

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



Facultad de Ciencias Marinas

## DINÁMICA DE LA QUÍMICA DEL CARBONO DURANTE EVENTOS ESTACIONALES E INTERANUALES EN UN OBSERVATORIO DE MONITOREO COSTERO EN LAS COSTAS DE BAJA CALIFORNIA.

T E S I S

que para obtener el título de

O C E A N Ó L O G O

presenta

**Gabriela Yareli Cervantes Díaz**

## RESUMEN

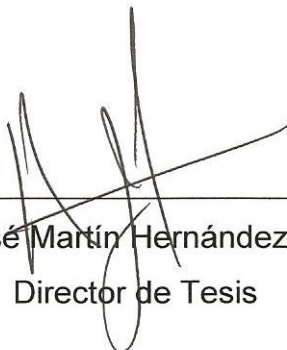
En enero del 2006, se inició la caracterización fisicoquímica de la estación Ensenada, considerada como un Observatorio de Monitoreo Costero (OMC). Este sitio se localiza a tres km de la costa de la Península de Baja California, México y a ocho km de la estación 100.30 del programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California). El propósito de este trabajo fue realizar una caracterización temporal de las condiciones físicas y de las variables del sistema del  $\text{CO}_2$  con una serie continua de 3 años de datos en la estación Ensenada. Con una frecuencia bimensual se realizaron 17 cruceros a la estación Ensenada para lances de CTD y la recolecta de muestras discretas a las profundidades estándares. En cada ocasión se tomaron muestras para la determinación de la alcalinidad total (AT), pH, oxígeno disuelto (OD), carbón inorgánico disuelto (CID), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y salinidad. Los resultados mostraron la presencia de dos condiciones interanuales oceanográficas muy particulares: 1) La primera se asoció a la presencia de un mayor volumen de Agua Subártica (ASA) durante el 2006, 2) posteriormente en el 2007, fue el inicio de un periodo anómalo asociado con la transición a una condición La Niña (LN), la cual se presentó de manera más intensa en el 2008. Durante el 2006, a una profundidad de 80 m se observaron valores de pH  $\sim 7.75$ , CID  $\sim 2175 \mu\text{mol/kg}$ ,  $\text{pCO}_2 \sim 840 \mu\text{atm}$ , mientras que el OD se detectó a una profundidad de  $\sim 70$  m con valores de  $\sim 120 \mu\text{M}$  y finalmente la profundidad de omega de aragonita ( $\Omega_{\text{arag}}$ )  $< 1$  se detectó por debajo de los 90 m. Además, en las aguas superficiales de la estación Ensenada se encontraron valores de  $\Delta\text{pCO}_2$  negativos o cerca del valor en equilibrio ( $387 \mu\text{atm}$ ) lo cual indica un flujo de  $\text{CO}_2$  desde la atmósfera hacia el océano. En el 2007, ocurrieron surgencias más intensas que en el 2006 lo que provocó un ascenso de aguas enriquecidas en CID hacia las capas superficiales con valores de  $\text{pCO}_2$  más altos, con bajos pHs, aguas subsaturadas en  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ) en conjunto se detectaron a  $\sim 60$  m, además se observaron bajas concentraciones de oxígeno ( $\sim 120 \mu\text{M}$ ) detectadas a  $\sim 20$  m. Esta condición generó valores del  $\Delta\text{pCO}_2$  positivos ( $\sim 150 \mu\text{atm}$ ) lo cual sugiere ser una fuente de  $\text{CO}_2$  hacia la atmósfera. Finalmente, en el 2008 durante LN, a una profundidad de  $\sim 30$  m se observó un mayor enriquecimiento en la columna de agua de CID ( $\sim 2175 \mu\text{mol/kg}$ ),  $\text{pCO}_2$  ( $\sim 940 \mu\text{atm}$ ), pH ( $\sim 7.7$ ) y bajas concentraciones de oxígeno ( $\sim 120 \mu\text{M}$ ). Bajo esta condición, también se presentó un ascenso de aguas subsaturadas en carbonatos ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ) cerca de la plataforma ( $\sim 30$  m). Este ascenso de aguas ricas en carbono generó valores positivos de  $\Delta\text{pCO}_2$ , lo cual indicó que el sistema se comportó como una fuente de  $\text{CO}_2$  atmosférico durante esta condición.

