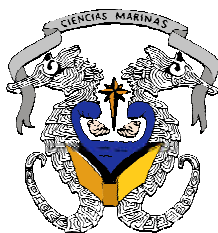


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**



Faculta de Ciencias Marinas



**DINÁMICA DEL CO<sub>2</sub> EN LA ZONA MÍNIMA DE OXÍGENO  
DEL PACÍFICO TROPICAL FRENTE A MÉXICO CENTRAL  
DURANTE EL NIÑO 2015-2016**

**TESIS**

para obtener el título de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta

**Pablo Nicolás Trucco Pignata**

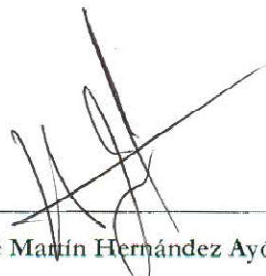
DINÁMICA DEL CO<sub>2</sub> EN LA ZONA MÍNIMA DE  
OXÍGENO DEL PACÍFICO TROPICAL FRENTE A  
MÉXICO CENTRAL DURANTE EL NIÑO 2015-2016

Tesis

Que para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

Presenta

PABLO NICOLÁS TRUCCO PIGNATA



---

Dr. José Martín Hernández Ayón

Director de Tesis



---

Dr. Eduardo Santamaría del Ángel

Sinodal



---

Dr. Emilio Beier

Y Sinodal

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi director de tesis Martín, no solo por todo el asesoramiento y empeño a lo largo de este trabajo, sino también por la dedicación formativa que ha tenido conmigo y por haberme incluido dentro de su excelente grupo.

A mis sinodales Dr. Eduardo Santamaría y Dr. Emilio Beier. Por tener las puertas de sus oficinas siempre abiertas, y tomarse toda la paciencia de hacerme comprender bien todos los conceptos necesarios.

Al grupo de seminario de oceanografía química, por propiciar un excelente ambiente formador. He disfrutado mucho de contrastar mis ideas con ustedes.

A la Dra. Laura Sánchez y al Dr. Víctor Godínez por invitarnos a colaborar en sus proyectos y apoyarnos en las campañas oceanográficas que permitieron este trabajo.

A todo el CO<sub>2</sub> team, Arturo, Carmen, Cheo, Gaby, Jonatan, Juan, Linda, Mariana, Norma y Orión. No podría haber encontrado mejores compañeros. Gracias por todo.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado para los estudios de mi maestría.

## ÍNDICE

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| LISTA DE TABLAS .....                                                                            | 6  |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                           | 7  |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                               | 10 |
| HIPÓTESIS.....                                                                                   | 10 |
| OBJETIVOS.....                                                                                   | 10 |
| METODOLOGÍA.....                                                                                 | 11 |
| Área de Estudio .....                                                                            | 11 |
| Muestreo .....                                                                                   | 11 |
| Mediciones de carbono inorgánico disuelto (CID).....                                             | 12 |
| Mediciones de pH <sub>T</sub> espectrofotométrico.....                                           | 12 |
| Mediciones de alcalinidad total (AT).....                                                        | 13 |
| Normalización de CID superficial por salinidad .....                                             | 14 |
| Estimación pCO <sub>2</sub> y normalización de pCO <sub>2</sub> superficial por temperatura..... | 15 |
| Cálculo de Flujo de CO <sub>2</sub> .....                                                        | 15 |
| Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) y Salinidad Absoluta ( $S_A$ ).....                        | 16 |
| RESULTADOS.....                                                                                  | 17 |
| Masas de agua.....                                                                               | 17 |
| Muestreo de Junio 2015.....                                                                      | 17 |
| Muestreo de Marzo 2016.....                                                                      | 18 |
| Distribución de temperatura y salinidad .....                                                    | 19 |
| Análisis de Transecto 1 .....                                                                    | 20 |
| Caracterización y distribución química (CID, OD, pH <sub>T</sub> y pCO <sub>2</sub> ) .....      | 21 |
| Carbón inorgánico disuelto (CID) .....                                                           | 22 |
| Oxígeno Disuelto.....                                                                            | 23 |
| pH <sub>T</sub> .....                                                                            | 26 |
| Presión parcial de CO <sub>2</sub> (pCO <sub>2</sub> ).....                                      | 27 |
| Flujos de CO <sub>2</sub> .....                                                                  | 29 |
| DISCUSIONES .....                                                                                | 31 |
| Condiciones oceanográficas anómalas .....                                                        | 31 |
| Procesos superficiales de concentración y dilución sobre el CID .....                            | 35 |
| Diferenciación espacial en la dinámica del OD y CID.....                                         | 38 |
| Junio 2015 .....                                                                                 | 39 |
| Región Cabo Corrientes.....                                                                      | 39 |



|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| Región transicional.....                        | 41 |
| Región de la Boca del Golfo de California ..... | 42 |
| Marzo 2016.....                                 | 43 |
| Región Cabo Corrientes.....                     | 43 |
| Región transicional.....                        | 43 |
| CONCLUSIONES.....                               | 44 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Límites de masas de agua en el Pacífico Tropical frente a México. Tomado y modificado a partir de Portela et al. (2016). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 17 |
| Tabla 2. Características físicas de las masas de agua en el Pacífico Tropical frente a México. Se presenta la salinidad y temperatura promedio para cada masa de agua. Los acrónimos utilizados son Agua del Golfo de California (AGC), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua Transicional (ATr), Agua Tropical Superficial (ATS) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt). nr= no registrada. *Porcentaje del total de datos registrados con el CTD. .... | 18 |
| Tabla 3. Características químicas de las masas de agua en el PTCM. Se presenta el CID, pH <sub>T</sub> , pCO <sub>2</sub> y OD promedio para cada masa de agua. Los acrónimos utilizados son Agua del Golfo de California (AGC), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua Transicional (ATr), Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) y Agua Intermedia del Pacífico. nr= no registrada. ....                                 | 22 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Estaciones del crucero a) Glider-Marias 1506 del 3 al 16 de junio de 2015 y b) Glider-Marias 1603 del 2 al 8 de marzo de 2016. En color se presenta la batimetría, y la línea en blanco el Transecto 1 con puntos de referencia P1, P2 y P3. Las cruces negras representan las estaciones donde se colectaron muestras para mediciones de alcalinidad total, pH y carbono inorgánico disuelto. En todas las estaciones se realizaron perfiles de CTD. Línea punteada amarilla denota el área utilizada para la determinación de anomalías estacionales y anomalía de temperatura superficial del mar, en círculo verde estación virtual de índice de surgencias y en estrellas rojas estaciones meteorológicas (I-V Los Cabos, Angostura, Mazatlán, Escuinapa y Manzanillo; ver discusiones). | 12 |
| Figura 2. Diferencia del valor certificado de estándar de pH con respecto al valor medido. Las diferencias están por debajo de $\pm 0.01$ unidades de pH.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 13 |
| Figura 3. $pH_T$ medido contra $pH_T$ calculado. En línea continua se presenta la regresión lineal y en línea punteada el intervalo de predicción 95% ( $r_p=0.9945$ ).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 14 |
| Figura 4. Diagrama Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) y Salinidad Absoluta ( $S_A$ ). En colores la latitud en grados Norte. a) junio de 2015 y b) marzo de 2016. Los acrónimos utilizados son Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Transicional (ATr), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua del Golfo de California (AGC), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) y Agua Intermedia del Pacífico (AIP). Límites tomados a partir de Portela et al., (2016).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 18 |
| Figura 5. Distribución espacial de Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) en a) y b), y Salinidad Absoluta ( $S_A$ ) en c) y d), a 10 metros de profundidad. En contorno blanco los límites halinos del Agua del Golfo de California ( $>35.1$ g/kg) y Agua Tropical Superficial ( $<34.6$ g/kg).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 20 |
| Figura 6. Perfiles verticales de Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) y Salinidad Absoluta ( $S_A$ ) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 (a y b) y marzo de 2016 (c y d). Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 21 |
| Figura 7. Diagrama Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) y Salinidad Absoluta ( $S_A$ ). En colores el contenido de carbono inorgánico disuelto (CID) en $\mu\text{mol/kg}$ . a) junio de 2015 y b) marzo de 2016. Los acrónimos utilizados son Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Transicional (ATr), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua del Golfo de California (AGC), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) y Agua Intermedia del Pacífico (AIP). Límites tomados a partir de Portela et al., (2016).                                                                                                                                                                                                                                                                               | 22 |
| Figura 8. Concentración de oxígeno medido contra oxígeno saturado calculado. Margen izquierda crucero Marías 0615 y margen derecha Marías 0316.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 23 |
| Figura 9. Perfiles verticales de oxígeno disuelto (OD, $\mu\text{mol/kg}$ ) y anomalía de densidad potencial ( $\sigma_\theta$ ; $\text{kg/m}^3$ ) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 (a) y marzo de 2016 (b). En contorno blanco se muestra los horizontes óxicos ( $> 200 \mu\text{mol/kg}$ ), hipóxicos ( $<44 \mu\text{mol/kg}$ ) y subóxicos ( $<4.4 \mu\text{mol/kg}$ ). Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 24 |
| Figura 10. Espesor de la zona mínima de oxígeno (ZMO) contra la profundidad del límite superior de la ZMO. En color la intensidad de la oxiclina ( $\mu\text{mol/kg m}^{-1}$ ). Margen izquierda crucero Marías 0615 y margen derecha Marías 0316. Notar la diferencia de escala en la intensidad de la oxiclina.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 25 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 11. Oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ) contra carbono inorgánico disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ). Los acrónimos utilizados son Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Transicional (ATr), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua del Golfo de California (AGC) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) Margen izquierda crucero Marías 0615 y margen derecha Marías 0316 .....                                                                                                                                                                                               | 26 |
| Figura 12. Utilización aparente de oxígeno ( $\mu\text{mol/kg}$ ) contra carbono inorgánico disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ). Margen izquierda crucero Marías 0615 con una razón molar de $\text{CID} = 0.9777 \times \text{UAO} + 2018.34$ ( $r_p=0.9075$ , $gl=53$ ). Margen derecha Marías 0316 con una razón molar de $\text{CID} = 1.0807 \times \text{UAO} + 1970.81$ ( $r_p=0.9727$ , $gl=23$ )..                                                                                                                                                                                           | 26 |
| Figura 13. pH en escala total ( $\text{pH}_T$ ) contra carbono inorgánico disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ) para los diferentes períodos muestreados, junio 2015 en círculos verdes, marzo de 2016 en triángulos rojos. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 27 |
| Figura 14. Distribución espacial superficial de la presión parcial de $\text{CO}_2$ ( $\text{pCO}_2$ ) en $\mu\text{atm}$ . Lado izquierdo junio de 2015, lado derecho marzo de 2016.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 28 |
| Figura 15. Diferencia entre la presión parcial de $\text{CO}_2$ ( $\text{pCO}_2$ ) y la $\text{pCO}_2$ normalizada por temperatura ( $\text{NpCO}_2$ ), contra anomalía de densidad potencial y latitud. En Margen izquierda crucero Marías 0615 y margen derecha Marías 0316. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 29 |
| Figura 16. Distribución espacial de Flujos de $\text{CO}_2$ ( $\text{FCO}_2$ ) en $\text{mmol/m}^2\text{d}$ . Lado izquierdo junio de 2015, lado derecho marzo de 2016. Notar la diferencia en las magnitudes de flujos para cada período.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 29 |
| Figura 17. Histograma de frecuencia de los flujos de $\text{CO}_2$ ( $\text{FCO}_2$ ) calculados para cada temporada. En el margen izquierdo junio de 2015, y en el margen derecho marzo de 2016. Notar la diferencia en las magnitudes de flujos para cada período. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 30 |
| Figura 18. Diagrama Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) y Salinidad Absoluta (SA). Lado izquierdo junio 2015, lado derecho marzo 2016. En color rojo promedio estacional obtenido del World Ocean Atlas 2009 ( $>25$ observaciones por dato graficado). Invierno, lado derecho Los acrónimos utilizados son Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Transicional (ATr), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua del Golfo de California (AGC), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) y Agua Intermedia del Pacífico (AIP). Límites tomados a partir de Portela et al., (2016).....       | 31 |
| Figura 19. Anomalía mensuales de TSM (ver texto para definición) de 2002 a 2016 (ver Figura 1 para área) La línea negra representa el Índice de Oscilación del Sur. (SOI por sus siglas en inglés) para el mismo periodo (Tomado y modificado a partir de Sánchez-Velasco et al. (2017)).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 32 |
| Figura 20.Perfiles verticales de anomalías de temperatura conservativa ( $\Theta$ , $^{\circ}\text{C}$ ) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 (a) y marzo de 2016 (b). Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 33 |
| Figura 21.Perfiles verticales de anomalías de oxígeno disuelto (OD, $\mu\text{mol/kg}$ ) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 (a) y marzo de 2016 (b). En contorno blanco con línea punteada se presenta los límites halinos (salinidad absoluta ( $S_A$ ; g/kg)) del Agua del Golfo de California (AGC, 35.1 g/kg) y del Agua Tropical Superficial (ATS), Agua de la Corriente de California (ACC) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) todas con una frontera halina de 34.6 g/kg (ver Tabla 1) Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1 ..... | 34 |
| Figura 22. Distribución espacial de la diferencia entre CID superficial menos el CID superficial normalizado por salinidad (ver apartado de metodología). En línea punteada blanca los límites halinos en salinidad absoluta ( $S_A$ )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| del ATS (<34.6 g/kg) y del AGC (35.1 g/kg). Lado izquierdo junio de 2015, lado derecho marzo de 2016. Notar la diferencia en las escalas gráficas para cada período. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 36 |
| Figura 23. Diagrama Hovmöller representando la evaporación promedio diaria (cm/año), en función de el tiempo (días) y la latitud norte (grados). Los recuadros rojos representan el periodo de tiempo en que se realizaron los cruceros oceanográficos. Parte superior junio de 2015, parte inferior marzo de 2016. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 37 |
| Figura 24. Precipitación promedio diaria (mm) en función del tiempo (días). Los recuadros rojos representan el periodo de tiempo en que se realizaron los cruceros oceanográficos. Parte superior junio de 2015, parte inferior marzo de 2016. Estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (ver Figura 1).....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 38 |
| Figura 25. Distribución espacial de a) profundidad de la oxiclina (m), b) intensidad de la oxiclina ( $\mu\text{mol/kg m}^{-1}$ ), c) estratificación ( $\text{J/m}^3$ ) y d) profundidad de capa de mezcla (m), durante junio de 2015.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 40 |
| Figura 26. Perfiles verticales de carbón inorgánico disuelto (CID, $\mu\text{mol/kg}$ ) y oxígeno disuelto (OD, $\mu\text{mol/kg}$ ) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 parte superior y marzo de 2016 parte inferior. En contorno se muestra los horizontes óxicos ( $> 200 \mu\text{mol/kg}$ ), hipóxicos ( $<44 \mu\text{mol/kg}$ ) y subóxicos ( $<4.4 \mu\text{mol/kg}$ ). Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1. Líneas punteadas verticales separan las regiones propuestas I=Cabo Corrientes, II=Transicional, III=Boca del Golfo de California. .... | 42 |

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas acuáticos costeros representan aproximadamente el 8% del total de los océanos mundiales, sin embargo, aportan entre el 19-28% de la productividad primaria global (Longhurst 1995). Su contribución al balance global de carbono, ya sea como fuente o sumidero de CO<sub>2</sub> ha sido ampliamente discutida (Tsunogai et al. 1999; Frankignoulle & Borges 2001; Degrandpre et al. 2002; Thomas et al. 2004) y, debido a su significancia, se ha resaltado la necesidad de conocer los balances de carbono para comprender su papel ante futuros escenarios del Cambio Climático Global y ser aplicado a modelos (E. E. Hofmann et al. 2011).

En el Pacífico frente a México se han estado realizando importantes esfuerzos para aumentar la cobertura en estimaciones del carbono inorgánico contenido en el océano. En la porción noroeste dicha cobertura comprende lagunas costeras (Hernández-Ayón et al. 2007; Ribas-ribas et al. 2011; Ávila López 2017) , series de tiempo costeras (v.g. Reimer et al. 2013), el sistema de la Corriente de California (v.g. Cervantes Díaz 2013; Oliva Méndez 2012), en la región de las grandes islas del Golfo de California (Hernández-Ayón et al. 2013), y arrecifes coralinos (Norzagaray López 2015). En contraparte, la cobertura en el suroeste mexicano comprende el Pacífico Tropical frente a las costas de Colima (Franco et al. 2014), en las bahías de Manzanillo (v.g. Sámano-Rodríguez & Sosa-Avalos, 2013) y las costas de Oaxaca (Chapa-Balcorta et al. 2015). Pese a ser importantes contribuciones, existe un considerable vacío de información que vincule estas dos regiones, completando el horizonte de carbono oceánico de la costa Oeste mexicana. Por lo cual, uno de los principales objetivos de este trabajo es aportar conocimiento sobre la distribución y dinámica del sistema de CO<sub>2</sub> en esta región transicional.

## HIPÓTESIS

Las variables del sistema de carbono estarán fuertemente moduladas de manera regional por la distribución e interacción de las masas de agua del Pacífico Tropical frente a México, y por la profundidad relativa que presenten las características descriptoras de la zona mínima de oxígeno.

## OBJETIVOS

- Determinar cuáles masas de agua estuvieron presentes en la zona de estudio durante el verano del 2015 e invierno 2016.
- Estandarizar la medición espectrofotométrica de alta precisión del pH.
- Caracterizar las masas de agua en términos de carbono inorgánico disuelto, alcalinidad total, pH y presión parcial de CO<sub>2</sub>.
- Calcular los flujos de CO<sub>2</sub> a partir del carbón inorgánico disuelto y pH.
- Identificar los principales procesos físicos y biogeoquímicos que controlan las variables del sistema del carbono.

## METODOLOGÍA

### *Área de Estudio*

El área de estudio se encuentra localizada dentro del Pacífico Tropical frente a México Central (PTMC), desde la latitud 25.5 °N en el Golfo de California, frente a las costas de Baja California Sur y Sinaloa, hasta 18 °N frente a las costas de Nayarit y Jalisco, y entre las longitudes 105.5 °W y 110°W (Figura 1). Es una región oceanográficamente compleja, donde sus características hidrográficas dependen de la interacción de las masas de aguas que la rodean (Portela et al. 2016), así como de la intensa variabilidad estacional, interanual y de mesoescala de los procesos físicos imperantes (Godínez et al. 2010).

En la porción Norte la circulación está dominada por la entrada de Agua Transicional (ATr) a lo largo de Sinaloa, y la salida de Agua del Golfo de California (AGC) por el lado peninsular (Castro y Durazo 2000; Lavín et al. 2013; (Kurczyn et al. 2012); Portela et al. 2016). La dinámica de esta porción está fuertemente modulada por la presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos (Castro et al. 2006; Lavín et al. 2009; Lavín et al. 2013; Kurczyn et al. 2012; Collins et al. 2015), los cuales repercuten de manera significativa en la productividad primaria y en la distribución de larvas de peces (Apango-Figueroa et al. 2015).

En la porción Sur, frente a las costas de Nayarit y Jalisco existe una fuerte estratificación de la columna de agua, con Agua Tropical Superficial (ATS) dominando los primeros 70 metros (Franco et al. 2014). Ésta, en verano-otoño principalmente, es transportada en dirección norte por la Corriente Costera Mexicana (CCM), desplazándose a lo largo de la plataforma continental (Gómez-Valdivia, Parés-Sierra, y Flores-Morales 2015), interactuando y mezclándose con ATr, AGC y Agua de Corriente de California (ACC). La última es adveccionada hacia el este debido a la presencia de remolinos ciclónicos intermitentes presentes en la punta de la Península de Baja California (Lavín et al. 2009). De manera general, el PTMC recibe AGC durante la primavera y ATS principalmente durante verano y otoño (Portela et al. 2016).

Nuestra región de estudio forma parte de una de las mayores zonas de mínimo oxígeno (ZMO) que ocurre de manera natural (Fiedler & Talley 2006; Stramma et al. 2010). La oxiclina costera se presenta de manera somera, entre los 50 y 100 metros de profundidad (Fernández-Álamo & Färber-Lorda 2006; Cepeda-Morales et al. 2009; Cepeda-Morales et al. 2013), pero también la carboclina (Franco et al., 2014). Estas aguas ricas en carbono inorgánico disuelto (CID) y bajas en oxígeno disuelto (OD) se encuentran asociadas al Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), dominando zonal y meridionalmente por debajo de las masas de agua descritas en el párrafo anterior. Su profundidad, en conjunto con eventos de surgencias y/o bombeo por remolinos ciclónicos pueden repercutir de manera significativa en la presión parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>), con consecuencias relevantes en las estimaciones de flujos de CO<sub>2</sub> entre el océano y la atmósfera.

### *Muestreo*

Se realizaron dos cruceros oceanográficos a bordo del B/O Alpha Helix. Los datos hidrográficos se midieron utilizando un CTD modelo SBE-911 plus, y se colectaron muestras de agua de mar a diferentes niveles (típicamente desde la superficie hasta 200 metros) utilizando una roseta con botellas Niskin de 12 litros. En junio de 2015, de un total de 83 estaciones hidrográficas, 29 fueron analizadas para determinar su contenido de carbono inorgánico disuelto (CID), pH y alcalinidad total (AT). Para marzo de 2016 se analizaron 24 estaciones de un total de 48 (Figura 1). Las muestras para el análisis de CID, pH y AT fueron tomadas y preservadas de acuerdo a los procedimientos especificados en el manual de buenas prácticas SOP 1 (Dickson et al. 2007).

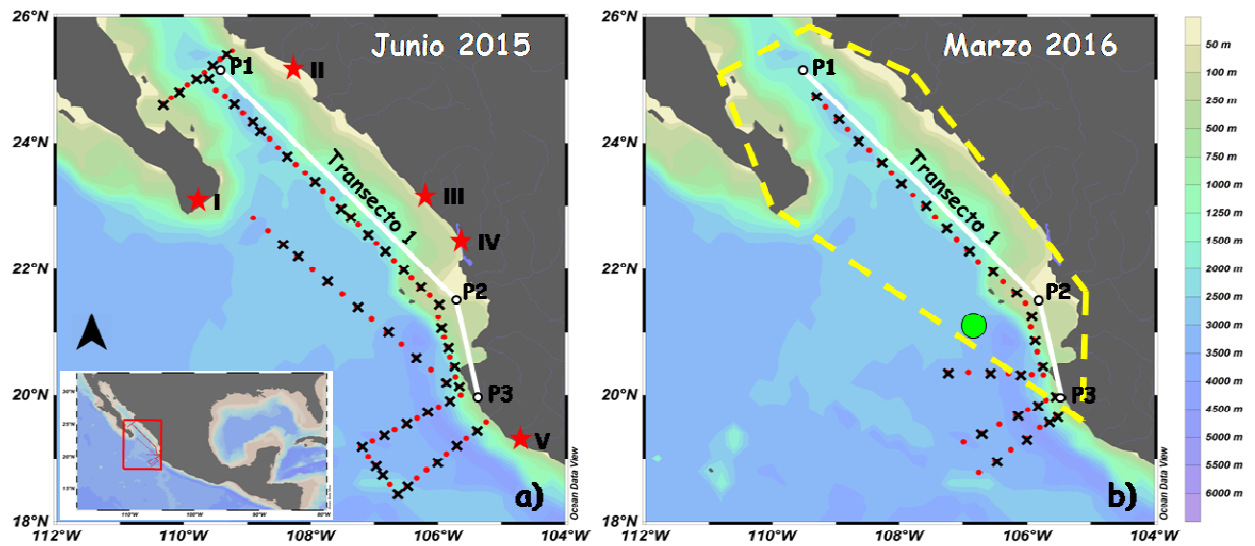


Figura 1. Estaciones del crucero a) Glider-Marias 1506 del 3 al 16 de junio de 2015 y b) Glider-Marias 1603 del 2 al 8 de marzo de 2016. En color se muestra la batimetría, y la línea en blanco el Transecto 1 con puntos de referencia P1, P2 y P3. Las cruces negras representan las estaciones donde se colectaron muestras para mediciones de alcalinidad total, pH y carbono inorgánico disuelto. En todas las estaciones se realizaron perfiles de CTD. Línea punteada amarilla denota el área utilizada para la determinación de anomalías estacionales y anomalía de temperatura superficial del mar, en círculo verde estación virtual de índice de surgencias y en estrellas rojas estaciones meteorológicas (I-V Los Cabos, Angostura, Mazatlán, Escuinapa y Manzanillo; ver discusiones).