# **DINÁMICA DE LA QUÍMICA DEL CARBONO DURANTE EVENTOS ESTACIONALES E INTERANUALES EN UN OBSERVATORIO DE MONITOREO COSTERO EN LAS COSTAS DE BAJA CALIFORNIA.**

**Tesis de licenciatura en Oceanología**

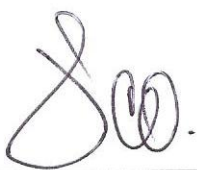
Presenta

**GABRIELA YARELI CERVANTES DÍAZ**



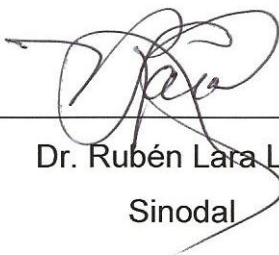
---

Dr. José Martín Hernández Ayón  
Director de Tesis



---

Dr. Francisco Delgadillo Hinojosa  
Sinodal



---

Dr. Rubén Lara Lara  
Sinodal



---

Dr. Reginaldo Durazo Arvizu  
Sinodal

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profe Martín, por toda la comprensión, paciencia y tiempo dedicado durante la realización de esta travesía. También por los consejos y apoyo durante esta experiencia, muchísimas gracias.

A mis sinodales Dr. Francisco Delgadillo, Dr. Reginaldo Durazo y Dr. R. Lara Lara, por los comentarios siempre tan convenientes.

Al grupo del seminario de oceanografía química, por las observaciones tan acertadas que ayudaron a mejorar y enriquecer este trabajo.

A Piña y Ángela por estar conmigo en las buenas y en las malas, por aguantarme y ser las hermanas que pude escoger gracias.

A Ana banana, Diana, Érica, Dany, Angy y a todos mis compañeros de generación, gracias por permitirme compartir estos 5 años con ustedes y aguantarme todo este tiempo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al proyecto FLUCAR por el apoyo económico brindado durante la realización de esta tesis.

## DEDICATORIA

### PARA MI MAMÁ Y MI PAPÁ

Por darme la vida, una maravillosa formación, por su ternura y todo su amor, por contagiarme de sus mayores fortalezas. Mamá, tú me pusiste como ejemplo el ser “luchona” y decidida, y pelear contra la adversidad, me enseñaste a levantarme después de cada tropiezo y a tener siempre un colchón para los tiempos difíciles. Papá, me enseñaste a ser perseverante y paciente, a ponerme a pasos fijos para alcanzar mis metas, a ver los problemas con la cabeza fría y ver cómo las situaciones tienen solución, y finalmente por enseñarme y guiarme por la premisa de que “toda disciplina siempre tiene su recompensa”.

Esto es fruto de su apoyo y ejemplo.