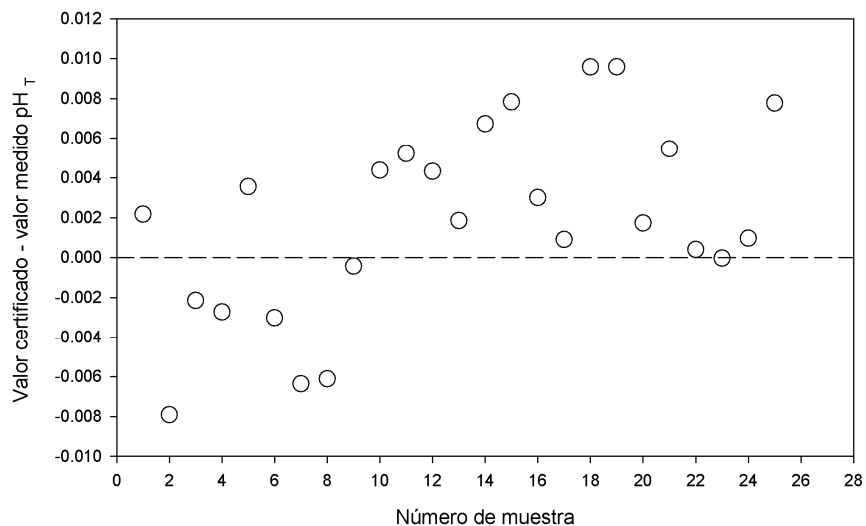
#### *Mediciones de carbono inorgánico disuelto (CID)*

Las mediciones de CID se realizaron en condiciones de laboratorio, utilizando un analizador infrarrojo de gases  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  LI-7000. El analizador está acoplado a un sistema dispensador de muestra semiautomático. La muestra es dosificada con una jeringa kloan, y acidificada con ácido fosfórico al 10%. Debido a esta acidificación, el CID presente en la muestra es llevado a su forma gaseosa. El  $\text{CO}_2$  es posteriormente transportado hacia el analizador infrarrojo utilizando  $\text{N}_2$  y su valor en absorbancia es contabilizado. Para poder convertir los conteos de absorbancia, los valores obtenidos son calibrados con un estándar certificado de CID proporcionado por el laboratorio de Dr. Andrew Dickson de Scripps Institution of Oceanography (Dickson et al. 2003). La precisión alcanzada con esta metodología es de  $\pm 2 \mu\text{mol/kg}$ , con un error en la medición de  $\pm 0.2 \%$ .

#### *Mediciones de $\text{pH}_T$ espectrofotométrico*

Para el presente estudio se estandarizó la medición de  $\text{pH}_T$  espectrofotométrico siguiendo la técnica establecida por Clayton & Byrne (1993). La concentración de protones en escala total es medida utilizando meta cresol púrpura (mCP) 10mM y siguiendo las recomendaciones descritas en el 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 marca Ocean View. La temperatura de las muestras estuvo controlada a  $25^\circ\text{C}$  y para control de calidad se utilizó un estándar de pH Tris generado por el laboratorio de Dr. Andrew Dickson de Scripps Institution of Oceanography. Se aplicó una corrección por absorbancia de impurezas presentes en el mCP (Douglas & Byrne 2017), con un factor de corrección  $_{434A_{\text{imp}}}$  de  $8.527 \times 10^{-3}$  para una concentración final en muestra de mCP de  $1.7 \mu\text{M}$ . La precisión obtenida fue de  $\pm 0.005$  unidades de pH, con una exactitud de  $\pm 0.002$  y un error de medición de  $\pm 0.023\%$  (Figura 2).



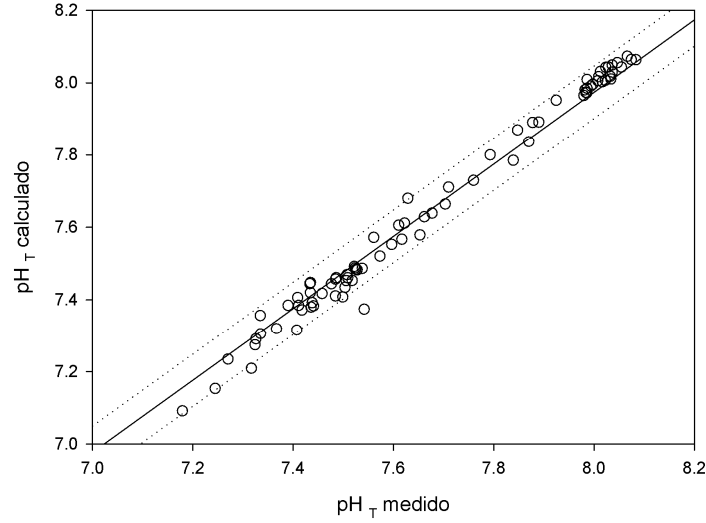


**Figura 2. Diferencia del valor certificado de estándar de pH con respecto al valor medido. Las diferencias están por debajo de  $\pm 0.01$  unidades de pH.**

#### *Mediciones 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 de Dr. Andrew Dickson de Scripps Institution of Oceanography. La exactitud alcanzada con respecto al material de referencia fue de  $\pm 2 \mu\text{mol/kg}$ , con una precisión de mediciones de  $\pm 0.14\%$ . Las titulaciones fueron realizadas en una celda abierta utilizando 60 ml de muestra previamente pesada. El sistema de titulación consiste de 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 adiciones progresivas de 40  $\mu\text{l}$  hasta alcanzar 1 ml de HCl 0.1 M. Posteriormente se realizan adiciones de 15  $\mu\text{l}$  donde el bicarbonato remanente es convertido a ácido carbónico.

Se seleccionaron 6 estaciones de cada crucero para determinar su contenido de AT. Los criterios de selección se basaron en la heterogeneidad de la distribución vertical de los valores de CID y de pH. A partir de las mediciones del par AT y CID se calculó el pH<sub>T</sub> utilizando el programa co2sys\_v2.2.xls (Lewis & Wallace 1998). Se utilizaron las constantes de Lueker et al. (2000), valores promedios de nutrientes obtenidos del World Ocean Atlas 2013 (Boyer et al. 2013) y la concentración de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), considerándola conservativa, se calculó a partir de la salinidad. El objetivo de realizar este cálculo fue contrastar las mediciones espectrofotométricas de pH<sub>T</sub> contra las calculadas a partir del par medido de CID-AT, para contar con una validación adicional a las primeras mediciones realizadas en nuestro laboratorio con el método espectrofotométrico anteriormente descrito (Figura 3). Se obtuvo una regresión lineal con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.9945, y el análisis de correlación correspondiente arrojó que este coeficiente es significativo.



**Figura 3. pH<sub>T</sub> medido contra pH<sub>T</sub> calculado. En línea continua se presenta la regresión lineal y en línea punteada el intervalo de predicción 95% ( $r_p=0.9945$ )**

#### *Normalización de CID superficial por salinidad*

Para poder remover el efecto que tiene la evaporación y la precipitación en los valores medidos de CID, se realizó una normalización por salinidad siguiendo la metodología descrita por Friis et al. (2003). Consiste en realizar un ajuste en función de la salinidad medida, una salinidad de referencia y utilizando un “end-member” diferente a cero de CID cuando la salinidad es igual a cero ( $CID^{S=0}$ ). La ecuación implementada es de la siguiente manera:

$$nCID = \frac{CID_{medido} - CID^{S=0}}{S_{medida}} \cdot S_{referencia} + CID^{S=0}$$

Donde la  $S_{referencia}$  es el promedio de salinidad de los primeros 50 m de profundidad de cada masa de agua de cada muestreo. El valor de  $CID^{S=0}$  se obtuvo a través de una regresión lineal múltiple entre la temperatura, la salinidad y el CID medido de la forma  $nCID = m_T T + m_S S + b_0$ , donde  $b_0$  es  $CID^{S=0}$ . Debido a la contrastante heterogeneidad de salinidad y temperatura que presenta cada particular masa de agua, la construcción de los modelos lineales fue considerando los límites termohalinos de cada una de ellas, y fueron los siguientes. Para junio de 2015:

$$CID^{S=0} = -14.494T + 81.749S - 397.470 \quad (AGC, n = 13, r = 0.643, SE = 67.5)$$

$$CID^{S=0} = -13.474T + 74.615S - 165.609 \quad (ATr, n = 62, r = 0.584, SE = 61.5)$$

$$CID^{S=0} = -17.392T + 86.950S - 473.732 \quad (ATS, n = 34, r = 0.390, SE = 50.9)$$

Y para marzo de 2016:

$$CID^{S=0} = -43.894T - 224.832S + 10827.670 \quad (ATr, n = 40, r = 0.791, SE = 29.6)$$

$$CID^{S=0} = -26.692T + 15.741S + 2132.544 \quad (ATS, n = 33, r = 0.906, SE = 9.8)$$

Entonces los “end-member” utilizados para la normalización de CID superficial fueron, para junio de 2015  $_{AGC}CID^{S=0} = -397.470$ ,  $_{ATr}CID^{S=0} = -165.609$ ,  $_{ATS}CID^{S=0} = -473.732$ , y para marzo de 2016  $_{ATr}CID^{S=0} = 10827.670$  y  $_{ATS}CID^{S=0} = 2132.544$ .

### *Estimación pCO<sub>2</sub> y normalización de pCO<sub>2</sub> superficial por temperatura*

Para las estimaciones de pCO<sub>2</sub> se utilizó el programa CO2sys\_v2.2.xls (Lewis & Wallace 1998) el cuál se basa en las ecuaciones establecidas por Park (1969). Se implementaron las constantes de Lueker et al. (2000), valores promedios de nutrientes obtenidos del World Ocean Atlas 2013 para la región (Boyer et al. 2013) y la concentración de calcio (Ca<sup>2+</sup>), considerándola conservativa, se calculó a partir de la salinidad. Los cálculos de error asociado a la estimación de pCO<sub>2</sub> fueron propagados utilizando el método de los momentos (Orr et al. 2017), con un error de estimación promedio de  $\pm 30 \mu\text{atm}$  para junio de 2015 y  $\pm 20 \mu\text{atm}$  para marzo de 2016.

Con el fin de remover el efecto térmico se realizó una normalización por temperatura del pCO<sub>2</sub> superficial como es descrita en Takahashi et al. (2002). Brevemente, se promedió la temperatura para los primeros 20 metros de profundidad de cada masa de agua (para junio 2015: AGC=25.64 °C, ATr=27.23°C y ATS= 28.94°C; para marzo 2016: ATr=23.84 °C y ATS=26.73°C). La ecuación utilizada para la normalización es la siguiente:

$$NpCO_2 = pCO_{2obs} \cdot e^{[0.0423(T_N - T_{obs})]}$$

Donde NpCO<sub>2</sub> es la pCO<sub>2</sub> normalizada por la temperatura promedio (T<sub>N</sub>) de cada masa de agua para cada periodo, pCO<sub>2obs</sub> es el valor estimado a partir del par pH<sub>T</sub> y CID medido en laboratorio, T<sub>obs</sub> es la temperatura *in situ* para cada muestra y el coeficiente de 0.0423 fue determinado experimentalmente por Takahashi et al. (1993) en función de  $\partial \ln pCO_2 / \partial T$ .

### *Cálculo de Flujo de CO<sub>2</sub>*

El cálculo de los flujos de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) fue realizado implementando la fórmula  $F = k \cdot K_0(pCO_{2w} - pCO_{2a})$ , donde k es la velocidad de transferencia de gases dada en cm/h, K<sub>0</sub> es la constante de solubilidad de CO<sub>2</sub> en agua de mar en mol/kg atm y estimada a partir de la salinidad y la temperatura *in situ* (Weiss 1974), pCO<sub>2w</sub> es la presión parcial de CO<sub>2</sub> en el agua calculada como es explicado en el apartado anterior, y pCO<sub>2a</sub> es el promedio mensual global de la presión parcial de CO<sub>2</sub> atmosférica reportada para cada período (399.78 ppm para junio de 2015, 403.58 ppm para marzo de 2016; <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>).

Para poder estimar la velocidad de transferencia de gases, k es parametrizada en función de la velocidad del viento siguiendo la ecuación original propuesta por Wanninkhof (1992) y actualizada en Wanninkhof (2014). No es la única forma de estimar la velocidad de transferencia de gases, sin embargo es la aproximación que ha tenido mayor aceptación dentro de la academia. La ecuación es de la forma  $k = 0.251 < U^2 > (Sc/660)^{-0.5}$ , donde  $< U^2 >$  es la velocidad del viento al cuadrado y Sc es el número de Schmidt. Sc es definido como la viscosidad cinemática del agua dividido por el coeficiente de difusión del gas. Es determinado con un polinomio del tercer orden donde los coeficientes de difusión son específicos para cada gas (en este caso CO<sub>2</sub>) y es dependiente de la temperatura. Esta parametrización tiene una incertidumbre del 20%.

Para la obtención de los datos de velocidad de viento se extrajeron de la base de datos distribuida por el programa europeo Copernicus (<http://marine.copernicus.eu/>), el cuál presenta un producto desarrollado por el IFREMER de tres escaterómetros con una resolución espacial de 0.25° y temporal de 6 horas. Se realizó una selección de los datos en función de la mayor proximidad a la localización de las estaciones de los cruceros, y el tiempo en el cuál fue realizada la colecta de muestras.

Valores positivos de FCO<sub>2</sub> denotan un aporte de CO<sub>2</sub> del océano hacia la atmósfera, mientras que valores negativos un flujo contrario, de la atmósfera hacia el océano. Como contamos con un error de estimación de la pCO<sub>2</sub> de  $\pm 20 \mu\text{atm}$ , el error asociado con las estimaciones de FCO<sub>2</sub> es de  $\pm 0.9 \text{ mmol C m}^{-2}\text{d}^{-1}$  para velocidades de viento bajas ( $< 2.5 \text{ m/s}$ ) y de  $\pm 3.6 \text{ mmol C m}^{-2}\text{d}^{-1}$  para velocidades de viento altas (6-8 m/s).

### *Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) y Salinidad Absoluta ( $S_A$ )*

La ecuación internacional del estado de agua de mar (TEOS-10) permite evaluar de manera consistente todas las propiedades termodinámicas del agua pura, hielo, agua de mar y aire húmedo. A su vez se contabiliza las variaciones de la composición del agua de mar alrededor del mundo; esta variación espacial en su composición causa diferencias de densidad que son equivalentes a diez veces la precisión de las mediciones de salinidad práctica ( $S_p$ ) realizadas en el mar (McDougall & Barker 2017). La salinidad absoluta ( $S_A$ ) y la temperatura conservativa ( $\Theta$ ) están comprendidas dentro de este nuevo sistema de ecuaciones, y deben de ser utilizadas en la literatura científica sustituyendo el uso de temperatura potencial y salinidad práctica (IOC et al. 2010). La  $S_A$  posee unidades de gramos por kilogramo, y tiene un efecto no trivial en los gradientes horizontales de densidad, afectando todas las variables derivadas a partir de esta. Por otra parte la temperatura conservativa  $\Theta$  representa con mayor precisión el contenido de calor por unidad de masa de agua de mar.

## RESULTADOS

Los resultados presentados en este apartado serán divididos en dos secciones. Primero describiremos la oceanografía física imperante para cada crucero, señalando la localización y extensión de las diferentes masas de agua, así como la distribución superficial y vertical de la temperatura y salinidad. En la segunda sección presentaremos observaciones sobre variables químicas del sistema de carbono, con especial enfoque en la distribución de clinas en los primeros 200 metros de profundidad, y los cálculos de flujos de CO<sub>2</sub> obtenidos para cada período. Por último destacar que la paleta de colores utilizada en este trabajo corresponde a las recomendaciones gráficas presentadas en Thyng et al. (2016) para una mejor representación de datos oceanográficos.

### *Masas de agua*

Para la identificación de las masas de agua presentes en los diferentes períodos muestreados se utilizan los criterios definidos por Portela et al. (2016), presentado en la Tabla 1. El ATr es el resultado de la mezcla de la interacción de las masas de agua presentadas en esta tabla (Figura 4). El Agua Intermedia del Pacífico se encuentra a profundidades mayores de los 400 metros, por lo que no forma parte del presente análisis. Los cálculos de temperatura conservativa y salinidad absoluta se realizaron utilizando las ecuaciones de estado TEOS 10 (IOC et al. 2010) incluidas en la paquetería de Ocean Data View V4.7.8 (<http://odv.awi.de>). Los cálculos de la profundidad de capa de mezcla se realizaron siguiendo la metodología descrita por Kara et al. (2000), determinando la variación de densidad ( $\Delta\sigma_t$ ) a partir de un criterio  $\Delta\Theta$  de 0.2 °C en la ecuación de estado.

**Tabla 1. Límites de masas de agua en el Pacífico Tropical frente a México. Tomado y modificado a partir de Portela et al. (2016).**

|                                    | $\Theta$ (°C) | $S_A$ (g kg <sup>-1</sup> ) | Profundidad<br>(m) | Capa de mezcla (m) |         |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|---------|
|                                    |               |                             |                    | Invierno           | Verano  |
| Agua de la Corriente de California | 10-21         | <34.6                       | 0-150              | 45 ± 7             | 18 ± 8  |
| Agua Tropical Superficial          | >25.1         | <34.6                       | 0-50               | 32 ± 14            | 24 ± 10 |
| Agua del Golfo de California       | >12           | >35.1                       | 0-150              | 23 ± 7             | 15 ± 4  |
| Agua Subsuperficial Subtropical    | 9-18          | 34.6-35.1                   | 75-400             | -                  | -       |
| Agua Intermedia del Pacífico       | 4-9           | 34.6-34.9                   | 400-1000           | -                  | -       |

### *Muestreo de Junio 2015*

Para los primeros 400 metros de profundidad se detectaron cinco masas de agua. El ATS se observó en la región sur frente a Cabo Corrientes, entre los 18 y 21.5°N (colores azules Figura 4). La columna de agua presentó una fuerte estratificación térmica en esta zona. En contraparte, el AGC se observó confinada dentro de la boca del golfo y por arriba de los 24 °N, entre la superficie y los 180 m (Tabla 2). También, cercana a la punta de la península (23.5 °N) se detectó la presencia del ACC en cinco estaciones oceánicas, entre los 34 a 53 metros de profundidad. Debido a la planificación previa del crucero, no se colectaron muestras para esta masa de agua y su contenido de CID, pH y AT no pudo ser caracterizado. La columna de agua no es muy estable en esta región, los perfiles exhiben cambios abruptos de densidad potencial en pocos metros. Este patrón está típicamente asociado a la presencia de remolinos que modifican y perturbar la estructura vertical del océano. La presencia del ATr se detectó aproximadamente en latitudes mayores de los 22 °N, donde el ATS pierde su influencia superficial, y en

la porción norte hasta los 25.5 °N dentro del Golfo de California. Hacia el interior del océano, el ASsSt estuvo presente a lo largo de todas las latitudes entre los 45 a los 520 metros de profundidad (Figura 4, Tabla 2).

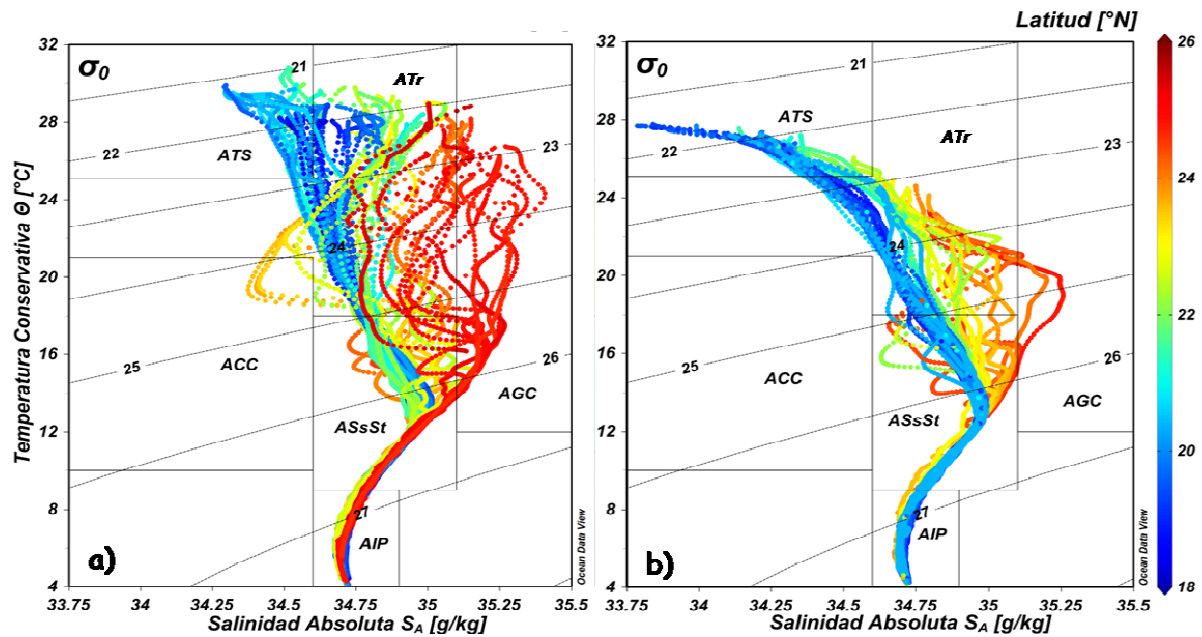


Figura 4. Diagrama Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) y Salinidad Absoluta ( $S_A$ ). En colores la latitud en grados Norte. a) junio de 2015 y b) marzo de 2016. Los acrónimos utilizados son Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Transicional (ATr), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua del Golfo de California (AGC), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) y Agua Intermedia del Pacífico (AIP). Límites tomados a partir de Portela et al., (2016).

Tabla 2. Características físicas de las masas de agua en el Pacífico Tropical frente a México. Se presenta la salinidad y temperatura promedio para cada masa de agua. Los acrónimos utilizados son Agua del Golfo de California (AGC), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua Transicional (ATr), Agua Tropical Superficial (ATS) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt). nr= no registrada. \*Porcentaje del total de datos registrados con el CTD.

| Masa de Agua | Muestreo | Límite superior (m) | Límite inferior (m) | Cobertura* (%) | Salinidad Absoluta Promedio (g/kg) | Temperatura Conservativa Promedio (°C) |
|--------------|----------|---------------------|---------------------|----------------|------------------------------------|----------------------------------------|
| AGC          | Jun-15   | 1                   | 176                 | 5              | 35.18 ± 0.05                       | 18.09 ± 4.17                           |
|              | Mar-16   | 42                  | 112                 | 1              | 35.17 ± 0.05                       | 19.02 ± 1.52                           |
| ACC          | Jun-15   | 34                  | 53                  | >1             | 34.46 ± 0.07                       | 19.77 ± 0.73                           |
|              | Mar-16   | nr                  | nr                  | nr             | nr                                 | nr                                     |
| ATr          | Jun-15   | 1                   | 115                 | 12             | 34.78 ± 0.13                       | 23.73 ± 3.56                           |
|              | Mar-16   | 1                   | 100                 | 14             | 34.73 ± 0.12                       | 21.79 ± 1.75                           |
| ATS          | Jun-15   | 1                   | 74                  | 4              | 34.48 ± 0.09                       | 28.35 ± 1.19                           |
|              | Mar-16   | 1                   | 44                  | 6              | 34.27 ± 0.15                       | 26.44 ± 0.66                           |
| ASsSt        | Jun-15   | 45                  | 520                 | 79             | 34.09 ± 0.07                       | 11.92 ± 1.94                           |
|              | Mar-16   | 51                  | 448                 | 79             | 34.9 ± 0.07                        | 12.05 ± 2.05                           |

#### Muestreo de Marzo 2016

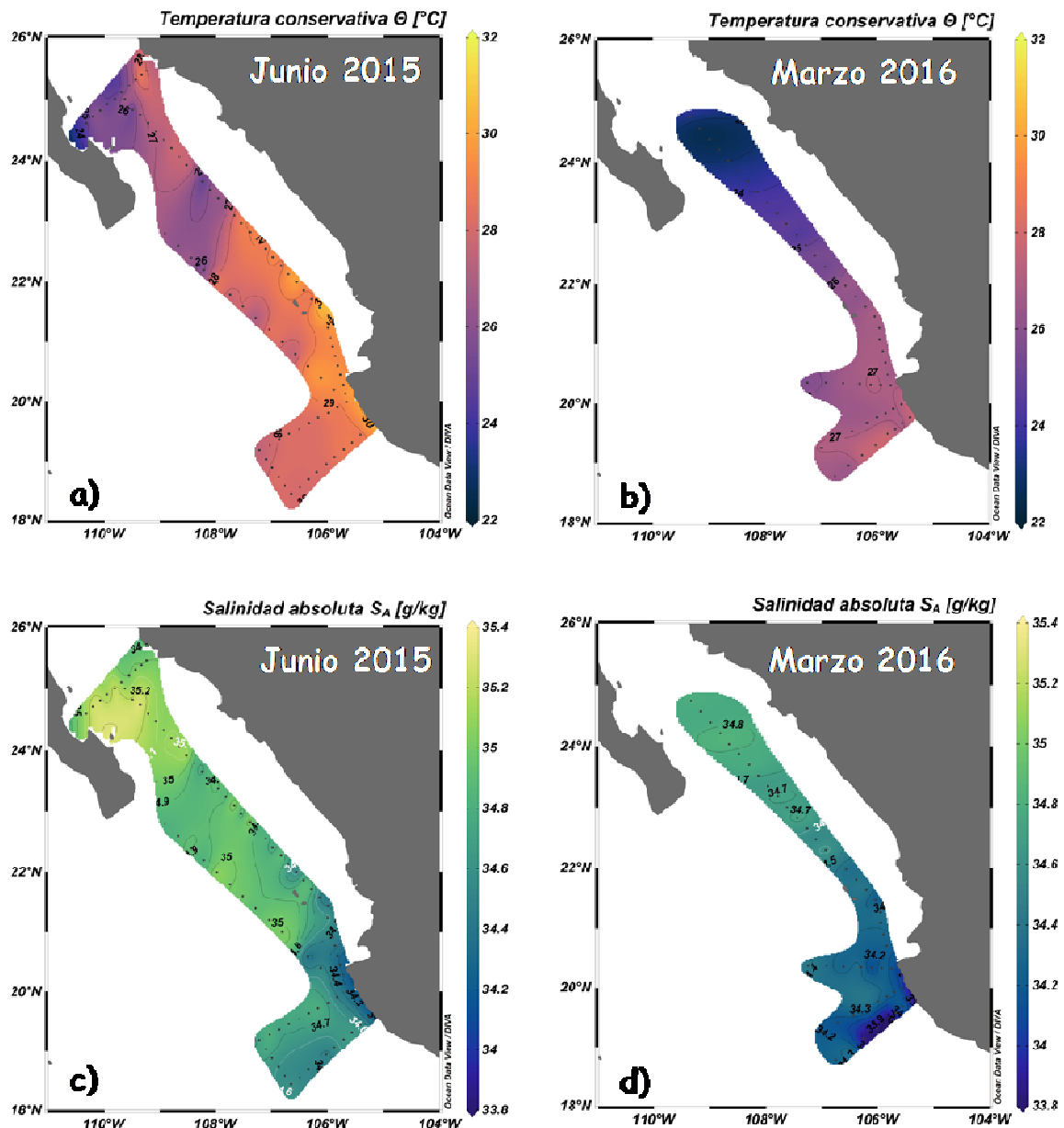
El crucero de marzo de 2016 contó con menos estaciones muestreadas (48 contra 83 en el año anterior), destacando la ausencia de un transecto longitudinal dentro del Golfo de California, y otra sección norte-sur más oceánica. Sin embargo, se cuenta aproximadamente con la misma cobertura latitudinal que en el año anterior (Figura 1). El AGC tuvo menor presencia y solo se registró en cuatro estaciones norteñas, entre los 24 a los 26 °N y a profundidades entre los 40 a los 110 metros. El ATS se registró de los 18 a los 22 °N, con una

relativamente mayor cobertura espacial que durante junio de 2015, pero con un límite inferior 30 metros más somero (Tabla 2). A su vez el ATS presentó valores promedios de salinidad y temperatura menores que en el crucero anterior. El ASsSt nuevamente estuvo presente por debajo de las aguas superficiales a lo largo de todas las latitudes de la zona de estudio (Figura 4). Los límites superiores e inferiores, como también el porcentaje de cobertura del ASsSt fueron muy similares a los que se registraron durante junio de 2015. No se registró para este periodo ACC.

#### *Distribución de temperatura y salinidad*

La distribución espacial de temperatura y salinidad a 10 metros de profundidad, presentó escenarios diferentes entre las dos temporadas. En términos generales, junio de 2015 exhibió temperaturas mayores que marzo de 2016. El contraste de temperaturas entre la región norte y la región sur de la zona de estudio también fue mayor durante junio de 2015 (Figura 5.a). Valores por encima de 28 °C se observaron en las estaciones al sur de los 22 °N. El gradiente térmico se intensifica en esta latitud descendiendo a los 26 °C, y es allí donde detectamos la intrusión subsuperficial de ACC aproximadamente a 40 metros de profundidad (Figura 4; Tabla 2). Hacia dentro del Golfo de California se presentó otro contraste notable, donde observamos temperaturas mayores del lado continental (~28 °C), y aguas más frías de la parte central y del lado peninsular (<26°C). Para marzo de 2016 el gradiente latitudinal de la temperatura fue menor, con un cambio paulatino de aproximadamente 1°C por grado de latitud, a partir de 27°C en la porción sur hasta 22 °C hacia el interior del Golfo de California (Figura 5.b).

La salinidad es un importante trazador de la circulación en esta región (Portela et al. 2016). En la Figura 5.c y d se puede apreciar en contornos blancos los límites halinos del ATS (<34.6 g/kg) y del AGC (>35.1 g/kg). En la Figura 5.c se observa que el ATS se presentó en junio de 2015 al sur de los 22 ° N, y principalmente confinada a la porción costera sobre la plataforma y el talud continental. También se detectó en la parte oceánica del transecto más sureño. A su vez, en la porción norte, la salida del AGC se registró confinada sólo hasta la punta de la Baja California. En contraparte, para marzo de 2016 la incursión del ATS se registró hasta los 23 °N y dominando las estaciones al sur de esta latitud. No se registró la presencia de AGC a estas profundidades.



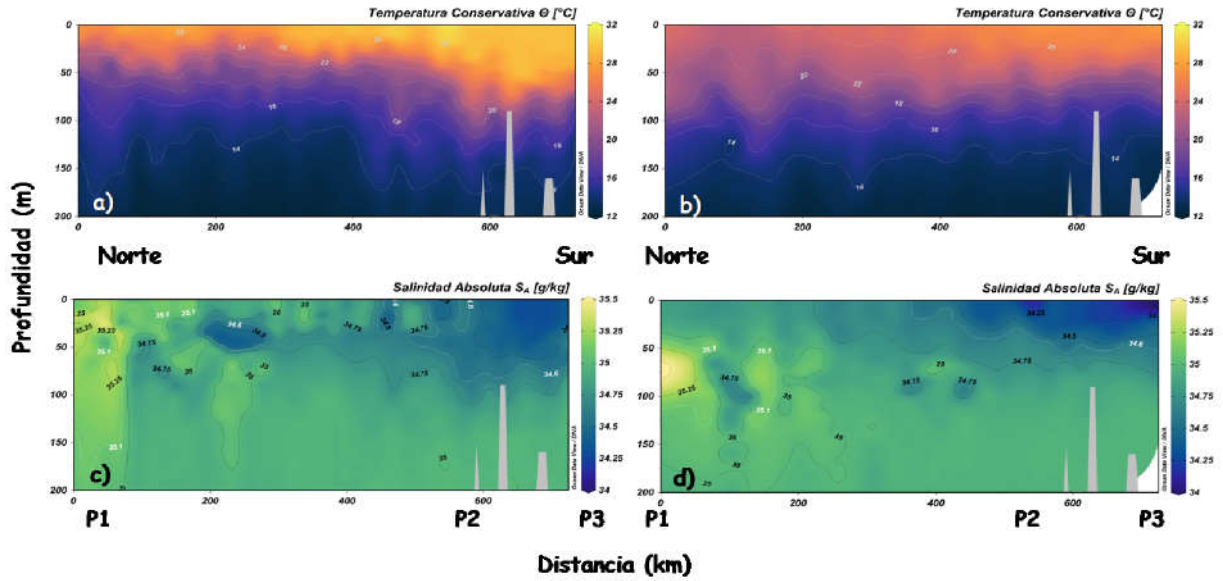
**Figura 5.** Distribución espacial de Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) en *a*) y *b*), y Salinidad Absoluta ( $S_A$ ) en *c*) y *d*), a 10 metros de profundidad. En contorno blanco los límites halinos del Agua del Golfo de California ( $>35.1$  g/kg) y Agua Tropical Superficial ( $<34.6$  g/kg).

#### *Análisis de Transecto 1*

En la Figura 6 se presentan los perfiles de temperatura conservativa ( $\Theta$ ) y salinidad absoluta ( $S_A$ ) a lo largo del transecto 1 (Figura 1). En junio de 2015 (Figura 6.a) la temperatura fue mayor que en marzo de 2016 (Figura 6.b) para los primeros 50 metros, y de manera notable en la porción sur donde encontramos incursión de ATS. La termoclina también se observa más intensa para junio de 2015. Se destaca el hundimiento de la isoterma de  $18^\circ\text{C}$  desde los 50 m en la boca del Golfo de California, profundizándose hacia el sur por debajo del ATS hasta los 100 metros. Los límites halinos de las masas de agua también son claros en estos transectos (Figura 6.c y d). El ATS incursiona hacia el norte como una capa superficial de baja salinidad ( $<34.6$  g/kg) con mayor profundidad durante junio de 2015 (Figura 6.c), y más somera pero menos salina durante marzo de 2016. En junio de 2015 también podemos apreciar la salida del AGC ( $>35.1$  g/kg) dominando por encima de los 150 m de profundidad



y extendiéndose 50 km hacia fuera del Golfo de California. A su vez se observa la intrusión aproximadamente a 40 m de profundidad de ACC (<34.6 g/kg) generando inestabilidad y mezcla en torno a ella. Durante marzo de 2016 se detectó la intrusión de AGC entre los 50 a 150 metros de profundidad cercano a la boca del Golfo de California.



**Figura 6.**Perfiles verticales de Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) y Salinidad Absoluta ( $S_A$ ) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 (a y b) y marzo de 2016 (c y d). Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1.

#### *Caracterización y distribución química (CID, OD, $pH_T$ y $pCO_2$ )*

Se colectaron un total de 253 muestras en junio de 2015 y 150 en marzo de 2016. Los valores promedio de OD, CID,  $pH_T$  y  $pCO_2$  para cada masa de agua se resumen en la Tabla 3. En términos generales para la primavera tardía de 2015 se encontraron mayores concentraciones de CID, valores de  $pH_T$  más bajos y valores de  $pCO_2$  más elevados con respecto al invierno de 2016 en todas las masas de agua muestreadas. Los valores de OD promedio no presentaron diferencias aparentes en el ASsSt, ATS y AIP entre los dos períodos. La diferencia observada en OD para el ATr se debe a que el muestreo de esta masa de agua abarcó mayores profundidades durante junio de 2015, mientras que las diferencias en el AGC se deben probablemente a la diferencia de número de muestras obtenido durante cada crucero. Un rasgo a destacar es la similitud en el promedio de  $pCO_2$  entre el ATr y el ASsSt durante la primavera de 2015. Esta similitud no se observa para el siguiente año. El mismo patrón se aprecia, aunque no tan marcadamente, con el  $pH_T$ .

Tabla 3. Características químicas de las masas de agua en el PTCM. Se presenta el CID, pH<sub>T</sub>, pCO<sub>2</sub> y OD promedio para cada masa de agua. Los acrónimos utilizados son Agua del Golfo de California (AGC), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua Transicional (ATr), Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) y Agua Intermedia del Pacífico. nr= no registrada.

| Masa de Agua | Muestreo | CID (μmol/kg) | pH <sub>T</sub> | pCO <sub>2</sub> (μatm) | Número de muestras | OD (μmol/kg) |
|--------------|----------|---------------|-----------------|-------------------------|--------------------|--------------|
| AGC          | jun-15   | 2199 ± 118    | 7.696 ± 0.219   | 1159 ± 708              | 22                 | 107 ± 61     |
|              | mar-16   | 2108 ± 30     | 7.967 ± 0.041   | 501 ± 54                | 4                  | 135 ± 56     |
| ACC          | jun-15   | nr            | nr              | nr                      | nr                 | 178 ± 21     |
|              | mar-16   | nr            | nr              | nr                      | nr                 | nr           |
| ATr          | jun-15   | 2115 ± 78     | 7.786 ± 0.155   | 855 ± 368               | 88                 | 144 ± 69     |
|              | mar-16   | 2089 ± 77     | 7.888 ± 0.147   | 648 ± 265               | 68                 | 130 ± 69     |
| ATS          | jun-15   | 2016 ± 60     | 7.887 ± 0.12    | 635 ± 248               | 35                 | 196 ± 13     |
|              | mar-16   | 1971 ± 48     | 8.01 ± 0.087    | 448 ± 185               | 35                 | 198 ± 8      |
| ASsSt        | jun-15   | 2269 ± 42     | 7.551 ± 0.099   | 1432 ± 404              | 108                | 5 ± 10       |
|              | mar-16   | 2232 ± 24     | 7.674 ± 0.053   | 1043 ± 115              | 35                 | 5 ± 9        |
| AIP          | jun-15   | nr            | nr              | nr                      | nr                 | 3 ± 2        |
|              | mar-16   | 2320 ± 24     | 7.66 ± 0.045    | 975 ± 113               | 8                  | 3 ± 2        |

*Carbón inorgánico disuelto (CID)*

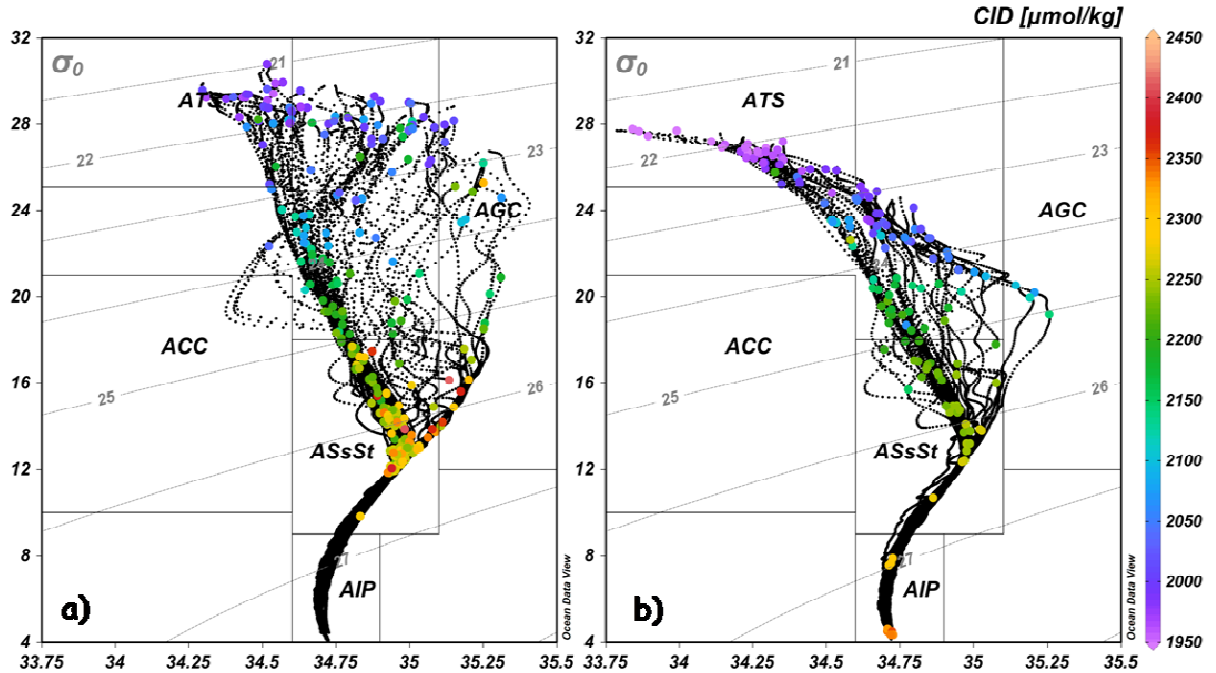
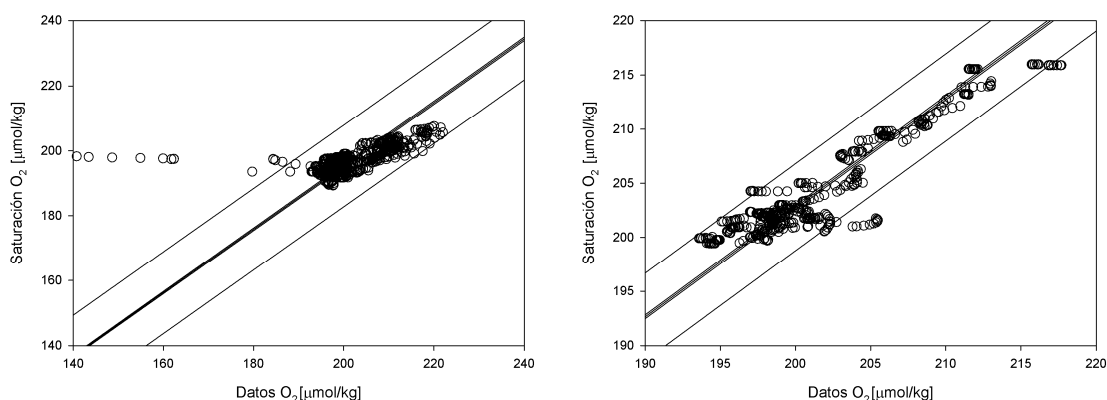


Figura 7. Diagrama Temperatura Conservativa (Θ) y Salinidad Absoluta (SA). En colores el contenido de carbón inorgánico disuelto (CID) en μmol/kg. a) junio de 2015 y b) marzo de 2016. Los acrónimos utilizados son Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Transicional (ATr), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua del Golfo de California (AGC), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) y Agua Intermedia del Pacífico (AIP). Límites tomados a partir de Portela et al., (2016).

En la Figura 7 se observan los contenidos de CID de cada muestra, y su correspondencia con cada masa de agua. La principal característica es que junio de 2015 mostró una mayor variación de CID, con irrupciones superficiales de valores con mayor concentración que durante marzo de 2016. En contraparte marzo de 2016 fue menos variable y se observó un gradiente típico de concentración de CID hacia el interior del océano. El contenido de CID en el ATS fue mayormente homogéneo para marzo de 2016, con valores típicamente por debajo de 2000  $\mu\text{mol/kg}$ . El ATr presentó concentraciones superficiales (entre la isopícnica de 23 y 24) similares en todos los perfiles. Esta última incrementa su concentración hasta 2200  $\mu\text{mol/kg}$  en su cercanía con el ASsSt. Para junio de 2015 el ATS presentó valores en el mismo rango que el 2016, pero con una mayor variabilidad superficial. Lo mismo ocurre en este período para el ATr, donde se aprecian valores superficiales de hasta 2200  $\mu\text{mol/kg}$ . El AGC presentó la mayor variabilidad, tanto en su porción superficial con valores puntuales de 2200 y 2300  $\mu\text{mol/kg}$ , como el contraste con su porción profunda donde alcanza concentraciones similares a los máximos encontrados en el ASsSt ( $\sim 2400$   $\mu\text{mol/kg}$ ).

#### *Oxígeno Disuelto.*

El electrodo de oxígeno del CTD no fue comparado con determinaciones químicas de oxígeno durante los cruceros. Por lo tanto comparamos la concentración de oxígeno ( $[\text{O}_2]$ ,  $\mu\text{mol/kg}$ ) obtenida para valores superficiales ( $< 10$  metros) contra la  $[\text{O}_2]$  calculada asumiendo su saturación en función de la temperatura y salinidad (Grasshoff et al. 1999). Se observa una buena correlación para ambos cruceros con un factor de correlación de Pearson de 0.821 para junio de 2015 y 0.937 para marzo de 2016 (Figura 8). Para junio de 2016 una fracción de los datos se desvía del ajuste lineal y no son considerados dentro de la correlación. Estos corresponden al perfil de la estación B09, donde se registra un afloramiento de aguas con concentración por debajo de condiciones óxicas (160-140  $\mu\text{mol/kg}$ ) en la parte superficial (Figura 9). Lo mismo ocurre para la estación B01, sobre el margen este del Golfo de California, arriba de la plataforma continental frente a Sinaloa.



**Figura 8. Concentración de oxígeno medido contra oxígeno saturado calculado. Margen izquierda crucero Marias 0615 y margen derecha Marias 0316.**

No existe un consenso acerca de los límites de las ZMO (A. F. Hofmann et al. 2011), sin embargo con el objetivo de comprender su distribución, características y relevancia biogeoquímica es importante definir fronteras de referencias en función de su concentración de OD. Estos horizontes han sido establecidos desde diferentes aproximaciones biológicas y químicas, y se les han atribuido diferentes términos (A. F. Hofmann et al. 2011). En el presente trabajo seguimos los límites establecidos por Paulmier et al. (2011) para niveles óxicos ( $> 200$   $\mu\text{mol/kg}$ ) y Sánchez-Velasco et al. (2017) para niveles hipóxicos ( $< 44$   $\mu\text{mol/kg}$ ) y subóxicos ( $< 4.4$   $\mu\text{mol/kg}$ ). Bajo condiciones hipóxicas las especies epipelágicas pueden estar sujetas a condiciones de estrés, mientras que para condiciones subóxicas pueden ocasionar la muerte a especies epipelágicas y mesopelágicas.