## ÍNDICE

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                                                                                  | 1  |
| 2. ANTECEDENTES .....                                                                                                 | 3  |
| 2.1. Descripción general .....                                                                                        | 3  |
| 2.2. Estudios relacionados con la dinámica del CID en eventos interanuales (El Niño-La Niña).....                     | 5  |
| 3. Área de estudio .....                                                                                              | 6  |
| 4. TÉORÍA DE LA QUÍMICA DEL CARBONO.....                                                                              | 8  |
| 5. OBJETIVO.....                                                                                                      | 10 |
| 5.1. Objetivos específicos .....                                                                                      | 10 |
| 6. HIPÓTESIS .....                                                                                                    | 10 |
| 7. METODOLOGÍA.....                                                                                                   | 11 |
| 7.1. Colecta de datos en la estación 100.30 de la línea 100 de IMECOCAL .....                                         | 11 |
| 7.2. Colecta de muestras en el OMC .....                                                                              | 11 |
| 7.3. Análisis de pH a 25°C .....                                                                                      | 12 |
| 7.4. Análisis de Carbón Inorgánico Disuelto (CID).....                                                                | 13 |
| 7.5. Análisis de Alcalinidad Total (AT) .....                                                                         | 14 |
| 7.6. Análisis de Oxígeno (OD) .....                                                                                   | 15 |
| 7.7. Análisis de los datos obtenidos .....                                                                            | 16 |
| 8. RESULTADOS .....                                                                                                   | 17 |
| 8.1. Variación temporal de la temperatura y salinidad en la estación 100.30 .....                                     | 17 |
| 8.2. Observaciones hidrográficas en la Estación Ensenada .....                                                        | 19 |
| 8.2.1 Series de tiempo de salinidad, temperatura y densidad .....                                                     | 19 |
| 8.2.2 Masas de Aguas.....                                                                                             | 22 |
| 8.2.2.1 Intrusión del Agua Subártica (ASA) .....                                                                      | 22 |
| 8.2.2.2 Transición a La Niña.....                                                                                     | 23 |
| 8.2.2.3 La Niña 2008 .....                                                                                            | 23 |
| 8.2.3 Surgencias .....                                                                                                | 26 |
| 8.3. Distribución de las variables químicas y biológicas.....                                                         | 27 |
| 8.3.1 Variables del sistema del CO <sub>2</sub> .....                                                                 | 27 |
| 8.3.1.1 pH.....                                                                                                       | 27 |
| 8.3.1.2 CID .....                                                                                                     | 28 |
| 8.3.1.3 pCO <sub>2</sub> .....                                                                                        | 29 |
| 8.3.1.4 Variación temporal de omega de aragonita ( $\Omega_{\text{arag}}$ ) y calcita ( $\Omega_{\text{cal}}$ ) ..... | 31 |
| 8.3.2 Distribución del oxígeno y fluorescencia .....                                                                  | 32 |
| 9. DISCUSIÓN.....                                                                                                     | 35 |
| 9.1. Variabilidad temporal de la temperatura y la salinidad.....                                                      | 36 |
| 9.2. Distribución de las variables del sistema del CO <sub>2</sub> .....                                              | 40 |
| 9.3. Variabilidad temporal del omega aragonita y oxígeno disuelto. ....                                               | 44 |
| 9.4. Fuente o Sumidero de CO <sub>2</sub> .....                                                                       | 46 |
| 10. CONCLUSIONES.....                                                                                                 | 51 |
| 11. LITERATURA CITADA .....                                                                                           | 53 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. a) Mediciones de temperaturas superficiales entre 1997 y 1999 en las costas de Monterey CA. La línea continua muestra la temperatura climatológica de 10 años de datos, b) $\Delta pCO_2$ superficial de julio de 1997 a enero de 2000 (Figura tomada de Friederich <i>et al.</i> , 2002).....                                                   | 6  |
| Figura 2.- Área de estudio del la estación de muestreo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 7  |
| <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
| Figura 3. Malla de muestreo del proyecto IMECOCAL (en el círculo rojo se muestra la estación 100.30).....                                                                                                                                                                                                                                                  | 8  |
| Figura 4. Series de tiempo de a) temperatura y b) salinidad de los datos históricos generados en la estación 100.30 del 1998 al 2008 de la región IMECOCAL.....                                                                                                                                                                                            | 19 |
| Figura 5. Series de tiempo de (a) temperatura, (b) salinidad y (c) sigma-t en la Estación Ensenada durante el período de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008.....                                                                                                                                                                                        | 21 |
| Figura 6. Diagramas de temperatura-salinidad (T-S) de la estación Ensenada durante a) 2006, b) 2007 y c) 2008. Cada grafico muestra el T-S climatológico anual generado en base a un promedio de 10 años de la estación 100.30 de la región IMECOCAL.....                                                                                                  | 25 |
| Figura 7. Índice de surgencia mensual en $m^3 \cdot s^{-1} \cdot (100m)^{-1}$ de la costa para el período 2006-2009 a una posición $30^\circ N$ (fuente: <a href="http://www.pfel.noaa.gov">http://www.pfel.noaa.gov</a> ). Las líneas punteadas muestran los periodos de muestreos; en rojo los máximos índices de surgencia y en azul los más bajos..... | 26 |
| Figura 8. Serié de tiempo de las variables del Sistema del $CO_2$ : a) pH <i>In situ</i> , b) Carbono Inorgánico Disuelto (CID) ( $\mu mol/kg$ ) y c) $pCO_2$ ( $\mu atm$ ) de la columna de agua en la estación Ensenada, de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008.....                                                                                   | 30 |
| Figura 9. Serié de tiempo de a) $\Omega$ aragonita y b) $\Omega$ calcita de la columna de agua en la estación Ensenada, de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008.....                                                                                                                                                                                      | 32 |
| Figura 10. Serié de tiempo de la concentración de oxígeno disuelto ( $\mu M$ ) en la columna de agua en la estación Ensenada, de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008.....                                                                                                                                                                                | 34 |
| Figura 11. Serié de tiempo de la fluorescencia (unidades relativas) de la columna de agua en la estación Ensenada, de Septiembre del 2007 a Noviembre del 2008.....                                                                                                                                                                                        | 35 |
| Figura 12. Transecto climatológico de la línea 100 del mes de abril de IMECOCAL (a) y el medido en abril del 2008 de la línea 100 frente a las costas de Ensenada, B.C.(b)..                                                                                                                                                                               | 38 |

Figura 13. Diagramas de a) T-S vs CID y b) Profundidad-Salinidad vs CID (dentro de los recuadros se observa los datos de los periodos de abril y julio del 2006-2008).....42

Figura 14. Variación estacional del  $\Delta p\text{CO}_2$  superficial durante el período de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008 frente a las costas de Ensenada, B.C (los puntos negros representan los valores del  $\Delta p\text{CO}_2$  y los azules a la temperatura).....49

Figura 15. Serié de tiempo de  $\Delta p\text{CO}_2$  (línea negra) y temperatura (línea azul) en la estación Ensenada de Agosto del 2008 a Noviembre del 2009.....50