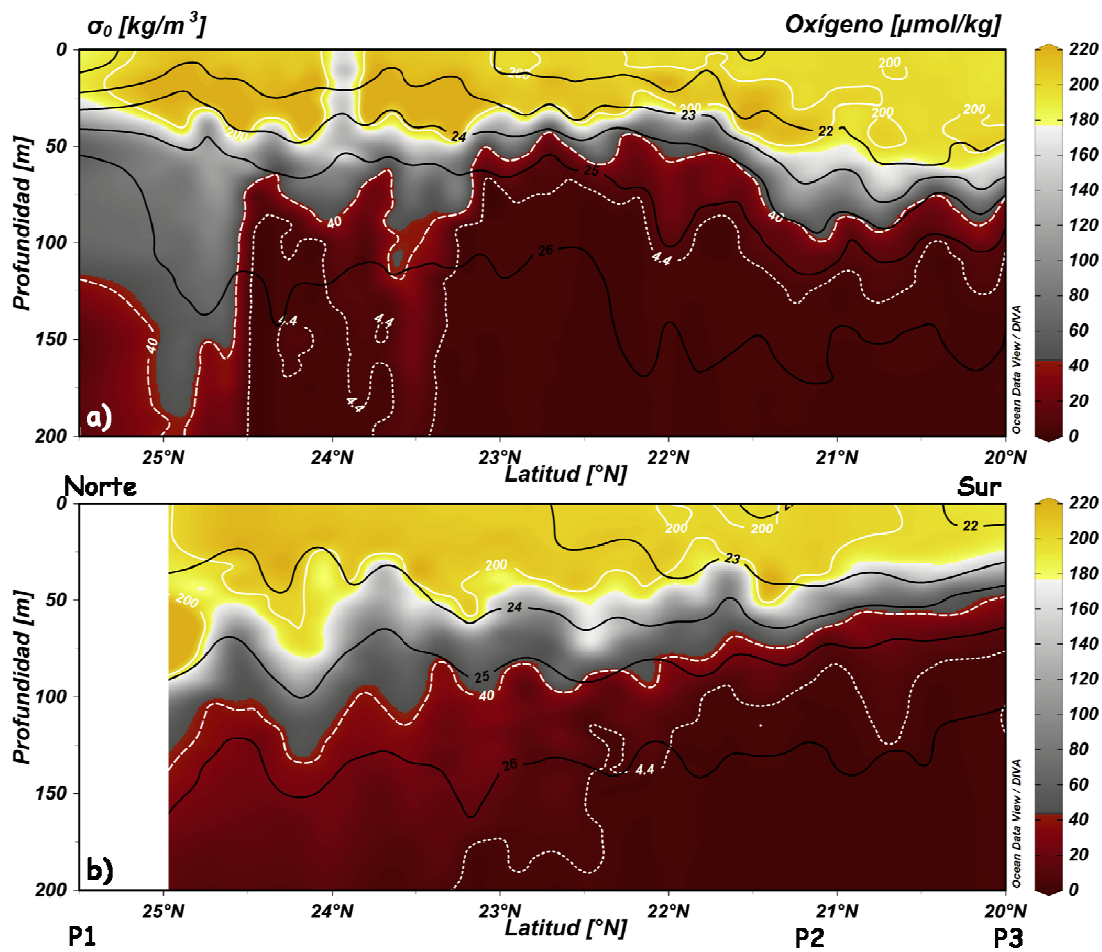
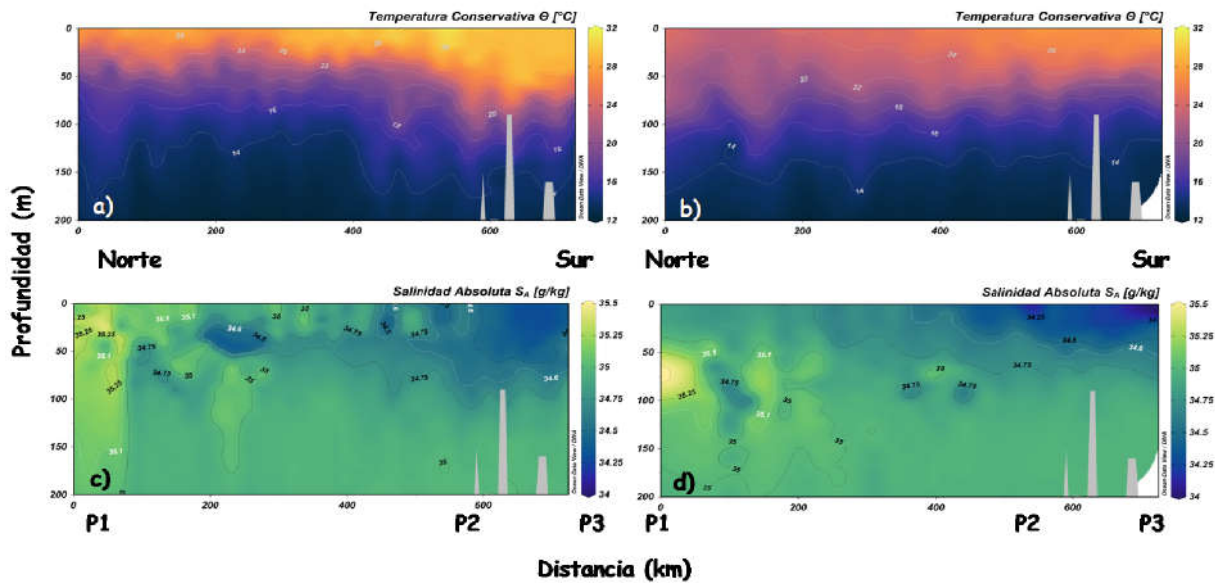


Figura 9. Perfiles verticales de oxígeno disuelto (OD,  $\mu\text{mol/kg}$ ) y anomalía de densidad potencial ( $\sigma_0$ ;  $\text{kg/m}^3$ ) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 (a) y marzo de 2016 (b). En contorno blanco se muestra los horizontes óxicos ( $> 200 \mu\text{mol/kg}$ ), hipóxicos ( $< 44 \mu\text{mol/kg}$ ) y subóxicos ( $< 4.4 \mu\text{mol/kg}$ ). Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1

En junio de 2015, en los primeros 50 km del transecto 1 hay un ensanchamiento de la capa hipóxica desde los 50 metros hasta por debajo de los 175 metros de profundidad (Figura 9.a). Esto parece estar asociado a la salida del AGC ( $> 35.1 \text{ g/kg}$ ,

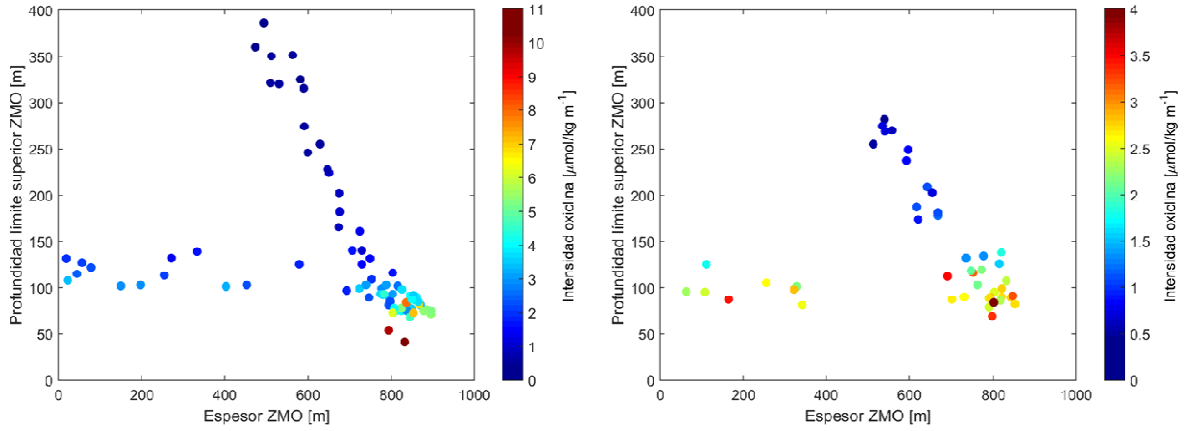


.c), la cual pierde rápidamente su influencia en pocos kilómetros al sur de la boca del Golfo de California. Contiguo a este frente, se observan dos estructuras relevantes. Un hundimiento de 100 metros del horizonte subóxico, hasta los 200 metros de profundidad, y una intrusión en toda la capa superficial de aguas de 50 metros de profundidad con concentraciones de oxígeno entre 140-160  $\mu\text{mol/kg}$ . Para el resto de la capa superficial ( $> 75$  m) dominan aguas con condiciones óxicas, exceptuando en la porción sur en torno a las Islas Marías, donde se detecta el avance del ATS ( $< 34.6$  g/kg, Figura 6.c y  $> 25.1^\circ\text{C}$ , Figura 6.a). El horizonte de la parte superior de la ZMO está definido por Cepeda-Morales et al. (2013) a una concentración de 9  $\mu\text{mol/L}$  y, pese a que no se muestra en la Figura 9, la isolínea de 4.4  $\mu\text{mol/kg}$  sigue prácticamente la misma distribución, y es esta la que será utilizada como el límite superior e inferior de la ZMO a lo largo de este trabajo. La parte superior de la ZMO tiende a volverse más somera en la parte central del transecto ( $\sim 70$  metros), profundizándose gradualmente hacia el sur, por debajo del ATS. En cuanto a la profundidad de la oxiclina, esta fue definida como se encuentra descrita en Maske et al. (2010), tomando la profundidad de máxima diferencia de OD calculada en un rango de 4 metros.

En contraparte, marzo de 2016 exhibió un panorama acorde a la climatología invernal (Cepeda-Morales et al. 2013). Un gradiente latitudinal, donde la ZMO se profundiza desde su porción más somera en torno a de Cabo Corrientes ( $\sim 60$  m), hasta alcanzar aproximadamente 300 metros frente a la boca del Golfo de California.

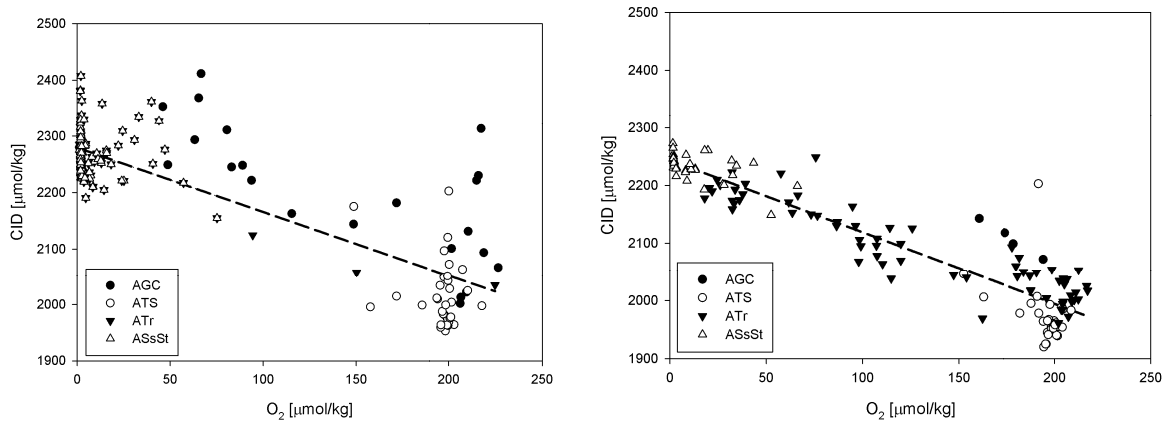
La profundidad del límite superior de la ZMO mostró una relación inversa con el espesor de la ZMO, esto es que la ZMO fue más somera en las estaciones donde se observó una mayor amplitud vertical del espesor de la ZMO (Figura 10). Hay una fracción de estaciones que no presentan buena correlación, debido principalmente a que se encuentran sobre la plataforma continental entre las Islas Marías y Cabo Corrientes (profundidades  $< 600$  m). Sin embargo, para junio de 2015 el límite superior de la ZMO estuvo por debajo de los 100 metros en todas ellas. Esto se atribuye a que en esta región se observa la mayor estratificación de toda el área de estudio ( $> 1200 \text{ Jm}^3$ ; Figura 25.c). Esta disminución de la profundidad y expansión concomitante de la ZMO puede estar atribuida a dos procesos principalmente: a la disminución propia de la profundidad de la ZMO debido a mezcla de masas de agua, o a una intensificación en los procesos de respiración que llevan a un consumo de OD en la parte superior de la ZMO. Para poder comprender que procesos están regulando estas características de la ZMO se calculó la intensidad de la oxiclina. Esto lo entendemos como la tasa de respiración a la que está siendo consumido el OD por cada metro de profundidad a lo largo de la oxiclina. A mayores valores, mayor consumo por metro de profundidad. Paulmier et al. (2011) definen como muy intensos a consumos mayores a 1  $\mu\text{mol/kg}$

$\text{m}^{-1}$ . De la Figura 10 podemos destacar que la intensidad de la oxiclina parece estar dominando el espesor de la ZMO a través de la disminución de su profundidad debido a fuertes procesos de consumo de OD.



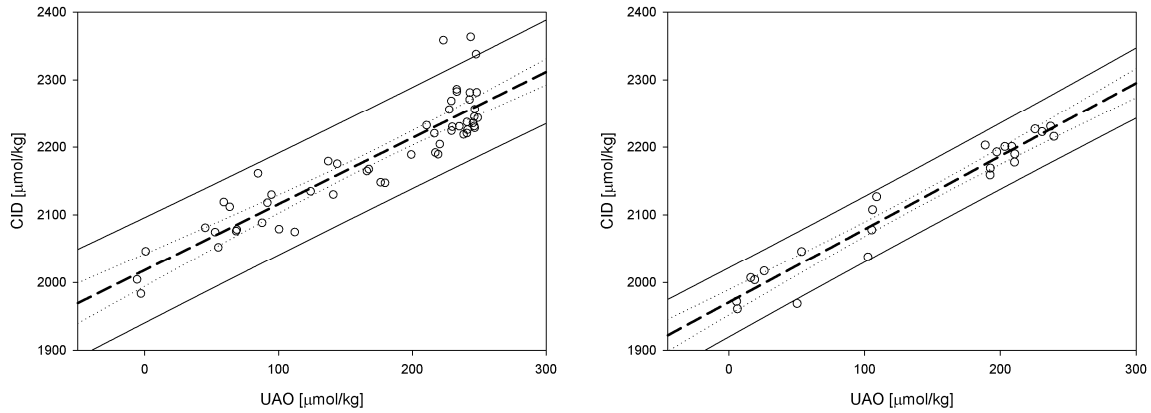
**Figura 10. Espesor de la zona mínima de oxígeno (ZMO) contra la profundidad del límite superior de la ZMO. En color la intensidad de la oxiclina ( $\mu\text{mol/kg m}^{-1}$ ). Margen izquierda cruce Marias 0615 y margen derecha Marias 0316. Notar la diferencia de escala en la intensidad de la oxiclina.**

Pese a que se aprecia una dispersión entre el OD y CID, estos mostraron una correlación alta ( $r_p=0.687$ ,  $p<0.001$  para junio 2015,  $r_p=0.867$   $p<0.001$  para marzo 2016; Figura 11) mostrando una tendencia clara a una disminución en la concentración de OD para un aumento en los valores de CID. La dispersión de los datos se acentúa notoriamente para datos con concentraciones de OD por encima de  $200 \mu\text{mol/kg}$  (valores superficiales; Figura 9) y por debajo de  $40 \mu\text{mol/kg}$  (concentraciones hipóxicas próximas a la ZMO; Figura 9). Esta dispersión de los datos fue mayor durante junio de 2015, principalmente a la inestabilidad de la columna de agua observada a lo largo de este período (Figura 7.a). El ATS se caracterizó principalmente por estar bien oxigenada ( $\sim 200 \mu\text{mol/kg}$ ), con una mayor dispersión y contenido de CID durante junio de 2015 ( $2016 \pm 60 \mu\text{mol/kg}$ ) que durante marzo de 2016 ( $1971 \pm 48 \mu\text{mol/kg}$ ; Tabla 3). Lo mismo se observa para el ASsSt, con valores de OD por debajo de  $50 \mu\text{mol/kg}$ , y una mayor variabilidad durante la primavera tardía de 2015 que durante el invierno de 2016. Para esta última masa de agua, los valores por encima de los  $2300 \mu\text{mol/kg}$  de CID se observaron en las estaciones oceánicas y hacia el interior del Golfo de California, las cuales no fueron muestreadas durante marzo de 2016.



**Figura 11. Oxígeno disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ) contra carbono inorgánico disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ). Los acrónimos utilizados son Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Transicional (ATr), Agua de la Corriente de California (ACC), Agua del Golfo de California (AGC) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) Margen izquierda cruce Marias 0615 y margen derecha Marias 0316**

Debido a la alta variabilidad de los datos descrita en el párrafo anterior, se realizó una selección en función de cuales estaciones presentaron las mayores intensidades en la oxiclina ( $>3 \mu\text{mol/kg m}^{-1}$  para junio de 2015 y  $>2.5 \mu\text{mol/kg m}^{-1}$  para marzo de 2016), y que estuvieran comprendidas dentro del rango de profundidad de la oxiclina. Esto con el fin de evaluar la relación que existe entre la producción de CID y la actividad biológica en esta capa. Para ello se realizó una regresión lineal de CID contra la utilización aparente de oxígeno. Los resultados son presentados en la Figura 12 y muestran una relación de:  $\text{CID} = 0.9777 \times \text{UAO} + 2018.34$  ( $r_p=0.9075$ ,  $p<0.0001$ ) para marzo de 2015, y  $\text{CID} = 1.0807 \times \text{UAO} + 1970.81$  ( $r_p=0.9727$ ,  $p<0.0001$ ) para junio de 2016.

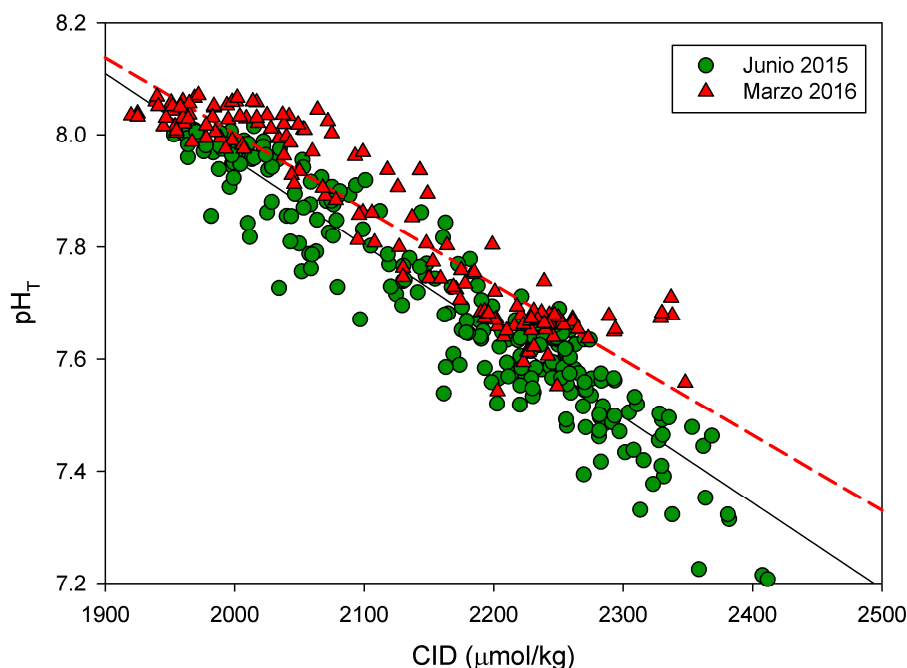


**Figura 12. Utilización aparente de oxígeno ( $\mu\text{mol/kg}$ ) contra carbono inorgánico disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ). Margen izquierda crucero Marías 0615 con una razón molar de  $\text{CID} = 0.9777 \times \text{UAO} + 2018.34$  ( $r_p=0.9075$ ,  $p<0.0001$ ). Margen derecha Marías 0316 con una razón molar de  $\text{CID} = 1.0807 \times \text{UAO} + 1970.81$  ( $r_p=0.9727$ ,  $p<0.0001$ ).**

### $pH_T$

Los valores de  $pH_T$  estuvieron fuertemente correlacionados con los de CID para ambos cruceros (Figura 13;  $r_p=0.90$  para junio de 2015 y  $r_p=0.88$  para marzo de 2016), y su distribución se presentó de manera similar a lo largo de cada crucero. Sin embargo existen diferencias en la relación de estas dos variables entre un año con respecto al siguiente. En términos generales se aprecian mayores valores de  $pH_T$  durante marzo de 2016 para una misma concentración observada de CID que durante junio de 2015. Esto se acentúa principalmente para mayores concentraciones de CID ( $>2200 \mu\text{mol/kg}$ ), mientras que para valores de CID cercanos a los típicos superficiales ( $1900\text{-}2000 \mu\text{mol/kg}$ ), los datos de ambos cruceros tienden a presentar una mayor similitud.



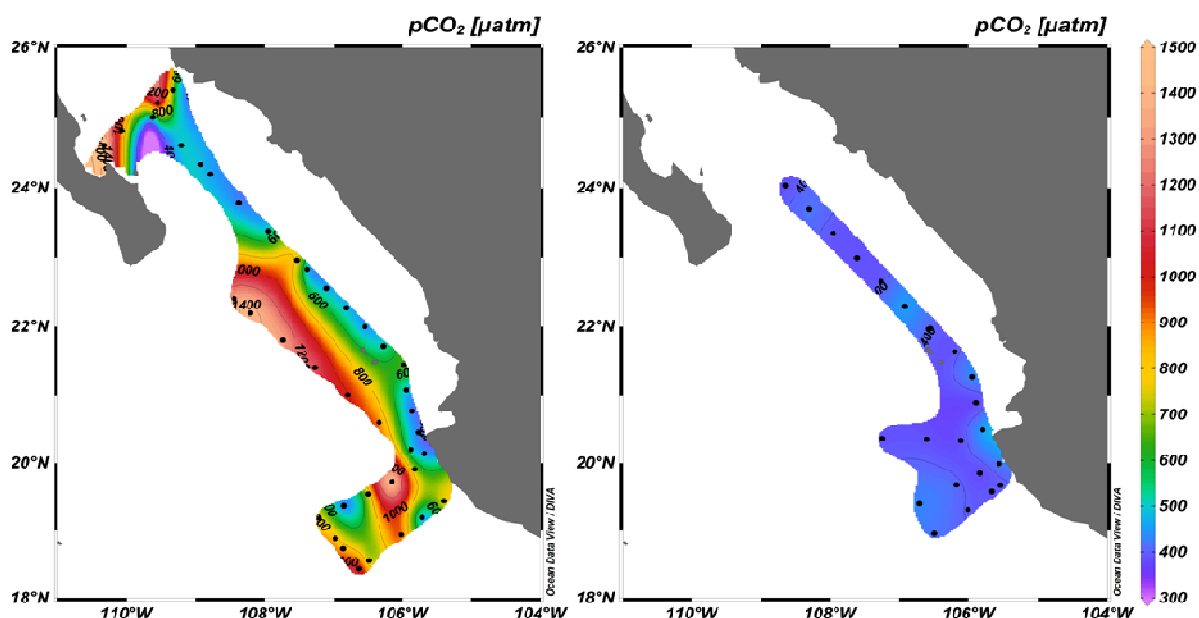


**Figura 13.** pH en escala total ( $\text{pH}_T$ ) contra carbono inorgánico disuelto ( $\mu\text{mol/kg}$ ) para los diferentes períodos muestreados, junio 2015 en círculos verdes, marzo de 2016 en triángulos rojos.