Figura 16. El esquema representa la dinámica del carbono para la región de Ensenada (BC), la cual pretende resaltar el flujo de  $\text{CO}_2$  entre océano-atmósfera producto de los procesos de surgencia (panel superior). La zona abarca ~ 80 km, posterior a esta distancia se observa como los altos valores de  $\text{CO}_2$  disminuyen producto del consumo de carbono por el fitoplancton hasta llegar a convertirse en un sumidero de carbono. En contraste, en los primeros 20 km se observa como esta zona que se comporta como fuente de carbono hacia la atmosfera producto del transporte subsuperficial cerca de la costa (Figura modificada de Chávez *et al.*, 2007).....50



## 1. INTRODUCCIÓN

Se ha descrito que la biogeoquímica del carbono en el océano, tiene variaciones no solo estacionales sino también interanuales asociadas principalmente a eventos como El Niño (EN) y La Niña (LN). Este tipo de eventos que se repiten aproximadamente cada 3 a 7 años, generan forzamientos de carácter regional en las variables físicas, químicas y biológicas en el Pacífico Nororiental (PNE), incluyendo el Sistema de la Corriente de California (Schwing *et al.*, 1997; Lynn *et al.*, 1998).

Frente a la costa oeste de la Península de Baja California (BC) se localiza el límite sureño del Sistema de la Corriente de California (SCC). Aquí, se presentan muchas de las características que identifican a un sistema de circulación de frontera oriental, como son a) la surgencia costera en respuesta a vientos a lo largo de la costa, b) un flujo predominante hacia el ecuador en la superficie como respuesta al mecanismo forzante, y c) una contracorriente subsuperficial dirigida hacia el polo que fluye entre 200 y 400 m de profundidad a lo largo del quiebre de la plataforma continental (Durazo *et al.*, 2010). Además, en esta zona también confluyen la masa de Agua Subártica (ASA) que transporta la Corriente de California (CC), el Agua Tropical Superficial (ATS) y el Agua Subtropical Superficial (AStS) (Hickey, 1998; Lynn y Simpson, 1987). Sin embargo, las propiedades fisicoquímicas de la columna de agua frente a las aguas costeras de Baja California, están determinadas principalmente por el ASA, caracterizada por su mínimo en salinidad y alto contenido de oxígeno disuelto, y por el Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE), definida por su alta salinidad y nutrientes, y su bajo contenido de oxígeno disuelto (Reid *et al.*, 1958)

Las fronteras geográficas entre las masas de agua presentes cambian en escalas temporales muy diversas, desde semanales hasta decadales (Durazo *et al.*, 2010). Además, se ha reportado que los cambios en las fronteras y la mezcla que resulta de su interacción, establecen muchas de las condiciones que modulan los cambios en la diversidad biológica y química de la región (Bograd y Lynn, 2003; Gaxiola-Castro *et al.*, 2008; Durazo, 2009). Particularmente, eventos como El Niño/La Niña los cuales se han caracterizado por presentar periodos cálidos, fríos y/o salinos a lo largo de la costa de BC, están modulados por fluctuaciones de largo periodo en los patrones de viento (Durazo, 2009). Al respecto, se han reportado efectos en el

ecosistema pelágico para la región sur del SCC, en respuesta a las fluctuaciones de gran escala de los forzamientos atmosféricos (Gaxiola *et al.* 2008). Estos efectos se han evidenciado en los cambios de las especies que componen la comunidad del zooplancton (Lavaniegos *et al.* 2002).

Adicionalmente, los sistemas de surgencias costeros a lo largo de la costa oeste de América del norte, también están fuertemente influenciadas por El Niño y La Niña y se desconoce los efectos que puedan causar estos fenómenos sobre la dinámica del CO<sub>2</sub>. Las surgencias, al igual que transportan subsuperficialmente aguas ricas en nutrientes y CO<sub>2</sub> hacia los ecosistemas costeros, también transportan aguas pobres en oxígeno y de bajo pH hacia las plataformas continentales, donde la respiración de la materia orgánica puede reducir aún más el contenido de oxígeno disuelto (OD) de la columna de agua, por lo tanto están sujetos al riesgo de hipoxia o anoxia (Chan *et al.*, 2008), ya que la combinación de aguas de pH bajo y aguas hipóxicas, potencialmente pueden provocar un impacto directo en el ecosistema biológico.

El conocimiento generado sobre la variabilidad temporal de las condiciones oceanográficas en la parte sur del SCC es escaso comparado con las regiones frente a las costas de California, EUA. Al respecto, un monitoreo continuo de las aguas costeras de Baja California, no sólo permite tener una base de datos continua y completa en el tiempo de una zona dinámicamente activa, sino además, se utilizaría como una base de datos para el desarrollo de futuros modelos biogeoquímicos en el contexto global de un cambio climático. En el presente trabajo se realizó una caracterización temporal de las condiciones físicas de una serie continua de 3 años de datos. Además, se determinó la variabilidad temporal e interanual en las variables del sistema del CO<sub>2</sub> obtenida en el observatorio costero (estación Ensenada), una zona influenciada por los frecuentes e intensos eventos de surgencia costera. Este estudio permitirá generar una base de datos histórica de las condiciones químicas en un sitio costero que esta bajo la influencia de la Corriente de California.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Descripción General.

El SCC se encuentra conformado básicamente por la Corriente de California, con un flujo superficial dirigido hacia el ecuador durante todo el año y por la Contracorriente Subsuperficial (CcSs), con un flujo subsuperficial con dirección hacia el polo, lo que genera una marcada variabilidad estacional e interanual (Hickey 1979, Lynn y Simpson 1987). El estudio de la región de la CC frente a la costa de la península de BC se inició a finales de 1997 por el Programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), el cual cubre un monitoreo cuatrimestral de esta región. En la década de 1997 a 2008 el proyecto IMECOCAL ha contribuido con una serie de estudios, en los cuales se han evidenciado una serie de eventos de gran escala. Por ejemplo, en 1997-1998 se detectó la presencia del evento EN, el cual se caracterizó por mostrar anomalías positivas de salinidad y temperatura debido al calentamiento de la columna provocado por una expansión de la CcSs lo que permitió la entrada de agua subtropical. Posteriormente, se presentó un evento de LN caracterizada por un enfriamiento del agua superficial de la costa de BC, debido a la presencia del ASA y que duró al menos hasta el año 2000 (Schwing *et al.*, 2000; Durazo *et al.*, 2001). Como consecuencia, este evento provocó un cambio en las especies que componen la comunidad del zooplancton (Lavaniegos *et al.* 2002).

Para el 2002-2003 se detectó una influencia de un EN débil lo que generó aguas menos saladas y frías cerca de la superficie durante el 2002 y un leve calentamiento en el 2003 (Venrick *et al.*, 2003; Durazo *et al.*, 2005). Durante dicho evento se observó un enfriamiento de los 100 m superficiales de la columna de agua entre el 2002 y 2006 asociado a la entrada del ASA que pudo haber enmascarado al evento EN del 2003 (Durazo *et al.*, 2005, Freeland *et al.*, 2003; Bograd y Lynn, 2003; Goericke *et al.*, 2005, Peterson *et al.*, 2006). Esta intrusión casi simultáneamente con dos eventos (El Niño y el ASA) ha sido difícil de explicar, así como la coexistencia de dos fenómenos con causas y efectos tan opuestos (Lagerloef *et al.*, 2003).

Desde el punto de vista biológico se observó un incremento en algunas especies de zooplancton para la región norte en comparación con la región central de