#### *Presión parcial de $\text{CO}_2$ ( $\text{pCO}_2$ )*

En la Figura 14 se presenta la distribución superficial de la  $\text{pCO}_2$  para ambos cruceros. Para la primavera de 2015 la  $\text{pCO}_2$  presentó valores por encima del promedio atmosférico global para el mes de junio de 2015 (399.78 ppm; <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>) a lo largo de todas las estaciones. En términos generales, salvo las estaciones B16 con 785  $\mu\text{atm}$  y B27 con 644  $\mu\text{atm}$ , el área próxima a la costa presentó las menores  $\text{pCO}_2$  con valores típicamente alrededor de 470  $\mu\text{atm}$ . En la porción sur en torno a los transectos realizados en Cabo Corrientes el panorama es más heterogéneo, con un par de estaciones con valores promedio de 450  $\mu\text{atm}$  (tonos azules en la Figura 14), y otro par con valores por encima de las 1000  $\mu\text{atm}$ . Sin embargo para esta zona el promedio en los valores superficiales de  $\text{pCO}_2$  se encuentran alrededor de las 800  $\mu\text{atm}$ . Los valores mayores observados se encuentran en el último par de transectos realizados durante la campaña de 2015, la línea más oceánica y otra atravesando el interior del Golfo de California. Los valores a lo largo de estas estaciones estuvieron típicamente por encima de 1000  $\mu\text{atm}$ , con máximos de  $\sim 1400 \mu\text{atm}$ .





**Figura 14.** Distribución espacial superficial de la presión parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) en  $\mu\text{atm}$ . Lado izquierdo junio de 2015, lado derecho marzo de 2016.

Para marzo de 2016 (Figura 14, lado derecho) el pCO<sub>2</sub> superficial estuvo cercano a valores en equilibrio con la atmósfera (403.58 ppm para marzo de 2016; <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>), con un promedio de 404  $\mu\text{atm}$ . Los mayores valores se observaron en las estaciones costeras de Cabo Corrientes y en una estación próxima a las Islas Mariás, con valores máximos de hasta 450  $\mu\text{atm}$ .

La normalización de la pCO<sub>2</sub> (NpCO<sub>2</sub>) por efecto de temperatura es explicada con mayor detenimiento en el apartado de metodología. En promedio el efecto término presentó, durante junio de 2015, una diferencia de  $-3.75 \pm 40.12 \mu\text{atm}$ , contabilizando aproximadamente el 4.3% del total de los valores estimados de la pCO<sub>2</sub> (con un máximo de hasta 17.31 %). Este efecto térmico no se presentó de manera uniforme en nuestra zona de estudio y tanto las magnitudes, como también el efecto positivo o negativo de la temperatura en la pCO<sub>2</sub> observada presentó diferencias latitudinales. En la Figura 15 se presenta la diferencia entre la pCO<sub>2</sub> y la NpCO<sub>2</sub>, donde valores positivos contabilizan el exceso de pCO<sub>2</sub> atribuido al efecto térmico, y valores negativos denotan un efecto contrario sobre la pCO<sub>2</sub> observado. Para junio 2015 (Figura 15 margen izquierda), la temperatura tuvo un efecto negativo en la pCO<sub>2</sub> en torno a los 24°N, alcanzando valores de hasta -142.53  $\mu\text{atm}$ . A dichas latitudes y con valores de anomalía de densidad potencial ( $\sigma_0$ ) en torno a los  $23 \pm 0.5 \text{ kg/m}^3$ , son aguas superficiales propias del AGC (Figura 4). En torno a los 22 °N y valores similares de  $\sigma_0$  también se observa un efecto negativo. Estas aguas pertenecen a las estaciones más oceánicas donde se detectó la intrusión de ACC. De forma similar pero en la porción sureña de nuestra área de estudio (entre los 18 y 19 °N y con  $\sigma_0$  en torno a los 22  $\text{kg/m}^3$ ) también observamos un efecto negativo de la temperatura en los valores de la pCO<sub>2</sub> ( $-30 \pm 11 \mu\text{atm}$ ). Esta región está dominada por ATS, llega a extenderse hasta los 22 °N, sin embargo por arriba de los 19°N el efecto de la temperatura es casi nulo para esta masa de agua. Es importante recalcar que nuestros errores de estimación de la pCO<sub>2</sub> están en torno a las 30  $\mu\text{atm}$ , en el mismo rango de las variaciones observadas en nuestra porción sureña. Los efectos positivos de la temperatura sobre la pCO<sub>2</sub> se vieron solamente observados en donde el ATr estuvo presente, contabilizando hasta 65  $\mu\text{atm}$ .

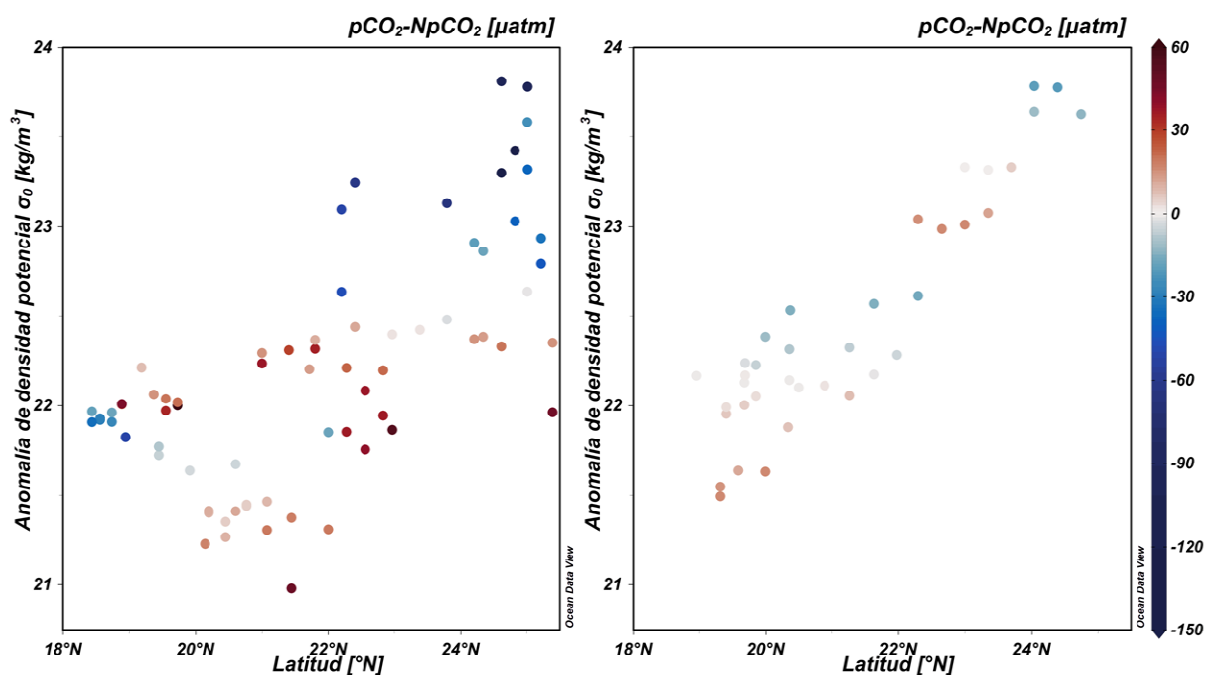


Figura 15. Diferencia entre la presión parcial de  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) y la  $p\text{CO}_2$  normalizada por temperatura ( $\text{NpCO}_2$ ), contra anomalía de densidad potencial y latitud. En Margen izquierda crucero Marias 0615 y margen derecha Marias 0316.

Para marzo de 2016 el efecto térmico sobre la  $p\text{CO}_2$  fue de menor magnitud y presentó una variabilidad menor que con respecto al año anterior; para junio de 2015 la amplitud de variación fue de  $207 \mu\text{atm}$ , mientras que para marzo de 2016 fue de tan solo  $37.83 \mu\text{atm}$ . En promedio el efecto térmico fue casi nulo ( $-0.22 \pm 10 \mu\text{atm}$ ) explicando tan solo el 2.11 % de los valores de la  $p\text{CO}_2$  observada y un máximo de 5.57%.

#### Flujos de $\text{CO}_2$

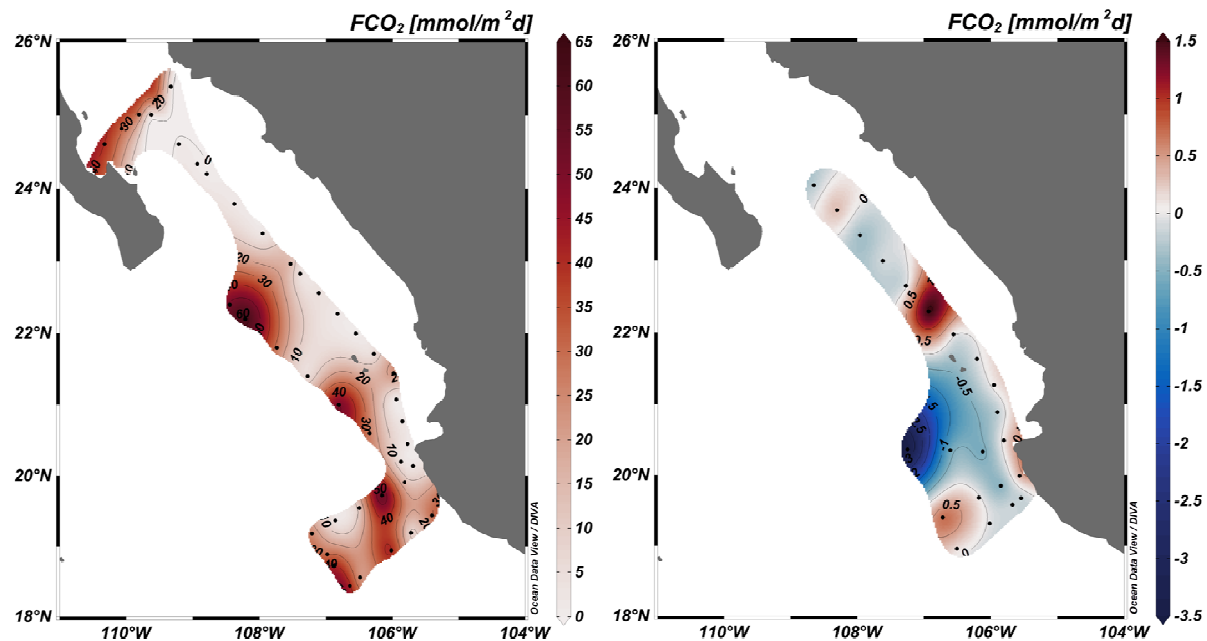
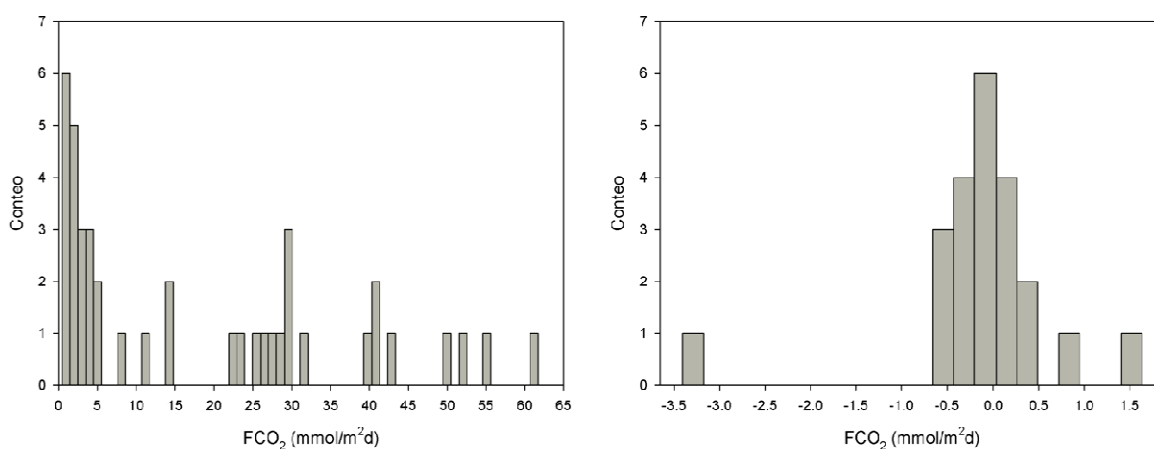


Figura 16. Distribución espacial de Flujos de  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_2$ ) en  $\text{mmol/m}^2\text{d}$ . Lado izquierdo junio de 2015, lado derecho marzo de 2016. Notar la diferencia en las magnitudes de flujos para cada período.

Los  $\text{FCO}_2$  calculados presentaron contrastes notables entre las dos temporadas (Figura 16). Para junio de 2015 toda el área muestreada se comportó como una fuente de  $\text{CO}_2$ , con un flujo neto positivo promedio de  $18.36 \pm 18.25 \text{ mmol/m}^2\text{d}$ . Los mayores flujos se observaron dentro del Golfo de California en el lado peninsular, con valores entre 26 y 40  $\text{mmol/m}^2\text{d}$ , en la parte oceánica y media de los transectos realizados frente a Cabo Corrientes, con flujos máximos de hasta 55  $\text{mmol/m}^2\text{d}$  y en la parte norte del transecto más oceánico, donde se calcularon flujos de hasta 62  $\text{mmol/m}^2\text{d}$ . Para el resto del área muestreada y en la mayoría de las estaciones los flujos estuvieron por debajo de los 15  $\text{mmol/m}^2\text{d}$  (Figura 17).

Para marzo de 2016 el PTMC se mostró prácticamente en equilibrio con la atmósfera, con un promedio de  $-0.138 \text{ mmol/m}^2\text{d}$ . El mayor flujo registrado fue de la atmósfera hacia el océano con  $-3.4 \text{ mmol/m}^2\text{d}$ , localizado en la estación más oceánica frente a Cabo Corrientes (Figura 16). La mayor parte del área muestreada estuvo cercana a valores de cero (Figura 17). En torno a los  $22^\circ\text{N}$  se registró el mayor flujo positivo del océano hacia la atmósfera, con  $1.64 \text{ mmol/m}^2\text{d}$ .



**Figura 17. Histograma de frecuencia de los flujos de  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_2$ ) calculados para cada temporada. En el margen izquierdo junio de 2015, y en el margen derecho marzo de 2016. Notar la diferencia en las magnitudes de flujos para cada período.**

## DISCUSIONES

### *Condiciones oceanográficas anómalas*

En su revisión de la hidrografía del Pacífico tropical, Fiedler & Talley (2006) describen la estacionalidad, distribución, circulación y origen de las masas de aguas a una escala sinóptica. Establece que la variabilidad estacional y aquella sujeta al fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, inglés) es baja, y muestran que a esta escala la temperatura superficial del mar del PTMC se encuentra entre 22 y 25°C durante la primavera, y entre 21 y 23 °C durante invierno. Su principal característica es la alberca cálida del pacífico este, con dominio superficial del ATS con baja salinidad sobre una piconclina intensa y somera. Posteriormente Portela et al. (2016) refinan este análisis a escala regional, estableciendo las fronteras de las masas de aguas presentes y sus patrones de circulación en el PTMC, nuestra zona de estudio. Concluyen que el PTMC superficialmente recibe ACC durante todo el año, AGC durante la primavera y ATS principalmente durante verano y otoño.

En la Figura 18 se muestra una comparación entre la media estacional de la base de datos del World Ocean Atlas del 2009 (WOA09) y nuestros cruceros realizados en junio de 2015 y marzo de 2016. Podemos apreciar que para nuestra área particular del PTMC (polígono amarillo, Figura 1), no contamos típicamente con la presencia de ATS durante primavera (Figura 18, margen izquierdo), teniendo aguas con características más próximas al AGC. Portela et al. (2016) señalan que esta similitud con AGC se acentúa a partir de los 250 metros de profundidad. Esta estacionalidad típica no se observa en el crucero de junio de 2015, donde tenemos varias estaciones sureñas con presencia de ATS, y una gran porción del ATr se encuentra con características termohalinas próximas al ATS. Siguiendo la misma comparación, en el caso de la temporada invernal (Figura 18, margen derecha), la climatología fluctúa a una distribución donde las características de las masas de aguas se aproximan al ATS. Sin embargo el ATS tampoco debería de estar presente para esta temporada. Nuevamente para nuestro monitoreo, durante marzo de 2016 tenemos una fuerte presencia de ATS. En resumen, para los cruceros de junio de 2015 (primavera) y marzo de 2016 (invierno) contamos con la presencia de ATS estacionalmente anómalas en nuestra región de estudio.

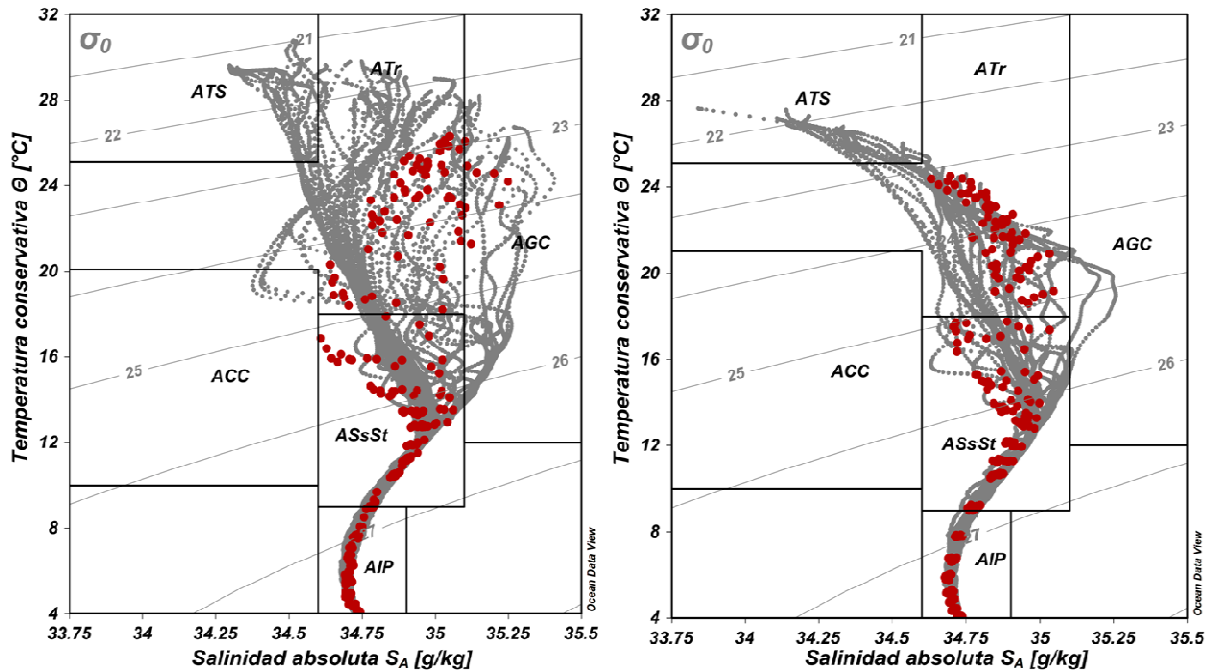
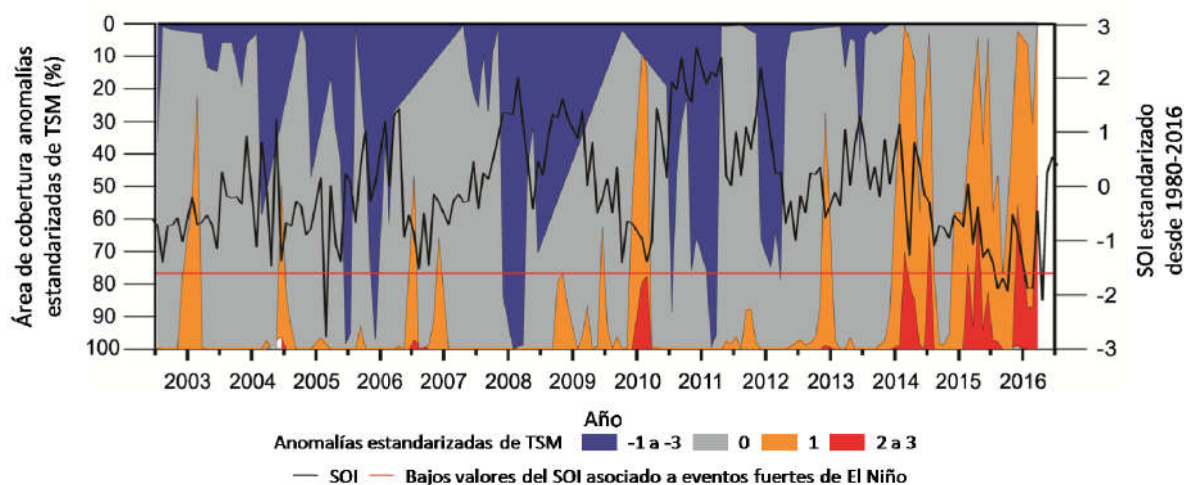


Figura 18. Diagrama Temperatura Conservativa ( $\Theta$ ) y Salinidad Absoluta ( $S_A$ ). Lado izquierdo junio 2015, lado derecho marzo 2016. En color rojo promedio estacional obtenido del World Ocean Atlas 2009 (>25 observaciones por dato graficado). Invierno, lado derecho Los acrónimos utilizados son Agua Tropical Superficial (ATS), Agua Transicional (ATr), Agua de la

**Corriente de California (ACC), Agua del Golfo de California (AGC), Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) y Agua Intermedia del Pacífico (AIP). Límites tomados a partir de Portela et al., (2016).**

La distribución climatológica que describimos en la Figura 18 y describimos en párrafos anteriores está en concordancia con lo reportado por otros autores para la zona, como es el caso del trabajo de Cepeda-Morales et al. (2013, su figura 7) y Portela et al. (2016, su figura 5)

Recientemente se reportaron anomalías positivas de temperatura superficial del mar (TSM) a lo largo del Pacífico Norte oriental durante el invierno de 2014 (Hartmann 2015; Stramma et al. 2016) y éstas ha sido referida, debido a su intensidad y extensión, como “La Mancha” (Bond et al., 2015). Posterior a su establecimiento se registraron, en el Pacífico tropical, señales intensas de un evento ENSO en desarrollo (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>). Sánchez-Velasco et al. (2017) construyen un índice de anomalías de TSM con imágenes satelitales comprendidas de 1981 a 2016, para determinar si localmente existe un de calentamiento anómalo de aguas superficial en el PTMC, producto del avance del ENSO a lo largo de la costa mexicana. El área utilizada para construir dicho índice se delimita en la Figura 1 en contorno amarillo. Los resultados de dicho índice se muestran en la Figura 19 donde se observa una correspondencia de bajos valores del índice de oscilación del sur (SOI por sus siglas en inglés; asociados a eventos ENSO fuertes) a anomalías positivas locales intensas de TSM para el PTMC durante 2015 y parte de 2016.



**Figura 19. Anomalia mensuales de TSM (ver texto para definición) de 2002 a 2016 (ver Figura 1 para área) La línea negra representa el Índice de Oscilación del Sur. (SOI por sus siglas en inglés) para el mismo periodo (Tomado y modificado a partir de Sánchez-Velasco et al. (2017)).**

Estas anomalías de temperatura no sólo son apreciadas en la superficie del océano. En la Figura 20 se aprecia como sobre el transecto 1 se registran temperaturas anómalas hacia el interior del océano. Para este caso se realizó la misma comparación de bases de datos realizada con la Figura 18, esto es las mediciones realizadas de cada crucero menos la climatología estacional correspondiente obtenida del WOA09. Para junio de 2015 registramos las anomalías positivas más intensas de ambos periodos en latitudes sureñas (21.5 – 20 °N; Figura 20.a), en torno a las Islas Marías. Allí observamos anomalías positivas a lo largo de todos los primeros 200 m de profundidad, con valores por encima de +4 °C a partir de los 100 m hacia la superficie. La mayor intensidad en esta porción estuvo en las proximidades del límite vertical entre el ATS y el ASsSt (Figura 5.c), entre los 50 y 75 m de profundidad. Para el resto del transecto, conforme avanzamos hacia el norte, las anomalías positivas se registran principalmente solo en la capa superficial, a partir de los 50 metros de profundidad. Durante el crucero de marzo de 2016 también se registran anomalías positivas de temperatura en la columna de agua. Pese a ser de menor intensidad que la temporada anterior (+2-4 °C), la anomalía positiva se manifiesta a lo largo de todo el transecto, desde la superficie a los 100 m en latitudes norte, decreciendo en profundidad hacia las latitudes

sureñas (Figura 20.b). Este comportamiento se exhibe con un ENSO en fase de decaimiento (Abellán et al. 2017; Santoso et al. 2017), con anomalías de temperatura superficial todavía positivas, pero con condiciones oceanográficas próximas a la climatología estacional (Figura 18). La señal de anomalía térmica más débil observada para marzo de 2016 podría deberse a un efecto residual de un ENSO disipándose, y empezando a observar condiciones normales más próximas a la climatología esperada.

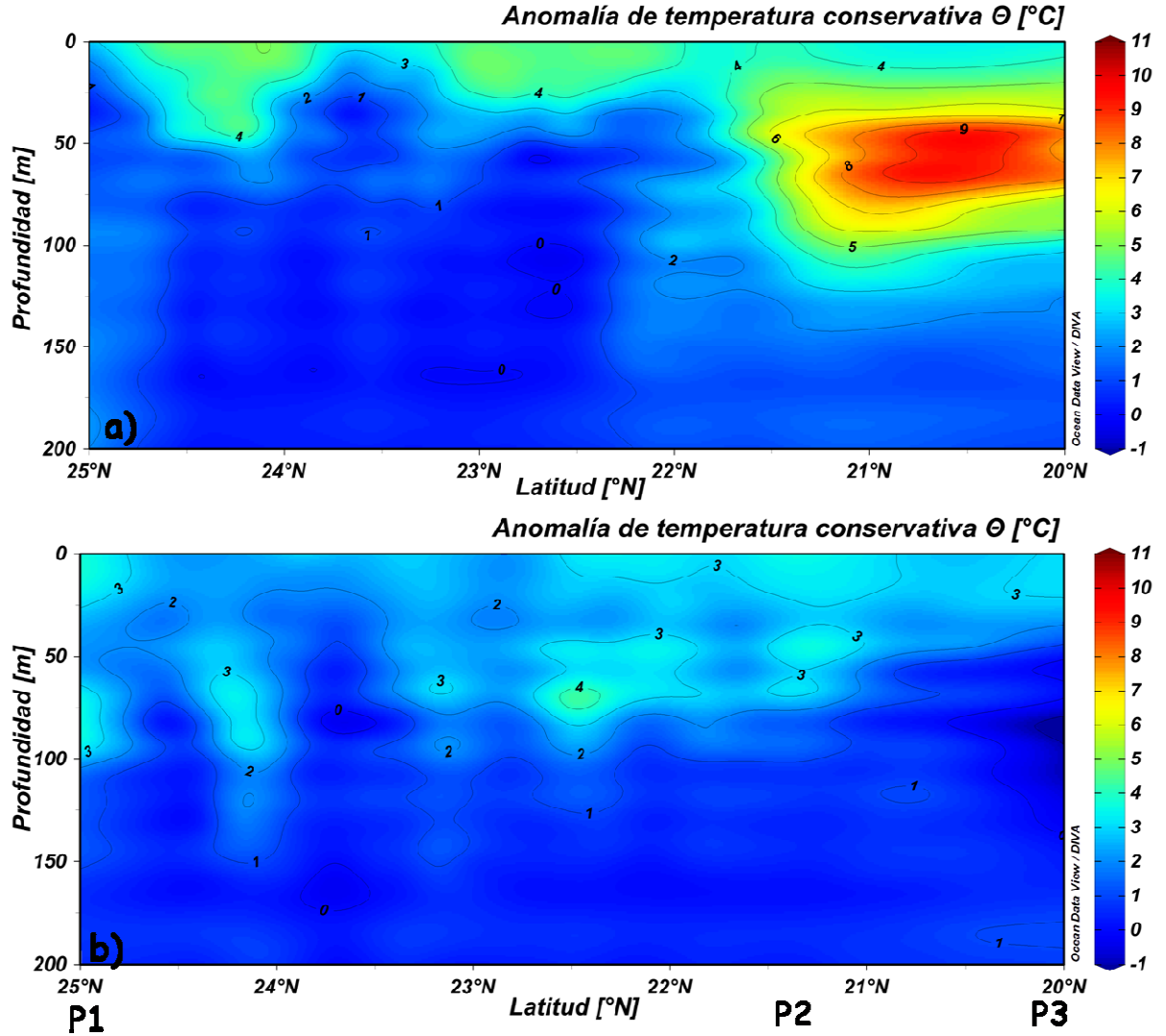


Figura 20. Perfiles verticales de anomalías de temperatura conservativa ( $\Theta$ , °C) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 (a) y marzo de 2016 (b). Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1

Anomalías importantes en la concentración de OD también se observaron latitudinalmente y hacia el interior del océano. El análisis se efectuó de la misma forma que para los diagramas T-S y  $\Theta$ , tomando en cuenta solo las profundidades que contaran con más de 3 observaciones para la construcción de la climatología estacional (típicamente 6 observaciones, con un máximo de 15). En la Figura 21.a se aprecia que durante junio de 2015, la incursión del ATS (de los 20° a los 22° N, de los 75 m a la superficie) como una cuña con baja salinidad (isohalina de 34.6 g/kg) conllevó a una mayor concentración de oxígeno subsuperficial con valores mayores de +75  $\mu\text{mol/kg}$ . Ito & Deutsch (2013), como resultado de la modelación biogeoquímica del Pacífico tropical, destacan que el contenido de calor y las tasas de respiración están altamente correlacionadas con el ENSO. Esto es que una termoclina más profunda y cálida contiene mayor cantidad de oxígeno, debido a cambios



correspondientes en el consumo biológico de oxígeno por una reducción en el aporte superficial de nutrientes. Dicho mecanismo, en conjunto con un hundimiento del ASsSt por debajo de la incursión del ATS, podrían estar operando en la porción sur de nuestra área de estudio, donde encontramos las mayores anomalías de OD (Figura 21) y los menores valores de CID encontrados para los períodos muestreados (Tabla 3; Figura 7). Estos resultados están en concordancia con lo reportado en la literatura, donde señalan la influencia del ENSO sobre la profundidad y estructura de la ZMO y la oxiclina (Morales et al. 1999; Fuenzalida et al. 2009; Czeschel et al. 2012)

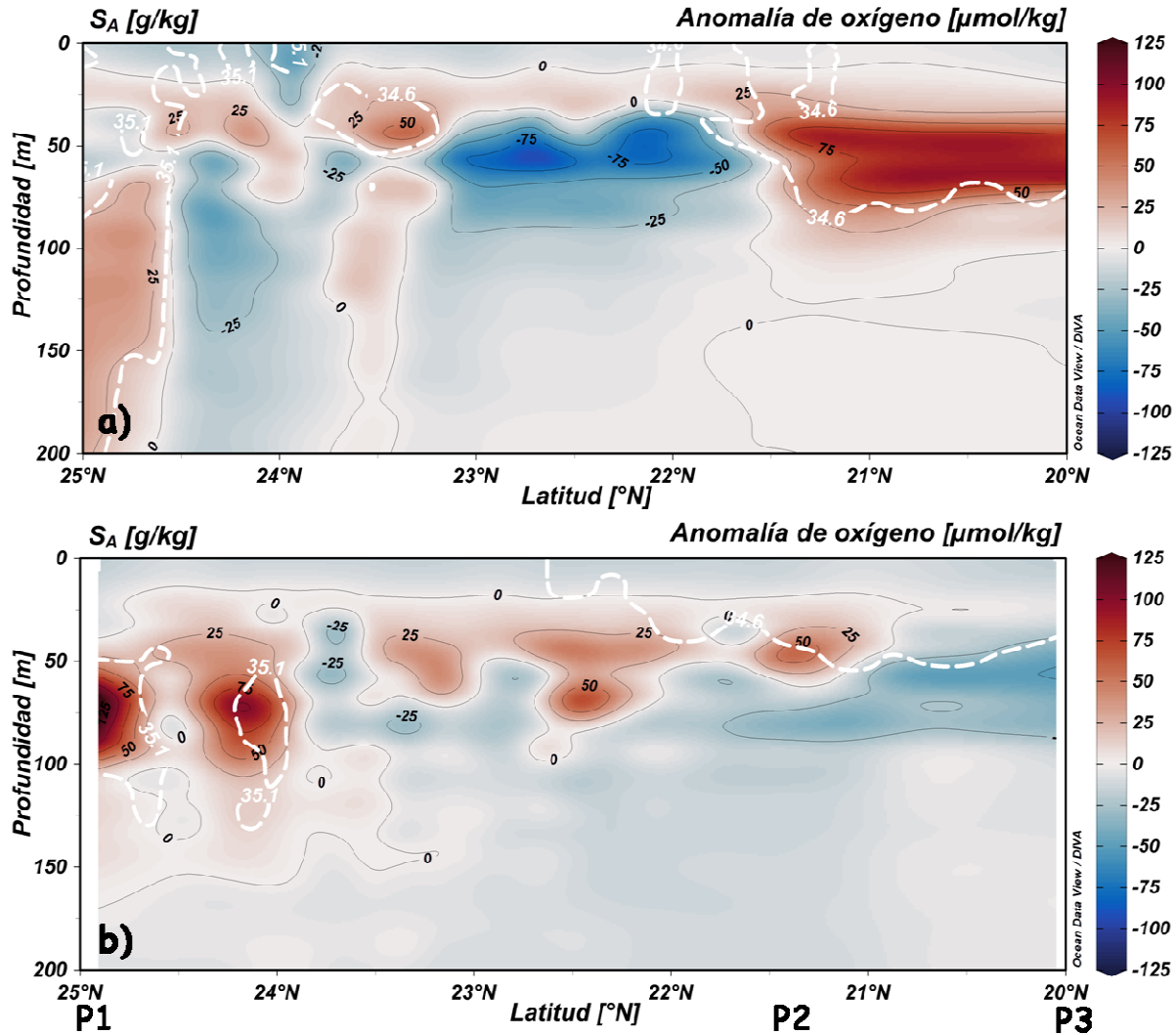


Figura 21. Perfiles verticales de anomalías de oxígeno disuelto (OD,  $\mu\text{mol/kg}$ ) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 (a) y marzo de 2016 (b). En contorno blanco con línea punteada se presenta los límites halinos (salinidad absoluta ( $S_A$ ; g/kg)) del Agua del Golfo de California (AGC, 35.1 g/kg) y del Agua Tropical Superficial (ATS), Agua de la Corriente de California (ACC) y Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) todas con una frontera halina de 34.6 g/kg (ver Tabla 1) Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1

Continuando con junio de 2015, en la porción norte, en torno a la boca del Golfo de California ( $\sim 25^\circ\text{N}$ ), se aprecia un comportamiento similar a lo descrito en la porción sur. La salida del AGC ( $>35.1$  g/kg) genera un frente salino casi vertical, que se extiende a profundidades de hasta casi los 200 metros. Collins et al. (2015) reportan y describen justamente los mecanismos que participan en la formación de estos frentes, destacando que su génesis es más propicia a ocurrir en temporada otoñal. Este frente asociado al AGC genera anomalías positivas de OD a profundidades entre los 50 y 200 m de profundidad, con valores por encima de los +25

$\mu\text{mol/kg}$ . Adyacente a donde detectamos la presencia del AGC, entre los 50 a 150 metros y entre los 25 metros y la superficie, se observan valores de anomalía de OD por debajo de los  $-25 \mu\text{mol/kg}$ . Esto se observa justamente donde detectamos una intrusión en toda la capa superficial de aguas de 50 metros de profundidad con concentraciones de oxígeno entre  $140\text{-}160 \mu\text{mol/kg}$  (Figura 9.a). Continuando hacia el sur ( $\sim 25^\circ\text{N}$ ), encontramos la intrusión alrededor de los 50 m de profundidad de ACC ( $<34.6 \text{ g/kg}$ ). Cepeda-Morales et al. (2013) señalan que en torno a los  $23^\circ$  a  $20^\circ\text{N}$  existe una zona de transición, donde la influencia de la ASsSt desaparece y la parte superior de la ZMO es forzada a mayores profundidades debido a la intrusión de ACC transportada por la interacción de remolinos y el Brazo Tropical de la CC. Dicha intrusión ha sido observada y reportada previamente (Lavín et al. 2009). Este mecanismo podría explicar la anomalía positiva de OD que encontramos asociada a la incursión de ACC. La mesoescala en conjunto con estas observaciones las discutiremos en un apartado posterior.

Para el siguiente año, en marzo de 2016 (Figura 21.b), la distribución de OD retorna a condiciones más próximas a las estacionales. Sin embargo, se puede apreciar una franja de anomalía positiva ( $>+25 \mu\text{mol/kg}$ ) a lo largo de todo el transecto, en torno a los 50 metros de profundidad. Lo que podríamos estar apreciando en esta franja son los efectos remanentes de la incursión de aguas cálidas sureñas más oxigenadas registradas en el período anterior. Fuenzalida et al. (2009) reportan la erosión de la oxiclina por efecto del ENSO frente a las costas peruanas, observando un restablecimiento rápido de una capa de mezcla somera asociado a una oxiclina intensa. A pesar de que no detectamos propiamente la erosión de la oxiclina durante la incursión de ATS en junio de 2015 (nuestros datos muestran que hubo una intensificación de la misma donde se detectó esta masa de agua; Figura 10), en la Figura 21.b podríamos estar apreciando propiamente la restitución de la oxiclina en la región.

Por otra parte, en torno a los  $25^\circ$  y  $24^\circ\text{N}$ , observamos anomalías positivas de OD  $+50\text{-}125 \mu\text{mol/kg}$  asociadas a la presencia de AGC, entre los 50 y 100 metros de profundidad. Para este periodo, a diferencia de la primavera del año anterior, la presencia de ATS no ocasionó variaciones aparentes en la distribución climatológica estacional del OD. Esto se atribuye a la relajación local de los efectos del ENSO (Sánchez-Velasco et al. 2017), y a que nuestra área de estudio empieza una etapa de recuperación hacia condiciones oceanográficas más próximas a la climatología estacional (Figura 18), donde todavía tenemos presencia de ATS en el PTMC durante temporadas invernales, producto de las incursiones de esta masa de agua durante primavera y otoño (Portela et al. 2016)

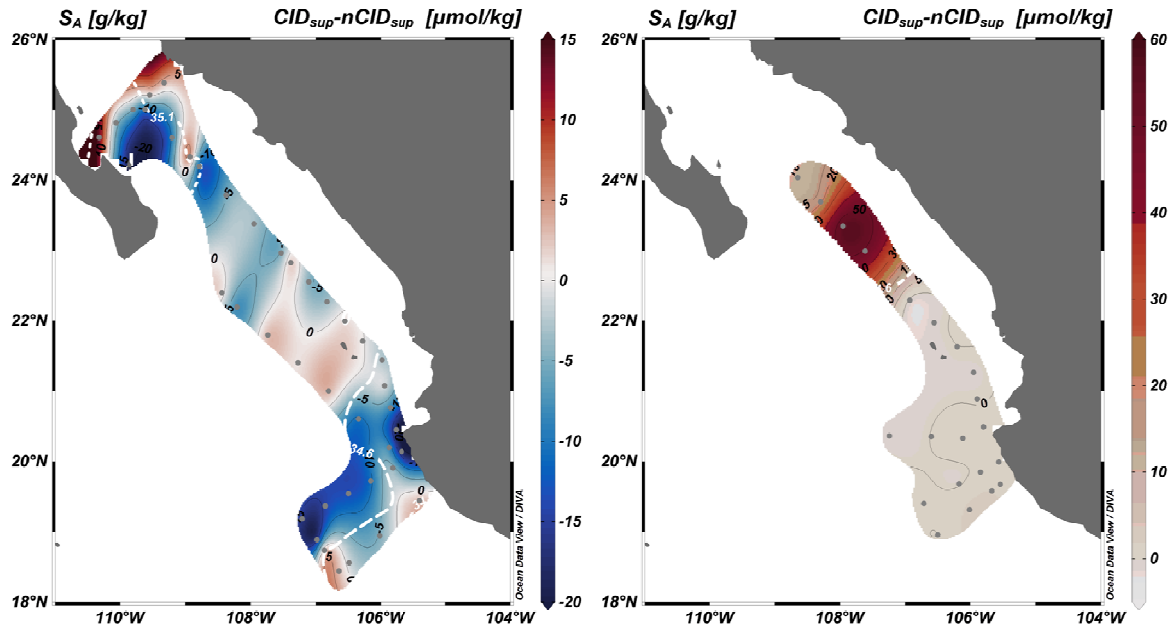
#### *Procesos superficiales de concentración y dilución sobre el CID*

Para poder determinar el efecto de la evaporación y/o la precipitación sobre la concentración del CID seguimos el modelo de normalización por salinidad propuesto por Friis et al. (2003). La precipitación y la evaporación son los principales procesos físicos que pueden alterar la concentración del CID (Friis et al. 2003), sin embargo en este apartado nos referimos a procesos de concentración y dilución debido a las particularidades de nuestra área de estudio. Se caracteriza por ser una zona de transición (Cepeda-Morales et al. 2009; Leon-Chavez et al. 2010), donde confluyen superficialmente tres masas de agua con características termohalinas particulares (Tabla 1). El resultado de la interacción de estas masas de agua da origen al ATr, y su respectiva cantidad de CID puede concentrarse o diluirse en proporción del aporte relativo de cada una de ellas (Tabla 3).

En la Figura 22 se presenta los resultados de los modelos de normalización por salinidad de cada masa de agua, en términos de la diferencia observada entre el CID medido y el CID normalizado, en la superficie. Esto sería que para valores positivos estaríamos observando una concentración de CID debido a procesos de evaporación o aporte subsuperficial de ASsSt con mayor salinidad y mayor concentración de CID (para los casos del ATr y ATS; Figura 7) o mezcla del AGC con ATr. Caso contrario, para valores negativos estaríamos



observando dilución por precipitación o aportes fluviales, o para el caso del ATr mezcla con ATS con menor salinidad y menor CID.

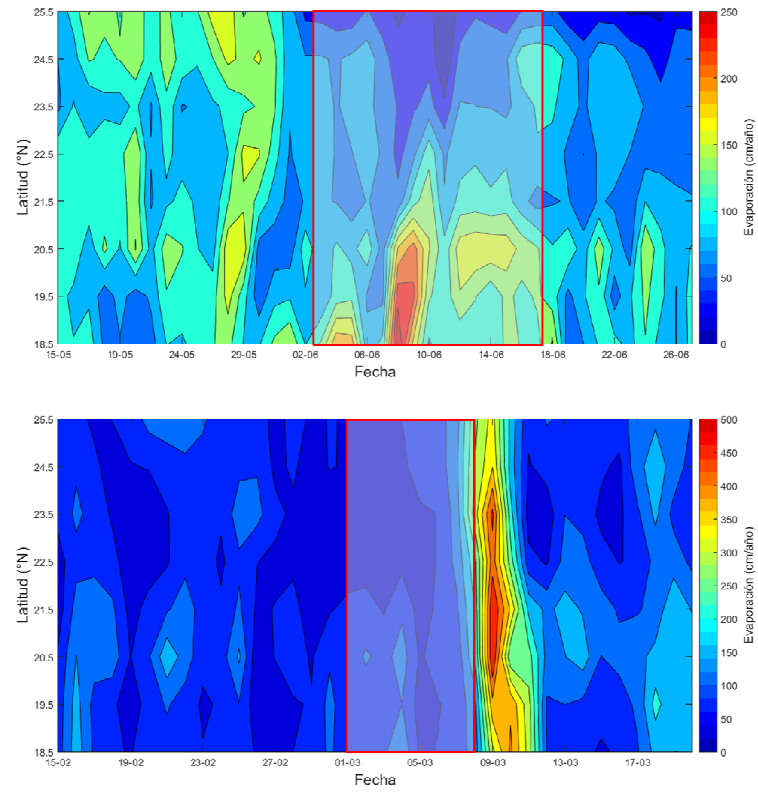


**Figura 22.** Distribución espacial de la diferencia entre CID superficial menos el CID superficial normalizado por salinidad (ver apartado de metodología). En línea punteada blanca los límites halinos en salinidad absoluta ( $S_A$ ) del ATS (<34.6 g/kg) y del AGC (35.1 g/kg). Lado izquierdo junio de 2015, lado derecho marzo de 2016. Notar la diferencia en las escalas gráficas para cada período.

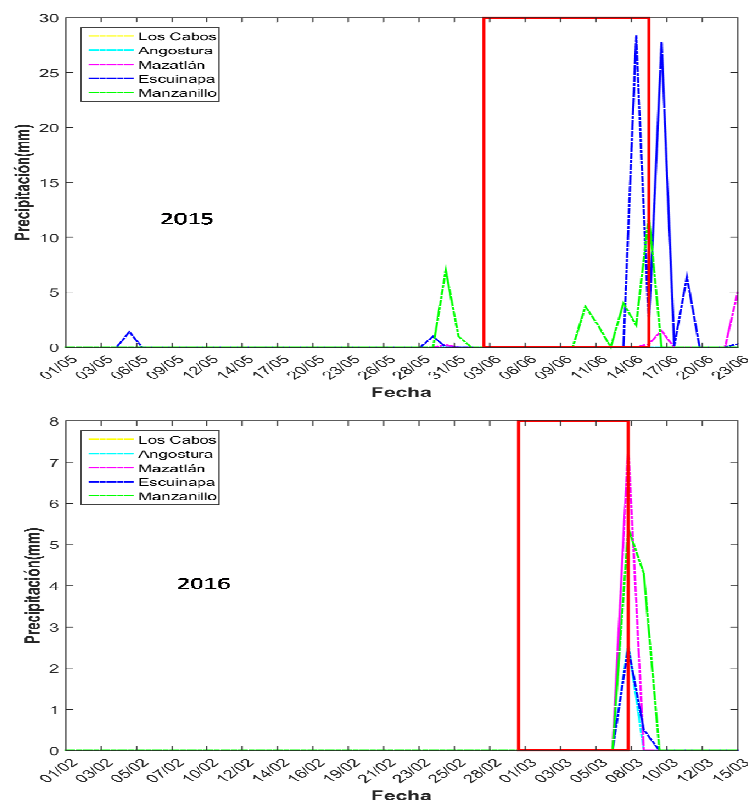
La evaporación puede depender de diferentes factores meteorológico y oceánicos (v.g. velocidad del viento, humedad del aire, presión atmosférica, TSM; Xu & Singh 1998). Yu & Weller (2007) realizan análisis objetivos de mediciones in situ y datos satelitales para determinar la evaporación diaria promedio sobre el océano (cm/año) a una resolución espacial de  $1^\circ$  (<http://oafux.whoi.edu>). Estos datos son presentados para nuestra región en la Figura 23, en función de la variación del tiempo y la latitud. En términos generales, para junio de 2015 se observa una evolución hacia una mayor evaporación a partir de la región sur ( $\sim 19^\circ\text{N}$ , 03 junio) progresando hacia el norte y alcanzando un máximo el 08 de junio, donde este máximo es generado como consecuencia las elevadas velocidades de viento asociadas al huracán Blanca (06-08 de junio). En la Figura 22 (CID-nCID) se observan valores positivos en la al sur de los  $22^\circ\text{N}$  ( $\sim +5 \mu\text{mol/kg}$ ), colindando con el límite del ATS (línea punteada blanca). Estos valores podrían estar asociados a las tasas altas de evaporación encontradas durante el huracán Blanca. También se registró una disminución de  $1^\circ\text{C}$  de TSM en esta área en comparación con las estaciones colindantes (Figura 5.a), como respuesta a esta probable mayor evaporación.