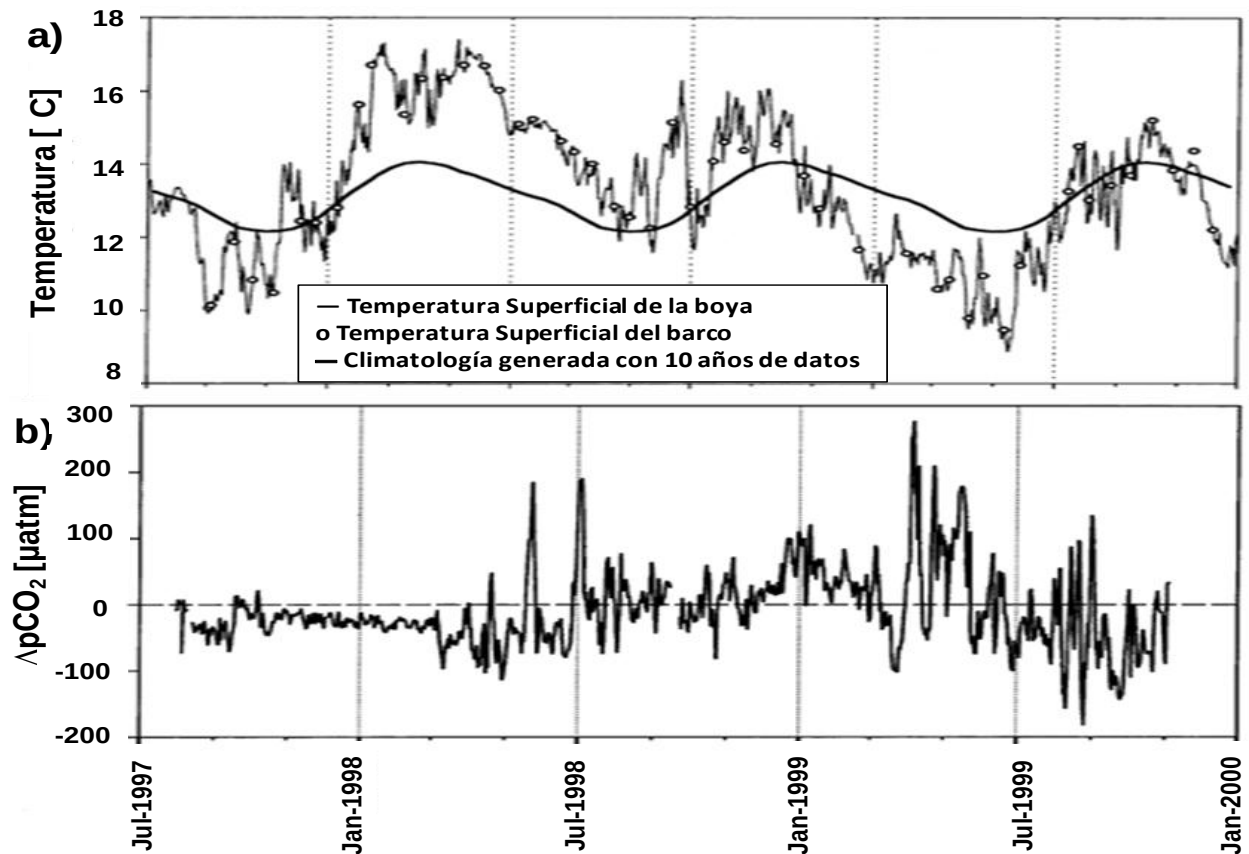
IMECOCAL durante 1997-2007, el cual está estrechamente relacionado con una recuperación del ecosistema después de la perturbación causada por la invasión del ASA (Gaxiola-Castro *et al.* 2008) y también por un incremento en las surgencias durante el 2005 y 2006 (PFEL data; Lavaniegos *et al.*, 2010). La presencia del ASA afectó al SCC en su conjunto, lo que originó un transporte de aguas frías y ricas en nutrientes lo cual suscitó un desarrollo de grandes florecimientos de fitoplancton (Gaxiola-Castro *et al.*, 2008). Sin embargo, la baja temperatura del agua subártica (Freeland *et al.*, 2003; Venrick *et al.*, 2003) afectó negativamente al zooplancton a lo largo del SCC (Wheeler *et al.*, 2003; Gaxiola-Castro *et al.*, 2008; Lavaniegos, 2010). Esto resultó en una tasa reducida de pastoreo y aparentemente en los florecimientos de fitoplancton los cuales redujeron el oxígeno de la columna de agua, como se reportó para la plataforma costera de Oregón (Wheeler *et al.*, 2003).

Durazo (2009) analizó los cuatro eventos de variabilidad interanual suscitados durante los primeros 10 años de IMECOCAL en términos de los forzamientos atmosféricos iniciando con 1) EN 97-98 y 2003, 2) LN 99-2000, 3) el ASA 2002-2006 y finalmente un periodo alterno de 4) EN-LN 2007-2008. Sus resultados mostraron que el evento El Niño (1997-1998) favoreció la advección de aguas de origen tropical y subtropical como la fuente principal de un incremento de salinidad en la capa superficial de la costa frente a BC. Adicionalmente, propone que en el período de baja salinidad entre 2002 y 2006, la advección anómala de aguas de la Corriente del Pacífico Norte a los 58°N y el bombeo de Ekman vertical debido a la intensificación del rotor del esfuerzo del viento fueron las causas primordiales de la existencia de aguas de menor salinidad en la región sur del SCC. El autor concluyó que el efecto de forzantes locales, i.e. la intensificación del viento a lo largo de la costa produjo surgencias costeras más intensas que el promedio, y que fue una de las causas por las que el evento El Niño a inicios del año 2007 fuera de corta duración, mismas condiciones que favorecieron el desarrollo de condiciones La Niña a finales del 2007 y hasta el 2008.

## **2.2 Estudios relacionados con la dinámica del CID en eventos interanuales (El Niño/La Niña).**

Los flujos de carbono en la interface océano-atmósfera cerca de las zonas costeras son más grandes que los observados en zonas oceánicas (Hansell y Carlson, 2001). No obstante su importancia global, son pocos los estudios donde se reconoce la contribución de las zonas costeras a los flujos globales de carbono y nutrientes (Smith y Hollibaugh, 1993, Chen *et al.*, 2003). Pocos son los estudios que se han realizado con el fin de entender el enriquecimiento de nutrientes y CO<sub>2</sub> desde el océano hacia los ecosistemas costeros someros, particularmente en zonas influenciadas por eventos de surgencias. La información es todavía menor para zonas costeras ante la pregunta de ¿cuál es el efecto ante eventos como EN y LN?. Se sabe que en algunos casos, no sólo han modificado la dinámica del sistema de las corrientes, sino también, han variado los procesos físicos, químicos y biológicos generando así un impacto muy notable.