Por otra parte, las mayores diferencias negativas entre CID-nCID ( $\sim -20 \mu\text{mol/kg}$ ) se observaron cercanas al continente en torno a Cabo Corrientes y hacia las estaciones oceánicas perpendiculares a esta costa. El registro de lluvias diarias de las estaciones costeras en torno a nuestra área de estudio (Figura 24), muestra que en el mes previo a cada uno de nuestros cruceros las precipitaciones fueron escasas o nulas. Para junio de 2015 se registran lluvias considerables concentradas en la porción sur, en torno al sur de Sinaloa y hasta Colima, y sobre la segunda mitad de la duración de nuestro crucero (a partir del 10 de enero). Cercano a estas estaciones costeras ( $\sim 50 \text{ km}$ ) se encuentra en Bahía de Banderas la desembocadura del río Ameca con una cuenca hidrográfica de  $12,214 \text{ km}^2$ . Cortés Lara et al. (2004) reportan una menor salinidad promedio para el mes de julio en Bahía de Banderas ( $<34$ ), mientras que Filonov et al. (2000) observan un decremento en la salinidad en estaciones costeras de Jalisco y Colima a partir del mes de junio, debido a la intensificación de las lluvias durante la temporada de

huracanes. Los valores negativos que observamos podemos asociarlo a aportes de agua continental con menor salinidad, que diluyen la concentración de CID en esta área. Perfiles verticales de salinidad de estas estaciones muestran un decremento en la salinidad para los primeros 10 metros, reforzando esta hipótesis.



**Figura 23.** Diagrama Hovmöller representando la evaporación promedio diaria (cm/año), en función de el tiempo (días) y la latitud norte (grados). Los recuadros rojos representan el periodo de tiempo en que se realizaron los cruceros oceanográficos. Parte superior junio de 2015, parte inferior marzo de 2016.



**Figura 24. Precipitación promedio diaria (mm) en función del tiempo (días). Los recuadros rojos representan el periodo de tiempo en que se realizaron los cruceros oceanográficos. Parte superior junio de 2015, parte inferior marzo de 2016. Estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (ver Figura 1)**

Para marzo de 2016, prácticamente no se observaron diferencias entre CID y nCID a lo largo del ATS (Figura 22). Caso contrario, el ATr exhibió las mayores diferencias positivas de los dos años, con valores de hasta + 60  $\mu\text{mol/kg}$ . Las precipitaciones se limitaron a un par de días al final de este crucero, siendo ausentes en el mes previo (Figura 24), mientras que la evaporación fue prácticamente homogénea a lo largo de toda el área (Figura 23). Las mayores intensidades de viento son registradas a lo largo del Golfo de California durante invierno (Parés-Sierra et al. 2003) con una componente predominante sur. Estos valores positivos de CID-nCID podrían estar asociados a las altas tasas de evaporación inducidas por el viento a lo largo del Golfo de California.

Los procesos descritos hasta el momento en este apartado son influencias de carácter local sobre el CID observado, y enmascaran otros procesos que podrían estar ocurriendo a escala regional. Particularmente destacar un probable enriquecimiento latitudinal del contenido de CID en el ATS transportada a lo largo de la CCM. Chapa-Balcorta et al. (2015) reportan valores promedios de CID de  $1906 \pm 29 \mu\text{mol/kg}$  para las costas frente a Oaxaca ( $\sim 15^\circ\text{N}$ ). Continuando hacia el norte, frente a las costas de Michoacán y Colima ( $20\text{-}14^\circ\text{N}$ ), se observa un gradiente sur a norte de CID, desde 1820 a 1980  $\mu\text{mol/kg}$  (Franco et al. 2014). Finalmente en el presente trabajo, en torno a los  $21^\circ\text{N}$ , estamos reportando valores de promedio de  $2016 \pm 60 \mu\text{mol/kg}$  para 2015 y  $1971 \pm 48 \mu\text{mol/kg}$  para 2016 (Tabla 3). El ATS se origina próxima al Ecuador, una región con alta precipitación, pero su salinidad y propiedades químicas pueden estar sujetas a cambios en su transición hacia el PTMC, principalmente por concentración debido a evaporación (Franco et al. 2014). Es necesario realizar un análisis exploratorio detallado de estos datos, para poder determinar si realmente existe el gradiente descrito y los factores que lo controlan.

#### *Diferenciación espacial en la dinámica del OD y CID*

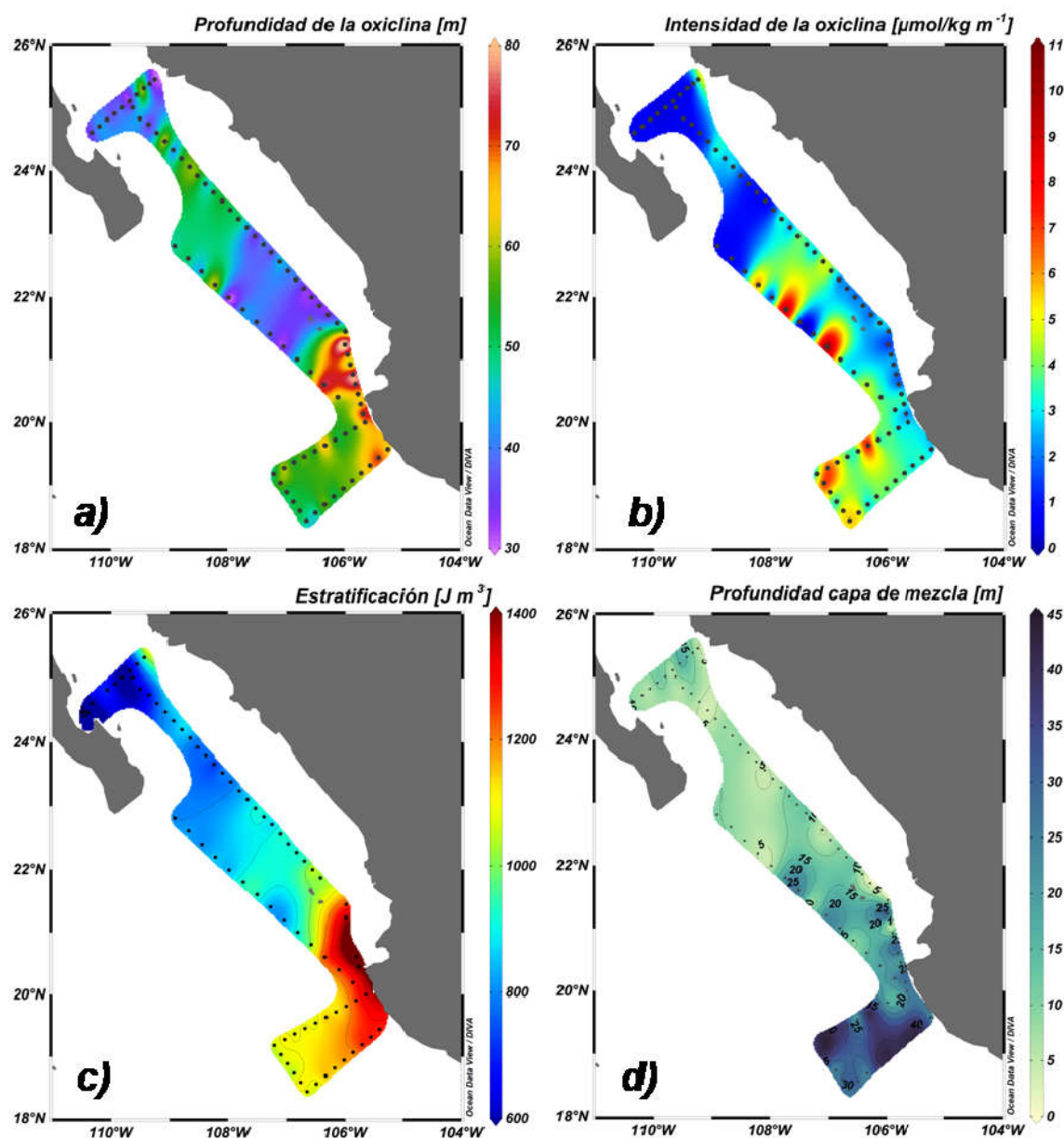
En nuestro análisis hemos identificado tres regiones principales, en función de los procesos que distribuyen y modifican la estructura espacial del OD y el CID. Abordaremos la discusión primeramente destacando sus características observadas durante la primavera de 2015 y posteriormente contrastando con el panorama encontrado en invierno de 2016.

#### *Junio 2015*

##### *Región Cabo Corrientes*

En latitudes sureñas, por debajo de los 22 °N en estaciones cercanas a la costa y 20.5 °N en estaciones oceánicas, la capa superficial está dominada por la incursión del ATS. Su presencia anómala está temporalmente asociada a un fenómeno del ENSO en desarrollo y allí ocurre la mayor estratificación registrada en nuestro período de estudio (de 1000 a 1400 J/m<sup>3</sup> en un gradiente océano-costa; Figura 25.c). Estos valores se pueden encontrar típicamente frente a las costas de Oaxaca (Chapa-Balcorta et al. 2015) y en la alberca cálida de Pacífico oriental (Fiedler et al. 2013), decreciendo progresivamente hacia nuestra región con valores alrededor de 1200 J/m<sup>3</sup> (Franco et al. 2014; Fiedler et al. 2013). La temperatura es el factor principal que domina la estratificación en nuestra región (Fiedler et al. 2013), y justamente en esta sección podemos observar que se intensifica asociado a un gradiente de temperatura océano-costa (Figura 4.a). Sin embargo, para estaciones costeras donde detectamos aporte de agua dulce, la salinidad se convierte en un factor relevante en la estratificación.

La oxiclina ha sido propuesta como un mecanismo local, donde a través de intensos procesos de remineralización se mantiene la ZMO (Paulmier et al. 2006). Debido a su proximidad a la superficie, y al amplio espectro de concentraciones de OD (de óxico >200 μmol/kg a subóxico <4.4), en la oxiclina pueden coexistir procesos aeróbicos/anaeróbicos y fóticos/afóticos, que repercutirían de manera concomitante en la distribución de CID y la carboclina (Paulmier et al. 2011). En la Figura 25.a observamos como la profundidad de la oxiclina es desplazada desde los 40 metros en la parte oceánica hasta por debajo de los 80 metros frente a Cabo Corrientes. Su profundidad está estrechamente asociada a la distribución de la estratificación, ocasionada por la entrada de ATS con las características descritas en el párrafo anterior. Este mecanismo de hundimiento y erosión parcial de la oxiclina ha sido observado y descrito en zonas ecuatoriales (Fuenzalida et al. 2009) y frente a costas peruanas (Stramma et al. 2016). La capa de mezcla está asociada a procesos de carácter local, tales como el viento, la insolación y la lluvia (Fiedler et al. 2013). En efecto, la mayor variabilidad de su profundidad se encuentra en la región de Cabo Corrientes, donde nuestros muestreos fueron realizados posteriormente al paso cercano del huracán Blanca. Pese a esta alta variabilidad en términos generales nuevamente se aprecia un patrón océano-costa (Figura 25), con una oxiclina próxima (~ 10 metros) de la capa de mezcla en la parte oceánica y separada por 60 metros en la zona costera. Paulmier et al. (2006) hipotetizan que la remineralización es más sensible a la disponibilidad de O<sub>2</sub> que a la biomasa superficial, sugiriendo una remineralización "impulsada por oxígeno". Nuestros resultados apoyan dicha hipótesis ya que las oxiclinas más intensas se encuentran donde la capa de mezcla es próxima a la profundidad de la oxiclina y la estratificación es menor, favoreciendo la disponibilidad de oxígeno en esta capa impulsando la remineralización.



**Figura 25. Distribución espacial de a) profundidad de la oxiclina (m), b) intensidad de la oxiclina ( $\mu\text{mol/kg m}^{-1}$ ), c) estratificación ( $\text{J/m}^3$ ) y d) profundidad de capa de mezcla (m), durante junio de 2015.**

En la Figura 26 presentamos la variación latitudinal y en profundidad del CID y OD a lo largo del Transecto 1. También mostramos los límites establecidos en función del análisis que estamos presentando en esta sección. Los límites los establecimos de acuerdo a las características físico-químicas determinadas durante junio de 2015, y se mantienen con el fin referencial de observar los cambios en el mismo sector durante marzo de 2016. Estas características son dinámicas y su extensión puede variar en otras temporadas, principalmente en función de la extensión de sus masas de agua, así como las forzantes que estén actuando para favorecer su dispersión y mezcla.

Continuando con la región de Cabo Corrientes (región I, Figura 26), el ATS presenta bajas concentraciones de CID ( $\sim 1950 \text{ mol/kg}$ ) asociadas a concentraciones de oxígeno disuelto ligeramente menores ( $200\text{-}180 \mu\text{mol/kg}$ ) que otras aguas superficiales del PTMC (típicamente  $>200 \mu\text{mol/kg}$ ). Las ZMO presentan asociadas zonas máximas de carbono (ZMC) y de manera análoga a las primeras, las ZMC también cuentan con una carboclina en su estructura (Paulmier et al. 2011; Franco et al. 2014). La resolución vertical de nuestro muestreo no nos permite resolver detalladamente la carboclina, y como se mencionó en las observaciones realizadas sobre la

Figura 11, existe cierta dispersión entre la relación del CID y OD dependiendo de la masa de agua observada y la latitud en que se encuentra. Esto se atribuye principalmente a que el CID, al ser un sistema amortiguado responde a una menor velocidad a las perturbaciones verticales que con respecto al O<sub>2</sub> (Paulmier et al. 2011). Sin embargo, para la región de Cabo Corrientes se observa una buena asociación de las oxipletas de 4.4 y 44  $\mu\text{mol/kg}$  con concentración de CID 2300 y 2150  $\mu\text{mol/kg}$ , asociada al ASsSt profundizada por la entrada del ATS.

### *Región transicional*

Como lo indica el nombre, esta región está dominada superficialmente por ATr, la cual alcanza profundidades de hasta 100 metros (Tabla 2) y es la región donde se observa mayor inestabilidad en la columna de agua (Figura 4). Se encuentra limitada septentrionalmente a los 24.5°N por la salida como frente oceánico del AGC (Figura 5 y Figura 6), mientras que la frontera sureña con la región de Cabo Corriente está limitada por la incursión del ATS (observable en la Figura 25.c con estratificación  $>1000 \text{ J/m}^3$ ). La estratificación es menor para la región transicional, con un promedio de 850  $\text{J/m}^3$  y con un gradiente decreciente de sur a norte ( $\sim 900$  a  $700 \text{ J/m}^3$ , Figura 25.c). A su vez la región se separa en dos sectores en función de la profundidad de la oxiclina. Un sector con la oxiclina más somera de todo el PTMC, con profundidades inferiores a los 35 metros (tonalidad morada en Figura 25.a) y otro sector con profundidades de oxiclina entre 40 y 60 metros de profundidad (tonalidad verde en Figura 25.a). En esta región también concurren una oxiclina somera con una capa de mezcla profunda (Figura 25.d), y es allí donde observamos las mayores intensidades de la oxiclina para todo el PTMC (Figura 25.d;  $>8 \mu\text{M/m}$ ). Godínez et al. (2010) reportan que la varianza global de la circulación observada puede estar explicada en un 30 % por la mesoescala, por lo que la presencia de remolinos puede modificar de manera relevante la distribución de las variables químicas en esta región. Aunado a la cercanía entre la oxiclina y la capa de mezcla, encontramos un levantamiento de la isopícnica de 22  $\text{kg/m}^3$  desde los 50 metros hasta la superficie, también apreciable con la isopícnica de 26  $\text{kg/m}^3$  (entre los 23.5 y 21 °N en la Figura 9.a), esto asociado al paso de un remolino ciclónico en los días previos al inicio del crucero entre los 21 °N y 107°W (Figura 27). En torno a esta sección es también donde encontramos nuestros mayores valores de pCO<sub>2</sub> superficial (Figura 14).

Se observan dos estructuras relevantes en la distribución vertical de CID y OD (Figura 26 región II). Primeramente, como lo mencionamos en el párrafo anterior, un levantamiento de aguas con mayor concentración de CID y menor OD en torno a los 23 y 22 °N, asociado a la disminución de la influencia del ATS altamente estratificada y a la presencia de un remolino ciclónico. Y posteriormente una zona de alta inestabilidad entre los 23.5 y 24.5 °N. Allí detectamos un hundimiento pronunciado de  $\sim 100$  metros de la oxipleta de 4.4  $\mu\text{mol/kg}$ , sin una perturbación equiparable aparente en la ZMC ( $>2200 \mu\text{mol/kg}$ ). Y a su vez un levantamiento desde los 50 metros de profundidad a la superficie de aguas con concentraciones por debajo de los niveles óxicos, centrado a los 24°N. En esta región encontramos la intrusión a 50 metros de profundidad de ACC y atribuimos a esta inestabilidad a que se encuentran en la frontera de un giro ciclónico y otro anticiclónico (Figura 27)

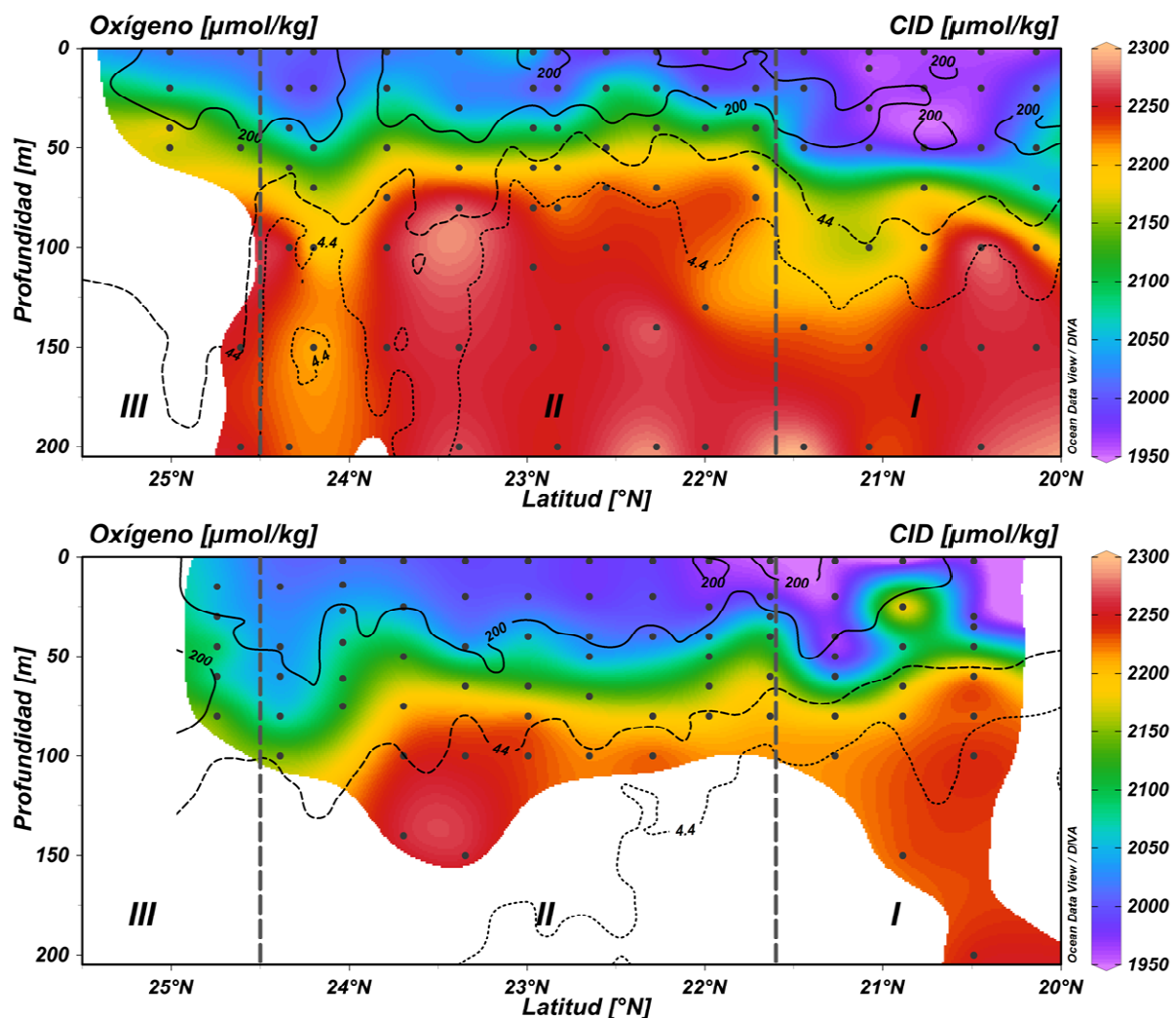
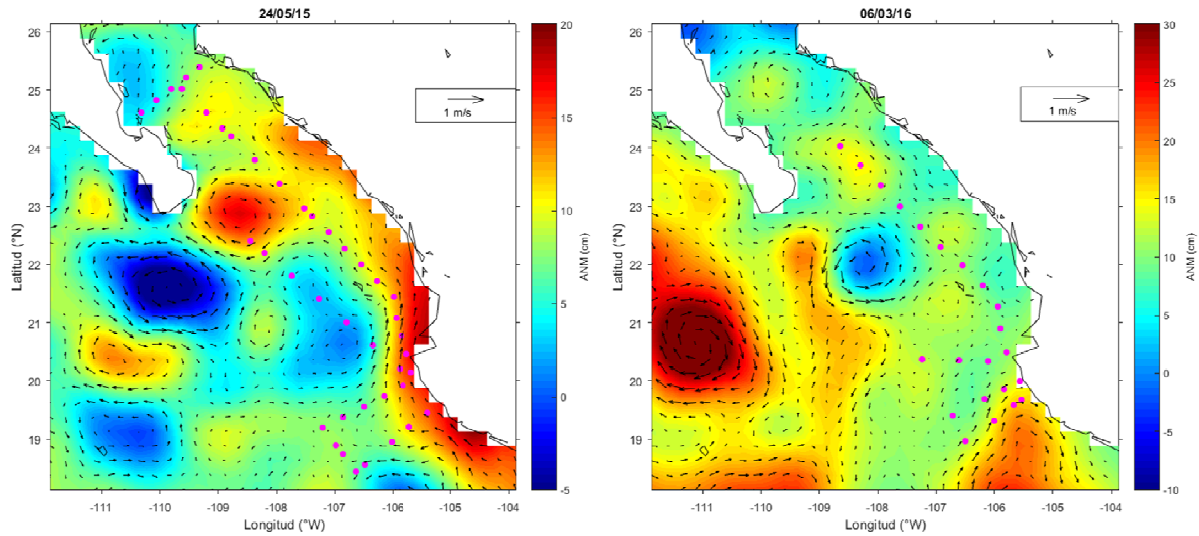


Figura 26. Perfiles verticales de carbono inorgánico disuelto (CID,  $\mu\text{mol/kg}$ ) y oxígeno disuelto (OD,  $\mu\text{mol/kg}$ ) hasta 200 metros de profundidad en el transecto 1, junio de 2015 parte superior y marzo de 2016 parte inferior. En contorno se muestra los horizontes óxicos ( $> 200 \mu\text{mol/kg}$ ), hipóxicos ( $< 44 \mu\text{mol/kg}$ ) y subóxicos ( $< 4.4 \mu\text{mol/kg}$ ). Se señalan los puntos P1 a P3 presentados en la Figura 1. Líneas punteadas verticales separan las regiones propuestas I=Cabo Corrientes, II=Transicional, III=Boca del Golfo de California.