Se han efectuado muy pocos estudios referentes al CO<sub>2</sub> en las costas de California y Baja California. Por ejemplo, Friederich *et al.* (2002) presentaron los resultados generados durante los eventos El Niño y La Niña 97-99 en Bahía Monterey California, EUA, considerando la información generada con boyas oceanográficas con sensores de pCO<sub>2</sub>. Los autores reportan que la presencia de aguas cálidas durante el EN de julio-1997 a septiembre-1998 provocó que los eventos de surgencias fueran suprimidos casi en su totalidad, lo cual produjo un flujo neto de CO<sub>2</sub> de la atmósfera hacia el océano, lo cual indicó que durante ese periodo el sistema se comportó como un reservorio de CO<sub>2</sub>. Posteriormente, las condiciones de temperatura regresaron cerca de lo normal en el verano de 1998, pero fue muy corta esta duración debido a que se desarrolló un enfriamiento para el otoño de ese mismo año por LN, lo cual evidenció que las surgencias se intensificaran y se prolongaran desde el invierno del 1998-1999 hasta la primavera de 1999 (fig. 1). En este caso el sistema costero se comporto como fuente de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.



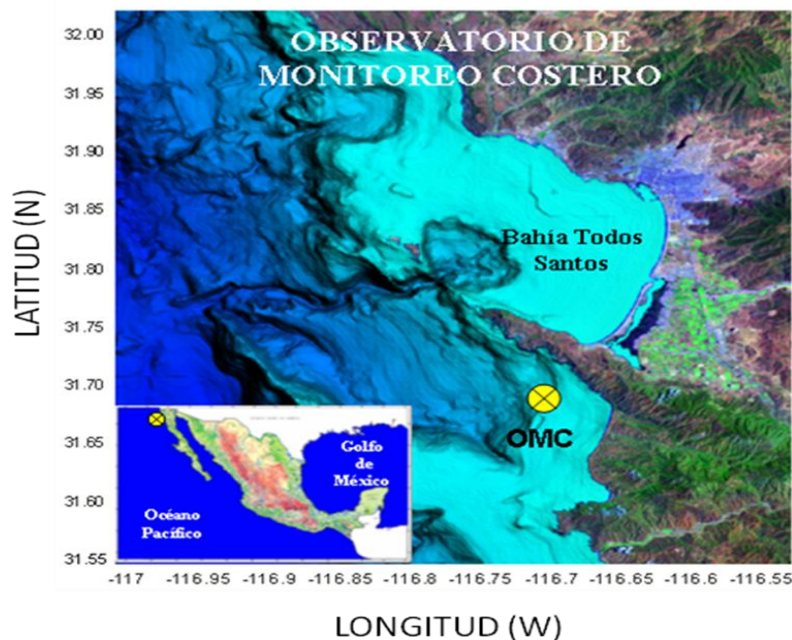
**Figura 1.** a) Mediciones de temperaturas superficiales entre 1997 y 1999 en las costas de Monterey CA. La línea continua muestra la temperatura climatológica de 10 años de datos, b)  $\Delta pCO_2$  superficial de julio de 1997 a enero de 2000 (Figura tomada de Friederich *et al.*, 2002).

### 3. ÁREA DE ESTUDIO.

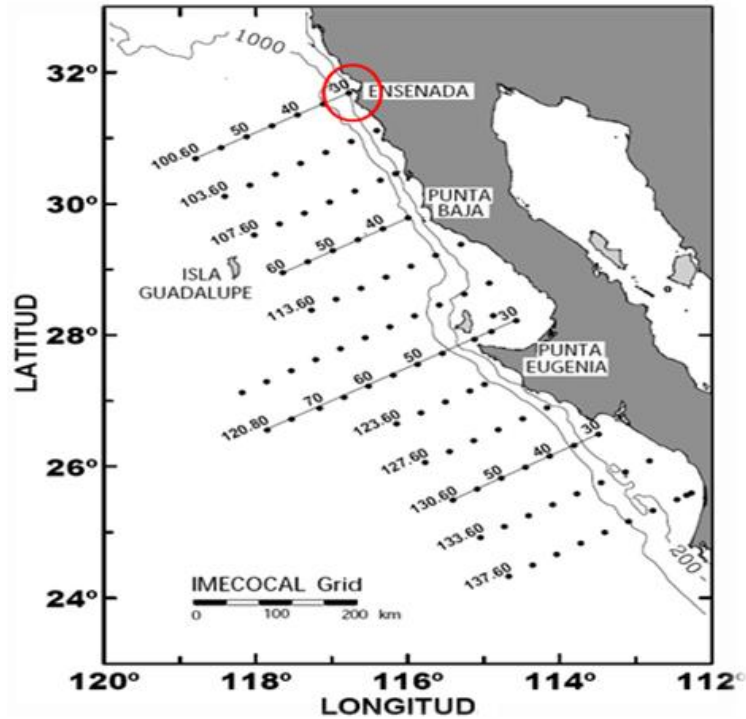
El área de estudio se localiza al sur de Punta Banda, en Ensenada, Baja California, México (31°40.105' N, 116 °41.596' W) (ver fig.2). Estudios previos describen que la región costera frente a Baja California presenta un ciclo estacional o temporal que está asociado a cambios climáticos estacionales. Donde destaca en promedio el Centro semipermanente de Alta Presión del Pacífico Norte (CAP), el cual se localiza cerca de 32°N/140°W (Amador *et al.* 2006). Este centro es más intenso durante el verano del hemisferio Norte (~38°N/142°W) y está desplazado hacia el ecuador (~25°N/125°W) durante el invierno, cuando el Centro de Baja Presión Aleutiano domina la región del Pacífico Norte. El CAP produce fuertes gradientes de presión, originando una componente del viento hacia el ecuador (sur de ~40°N) la mayor parte del año