#### *Región de la Boca del Golfo de California*

Esta región se comportó de manera muy similar a lo reportado en la literatura. Registramos la menor estratificación de todo el PTMC, con valores alrededor de los  $600 \text{ J/m}^3$ . Se registró la salida del AGC por el lado peninsular como un frente con alta salinidad (Castro et al. 2006; Collins et al. 2015) y la entrada de ATr sobre la plataforma continental frente a las costas de Sonora, con un esquema típico de circulación para esta zona (Lavín et al. 2009). La profundidad de la oxiclina es somera en comparación con la región de Cabo Corrientes, pero la intensidad de la misma es de las más bajas registradas. Esto se debe a que el AGC es más oxigenada y domina hasta profundidades por debajo de los 150 metros (Figura 26), ocasionando que el grosor de la oxiclina sea mayor en esta región. El ASsSt se presentó de manera somera del lado continental, generando una oxiclina poco profunda y con intensidades de  $5 \mu\text{M/m}$ , y en consecuencia la  $\text{pCO}_2$  superficial fue mayor para esta zona (Figura 14).





**Figura 27. Anomalia de nivel del mar (cm). Lado izquierdo junio de 2015, lado derecho marzo de 2016 .Notar la diferencia en la escala de colores. En magenta estaciones donde se realizaron las colectas de agua.**

### *Marzo 2016*

#### *Región Cabo Corrientes*

Con un ENSO en fase de decaimiento (Abellán et al. 2017; Santoso et al. 2017; Figura 19 y Figura 20) y con una estratificación inferior que en el año anterior (Figura 28.c;  $\sim 1100 \text{ J/m}^3$ ), el área de influencia de la ATS se registró hasta los  $22^\circ\text{N}$  (Figura 5.d y Figura 6.d). Al contrario de lo ocurrido durante la primavera de 2015, la menor profundidad de la oxiclina se encontró en esta región ( $< 40$  metros). La relación de la intensidad de la oxiclina con respecto a la proximidad de la capa de mezcla no es tan directa durante este año, y pese a que las intensidades máximas son inferiores en comparación al 2015 (50% menos), es en el área de influencia del ATS donde encontramos los mayores valores ( $4\text{--}2 \text{ } \mu\text{M/m}$ ; Paulmier et al. 2006 definen como intensas a  $> 1 \text{ } \mu\text{M/m}$ ). La estructura vertical de la ZMO aparenta una recuperación hacia condiciones promedio (Figura 26), donde las oxilíneas de  $40$  y  $4.4 \text{ } \mu\text{mol/kg}$  se profundizan en un gradiente sur-norte (Cepeda-Morales et al. 2013). El contenido de CID de la ZMC experimentó un decremento con respecto al año anterior (Figura 26; Tabla 3), probablemente debido a una menor presencia del ASSSt durante marzo de 2016. Este mismo decremento es observado en otra temporada por Franco et al. (2014), en términos de  $\text{pCO}_2$  para sus estaciones oceánica durante agosto de 2010.

#### *Región transicional*

La región transicional se mostró más estable que durante el año anterior, sin embargo se siguen apreciando fluctuaciones en algunas de sus características. La profundidad de la oxiclina fue variable a lo largo de toda esta región como se puede apreciar en la Figura 28.a y en las ondulaciones de la oxiplea de  $44 \text{ } \mu\text{mol/kg}$  de la Figura 26. Es una zona con una estratificación inferior a los  $900 \text{ J/m}^3$ , y la capa de mezcla varía entre  $5$  y  $15$  metros. Hay un levantamiento de la ZMC (Figura 26) principalmente por la entrada de AGC entre los  $50$  y  $100$  metros (Figura 6.d), sin embargo esta somerización no repercute de manera significativa en los valores superficiales de  $\text{pCO}_2$  (Figura 14.) La región de la Boca del Golfo de California fue limitada solo a la estructura señalada en la oración anterior.



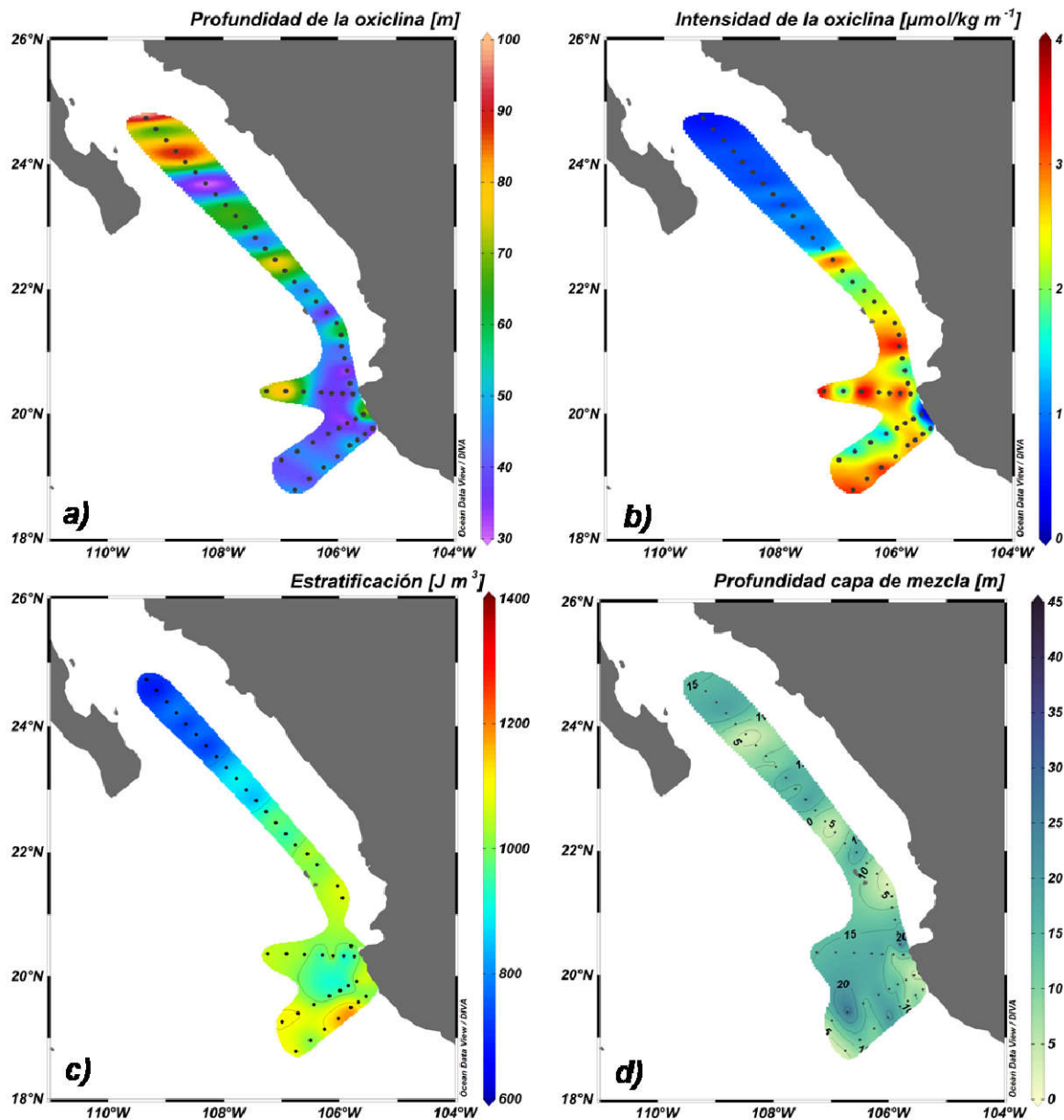


Figura 28. Distribución espacial de a) profundidad de la oxiclina (m), b) intensidad de la oxiclina ( $\mu\text{mol/kg m}^{-1}$ ), c) estratificación ( $\text{J/m}^3$ ) y d) profundidad de capa de mezcla (m), durante marzo de 2016.

## CONCLUSIONES

1. El PTMC presentó en su porción sur un dominio superficial de ATS estacionalmente anómala, como producto de un ENSO en desarrollo. Su presencia modificó la estructura de la ZMO erosionado parcialmente e intensificando la oxiclina, que a su vez repercutió en la estructura de la ZMC. Esta modificación en la estructura vertical del CID fue potenciada por la presencia de vientos intensos generados por la cercanía del huracán Blanca. Producto de esto se obtuvieron valores elevados de  $\text{pCO}_2$  y los mayores flujos de  $\text{CO}_2$  reportados en costas mexicanas (máximos de  $60 \text{ mmol/m}^2\text{d}$ ).
2. En su porción media la dinámica del sistema de carbono estuvo modulada por procesos de mesoescala. Esta región dominada por ATr presentó intrusiones subsuperficiales de ACC más oxigenada, que profundizaron la ZMO sin alterar la distribución de la ZMC. La presencia de remolinos ciclónicos

ocasionaron un levantamiento de isopícnas en la parte central y un enriquecimiento de CID en la parte superficial. En conjunto con vientos intensos también se registraron flujos intensos  $\text{CO}_2$ .

3. La porción norte estuvo dominada por la salida del AGC por la parte peninsular, donde la ZMO se profundizó por debajo de los 200 metros, y por la entrada de ATr por la parte continental. En esta última el ASsSt estuvo cercana a la superficie ocasionando flujos relevantes de  $\text{CO}_2$ . El flujo promedio de  $\text{CO}_2$  para esta temporada en el PTMC fue de  $18.36 \text{ mmol/m}^2\text{d}$
4. Posteriormente a estos eventos, en el invierno de 2016 se observó una restitución de las condiciones promedio de la estructura de la ZMO. Las concentraciones de CID decrecieron hacia el interior del ASsSt y el PTMC presentó un balance neto de flujos de  $\text{CO}_2$  cercano al equilibrio con la atmósfera ( $-0.14 \text{ mmol/m}^2\text{d}$ )
5. Existe una fuerte regionalización de los factores físicos que controlan la distribución del oxígeno disuelto y las variables del sistema de  $\text{CO}_2$ , modulada principalmente por la advección de masas de agua en la porción norte y sur, y por la presencia de procesos de mesoescala en la porción central. Se destaca la fuerte contribución del efecto de los huracanes en los flujos de  $\text{CO}_2$ , a partir de un horizonte superficial con altas concentraciones de CID producto de procesos de mesoescala.

## LITERATURA CITADA

- Abellán, E. et al., 2017. Distinctive role of ocean advection anomalies in the development of the extreme 2015–16 El Niño. *Climate Dynamics*, 0(0), p.0. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00382-017-4007-0>.
- Apango-Figueroa, E. et al., 2015. Larval fish habitats in a mesoscale dipole eddy in the gulf of California. *Deep-Sea Research Part I*, 103, pp.1–12. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2015.05.005>.
- Ávila López, M. del C., 2017. *Dinámica de flujos de carbono en Bahía San Quintín durante ciclos estacionales anómalos de surgencias costeras*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Boyer, T.P. et al., 2013. WORLD OCEAN DATABASE 2013, NOAA Atlas NESDIS 72. *Sydney Levitus, Ed.; Alexey Mishonoc, Technical Ed.*, NOAA Atlas, p.209 pp. Available at: [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html%5Cnftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOD/DOC/wod\\_intro.pdf](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html%5Cnftp://ftp.nodc.noaa.gov/pub/WOD/DOC/wod_intro.pdf).
- Castro, R. et al., 2006. Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(1), pp.188–200.
- Castro, R. & Durazo, R., 2000. Variación estacional de la temperatura y salinidad en la entrada del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas*, 26, pp.561–583.
- Cepeda-Morales, J. et al., 2009. Efecto de la zona del mínimo de oxígeno en el segundo máximo de clorofila en el Pacífico Oriental Tropical Mexicano. *Ciencias Marinas*, 35, pp.389–403.
- Cepeda-Morales, J. et al., 2013. The mechanisms involved in defining the northern boundary of the shallow oxygen minimum zone in the eastern tropical Pacific Ocean off Mexico. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 76, pp.1–12.
- Cervantes Díaz, G.Y., 2013. *Variabilidad temporal del sistema del CO<sub>2</sub> y nutrientes frente a las costas de Baja California*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Chapa-Balcorta, C. et al., 2015. Influence of post-Tehuano oceanographic processes in the dynamics of the CO<sub>2</sub> system in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(12), pp.7752–7770. Available at: [doi.wiley.com/10.1002/2015JC011249](http://doi.wiley.com/10.1002/2015JC011249).
- Clayton, T.D. & Byrne, R.H., 1993. Spectrophotometric seawater pH measurements□: total hydrogen results. *Deep-Sea Research*, 40(10), pp.2115–2129.
- Collins, C.A., Castro, R. & Mascarenhas, A., 2015. Properties of an upper ocean front associated with water mass boundaries at the entrance to the Gulf of California, November 2004. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 119, pp.48–60. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967064514001647> [Accessed September 25, 2015].
- Cortés Lara, M.D.C., Cortés Altamirano, R. & Sierra-Beltrán, A.P., 2004. Presencia de *Cochlodinium catenatum* (Gymnodiniales: Gymnodiniaceae) en mareas rojas de Bahía de Banderas, Pacífico Mexicano. *Revista de Biología Tropical*, 52(SUPPL. 1), pp.35–49.
- Czeschel, R., Stramma, L. & Johnson, G.C., 2012. Oxygen decreases and variability in the eastern equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(11), pp.1–12.
- Degrandpre, M.D. et al., 2002. Air – sea CO<sub>2</sub> fluxes on the US Middle Atlantic Bight. , 49, pp.4355–4367.
- Dickson, A.G., Afghan, J.D. & Anderson, G.C., 2003. Reference materials for oceanic CO<sub>2</sub> analysis: a method for the certification of total alkalinity. *Marine Chemistry*, 80(2–3), pp.185–197. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304420302001330>.
- Dickson, A.G., Sabine, C.L. & Christian, J.R., 2007. *Guide to Best Practices for Ocean CO<sub>2</sub> Measurements*, PICES Special Publication.
- Douglas, N.K. & Byrne, R.H., 2017. Achieving accurate spectrophotometric pH measurements using unpurified meta-cresol purple. *Marine Chemistry*, 190, pp.66–72. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marchem.2017.02.004>.
- Fernández-Álamo, M.A. & Färber-Lorda, J., 2006. Zooplankton and the oceanography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, pp.318–359.
- Fiedler, P.C. et al., 2013. Pycnocline variations in the eastern tropical and north pacific, 1958–2008. *Journal of Climate*, 26(2), pp.583–599.
- Fiedler, P.C. & Talley, L.D., 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, pp.143–180.
- Filonov, A.E. et al., 2000. Variabilidad Estacional de los Campos de Temperatura y Salinidad de la zona Costera

- de los Estados de Jalisco y Colima, Mexico. *Seasonal variability of the temperature and salinity fields in the coastal zone of the states of Jalisco and Colima, Mexico. (English)*, 26(2), pp.303–321. Available at: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=8309106&lang=es&site=ehost-live>.
- Franco, A.C. et al., 2014. Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes above the stratified oxygen minimum zone in the coastal region off Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, pp.1–15.
- Frankignoulle, M. & Borges, A. V., 2001. European continental shelf as a significant sink for atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(3), pp.569–576.
- Friis, K., Körtzinger, A. & Wallace, D.W.R., 2003. The salinity normalization of marine inorganic carbon chemistry data. *Geophysical Research Letters*, 30(2), pp.1–4.
- Fuenzalida, R. et al., 2009. Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean. *Deep-Sea Research Part II*, 56(16), pp.992–1008.
- Godínez, V.M. et al., 2010. Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(4), pp.1–15.
- Gómez-Valdivia, F., Parés-Sierra, A. & Flores-Morales, A.L., 2015. The Mexican Coastal Current: A subsurface seasonal bridge that connects the tropical and subtropical Northeastern Pacific. *Continental Shelf Research*, 110(October), pp.100–107.
- Grasshoff, K., Kremling, K. & Ehrhardt, M., 1999. *Methods of seawater analysis* Third edit. Wiley-Vch, ed., Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Automated+chemical+analysis#0>.
- Hartmann, D.L., 2015. Pacific sea surface temperature and the winter of 2014. *Geophysical Research Letters*, pp.1894–1902.
- Hernández-Ayón, J.M. et al., 2013. Dynamics of dissolved inorganic carbon in the Midriff Islands region of the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 39(2), pp.183–201.
- Hernández-Ayón, J.M. et al., 2007. Variabilidad del CO<sub>2</sub> total durante eventos de surgencia en Bahía San Quintín, Baja California, México. In *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones Científicas y de Educación de Ensenada, pp. 187–200.
- Hernández-Ayón, J.M., Belli, S.L. & Zirino, A., 1999. pH, alkalinity and total CO<sub>2</sub> in coastal seawater by potentiometric titration with a difference derivative readout. *Analytica Chimica Acta*, 394(1), pp.101–108.
- Hofmann, A.F. et al., 2011. Hypoxia by degrees: Establishing definitions for a changing ocean. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(12), pp.1212–1226. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2011.09.004>.
- Hofmann, E.E. et al., 2011. Modeling the dynamics of continental shelf carbon. *Annual review of marine science*, 3, pp.93–122.
- IOC, SCOR & IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. *Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56*, (June), p.196.
- Ito, T. & Deutsch, C., 2013. Variability of the oxygen minimum zone in the tropical North Pacific during the late twentieth century. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(4), pp.1119–1128.
- Kara, A.B., Rochford, P.A. & Hurlburt, H.E., 2000. An optimal definition for ocean mixed layer depth. *Journal of Geophysical Research*, 105(15), pp.803–16.
- Kurczyn, J.A. et al., 2012. Mesoscale eddies in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C10), p.n/a–n/a. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2012JC007970>.
- Lavín, M.F. et al., 2013. Mesoscale eddies in the southern Gulf of California during summer: Characteristics and interaction with the wind stress. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(February), pp.1367–1381.
- Lavín, M.F. et al., 2009. SST, thermohaline structure, and circulation in the southern gulf of California in June 2004 during the north american monsoon experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114, pp.1–22.
- Leon-Chavez, C. a. et al., 2010. Larval fish assemblages and circulation in the Eastern Tropical Pacific in Autumn and Winter. *Journal of Plankton Research*, 32, pp.397–410. Available at: <http://www.plankt.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1093/plankt/fbp138>.
- Lewis, E. & Wallace, D., 1998. Program developed for CO<sub>2</sub> system calculations. *Ornl/Cdiac-105*, pp.1–21. Available at: <http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/co2rprtnbk.html>.

- Longhurst, A., 1995. Seasonal cycles of pelagic production and consumption. , 36(95), pp.77–167.
- Lueker, T.J., Dickson, A.G. & Keeling, C.D., 2000. Ocean pCO<sub>2</sub> calculated from dissolved inorganic carbon, alkalinity, and equations for K<sub>1</sub> and K<sub>2</sub>: Validation based on laboratory measurements of CO<sub>2</sub> in gas and seawater at equilibrium. *Marine Chemistry*, 70(1–3), pp.105–119.
- Maske, H. et al., 2010. Inorganic carbon and biological oceanography above a shallow oxygen minimum in the entrance to the Gulf of California in the Mexican Pacific. *Limnology and Oceanography*, 55(2), pp.481–491.
- McDougall, T.J. & Barker, P.M., 2017. *Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox*, SCOR/IAPSO WG.
- Morales, C.E., Hormazábal, S.E. & Blanco, J., 1999. Interannual variability in the mesoscale distribution of the depth of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern Chile (18–24S): Implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. *Journal of Marine Research*, 57(6), pp.909–932. Available at: <http://www.ingentaselect.com/rpsv/cgi-bin/cgi?ini=xref&body=linker&reqdoi=10.1357/002224099321514097>.
- Norzagaray López, C.O., 2015. *Estimación de la tasa de calcificación en tres comunidades coralinas del Pacífico mexicano*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Oliva Méndez, N.L., 2012. *Evaluación del estado de saturación de aragonita en las costas de Baja California, México*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Parés-Sierra, A. et al., 2003. Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 30(6), pp.1–4. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2002GL016716>.
- Park, P.K., 1969. Oceanic CO<sub>2</sub> system: an evaluation of ten methods of investigation. *Limnology & Oceanography*, XIV(March), pp.179–186.
- Paulmier, A. et al., 2006. Maintaining of the Eastern South Pacific Oxygen Minimum Zone (OMZ) off Chile. *Geophysical Research Letters*, 33(20), pp.2–7.
- Paulmier, a., Ruiz-Pino, D. & Garçon, V., 2011. CO<sub>2</sub> maximum in the oxygen minimum zone (OMZ). *Biogeosciences*, 8, pp.239–252.
- Portela, E. et al., 2016. Water masses and circulation in the tropical Pacific off central Mexico and surrounding areas. *Journal of Physical Oceanography*, (2010), pp.1–36.
- Reimer, J.J. et al., 2013. Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the near-shore and intertidal zones influenced by the California Current. *Journal Geophysical Research: Oceans*, 118, pp.1–16.
- Ribas-ribas, M. et al., 2011. Estuarine , Coastal and Shelf Science Effects of upwelling , tides and biological processes on the inorganic carbon system of a coastal lagoon in Baja California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95(4), pp.367–376. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2011.09.017>.
- Sánchez-Velasco, L. et al., 2017. Hydrographic and fish larvae distribution during the “Godzilla El Niño 2015–2016” in the northern end of the shallow oxygen minimum zone of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Journal Geophysical Research: Oceans*, 122.
- Santoso, A., McPhaden, M.J. & Cai, W., 2017. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/16 El Niño. *Reviews of Geophysics*. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/2017RG000560>.
- Stramma, L. et al., 2016. Observed El Niño conditions in the eastern tropical Pacific in October 2015. *Ocean Science*, pp.861–873.
- Stramma, L. et al., 2010. Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57, pp.587–595. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2010.01.005>.
- Takahashi, T. et al., 2002. Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub>, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(9–10), pp.1601–1622.
- Takahashi, T. et al., 1993. Seasonal variation of CO<sub>2</sub> and nutrients in the high-latitude surface oceans: A comparative study. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4), pp.843–878. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/93GB02263>.
- Thomas, H. et al., 2004. Enhanced Open Ocean Storage of CO<sub>2</sub> from Shelf Sea Pumping. *Science*, 304, pp.1005–1008.
- Thyng, K.M. et al., 2016. True colors of oceanography: Guidelines for effective and accurate colormap selection. *Oceanography*, 29(3), pp.9–13.
- Tsunogai, S., Watanabe, S. & Sato, T., 1999. Is there a “continental shelf pump” for the absorption of atmospheric CO<sub>2</sub>? *Tellus*, 51B, pp.701–712.

- Wanninkhof, R., 2014. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnology & Oceanography Methods*, 12, pp.351–362.
- Wanninkhof, R.H., 1992. Relationship between wind speed and gas exchange. *Journal of Geophysical Research*, 97(92), pp.7373–7382.
- Weiss, R.F., 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry*, 2, pp.203–215.
- Xu, C.Y. & Singh, V.P., 1998. Dependence of Evaporation on Meteorological Variables at Tifferent Time-Scales and Intercomparison of Estimation Methods. *Hydrological Processes*, 12(3), pp.429–442. Available at: [http://folk.uio.no/chongyux/papers\\_SCI/HYP\\_3.pdf](http://folk.uio.no/chongyux/papers_SCI/HYP_3.pdf).
- Yu, L. & Weller, R.A., 2007. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice- free oceans (1981-2005). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(4), pp.527–539.