(Strub y James 2002, Amador *et al.* 2006; Romero-Centeno *et al.* 2007). La importancia de estos vientos frente a las costas de California y península de Baja California, además de influir en el flujo de la Corriente de California, es que son favorables a la generación de surgencias costeras debido al transporte de Ekman hacia fuera de la costa (Strub y James 2000, Espinosa-Carreón *et al.* 2004, Pérez-Brunius *et al.*, 2007), las cuales se presentan en el período de marzo a septiembre (primavera-verano), que se caracteriza por la intensificación de los vientos hacia el ecuador (sur-sureste) lo que genera que las surgencias sean de mayor intensidad, mientras que la temporada de octubre a febrero (otoño-invierno) u oceánica se caracteriza por un debilitamiento de los vientos lo que no favorece a las surgencias, las cuales son persistente gran parte del año (Sverdrup *et al.*, 1941, Castro y Martínez, 2010).

Regionalmente, las aguas de la costa de Baja California, tienen una dinámica dominada por la generación de meandros y desprendimientos de giros. Se han observado además, dos mecanismos de generación de giros, el primero asociado a la geometría de la línea de costa, y el segundo producto de un enfrentamiento entre la CcSs que fluye en dirección opuesta a la CC, generando estos giros y meandros asociados con eventos de afloramientos costeros (Soto-Mardones *et al.*, 2004).



**Figura 2.** Área de estudio de la estación de muestreo.



**Figura 3.** Malla de muestreo del programa IMECOCAL (el círculo rojo muestra la estación 100.30).

#### 4. TÉORIA DE LA QUÍMICA DEL CARBONO.

Las variables del sistema de  $\text{CO}_2$  en el agua de mar son no conservativas. Estas variables son afectadas por distintos procesos (químicos, físicos y biológicos) (Millero, 1996). De manera general, las concentraciones de las variables del  $\text{CO}_2$  son distintas tanto en superficie como en el fondo, debido a los procesos que predominan en la zona eufótica y afótica. Sin embargo, en zonas de alta mezcla o surgencia, este patrón se modifica completamente debido a la homogenización de la columna del agua. El  $\text{CO}_2$  atmosférico que entra al océano a través de la interface océano-atmósfera, participa en los procesos de equilibrio y forma lo que se conoce como sistema del dióxido de carbono o de los carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ). El sistema de los carbonatos es muy importante como regulador de pH del agua de mar, como fuente de carbono utilizada por el fitoplancton en la productividad primaria ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$ ) y como controlador de la circulación del  $\text{CO}_2$  entre la biósfera, litósfera, atmósfera y océano (Millero, 1993).

La reacción del  $\text{CO}_2$  con el agua de mar disminuye el pH, esto a su vez reduce la disponibilidad de iones  $\text{CO}_3^{2-}$  que son necesarios para la formación de conchas y



esqueletos de  $\text{CaCO}_3$  para un importante número de organismos marinos tales como corales y plancton calcáreo (Guinotte y Fabry, 2009; Fabry *et al.*, 2008; Kleypas *et al.*, 2006). La aragonita y la calcita son dos formas de  $\text{CaCO}_3$  con la misma fórmula química, pero con distinta forma cristalina.

El grado al cual los organismos calcificadores son afectados por la disminución del ión  $\text{CO}_3^{-2}$  depende en gran medida del estado de saturación de  $\text{CaCO}_3$ , el cual es producto de las concentraciones de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{CO}_3^{-2}$  dividido entre la constante del producto de solubilidad (Kps) ya sea para aragonita o calcita a condiciones *in situ* (salinidad, presión y temperatura).

El estado de saturación del agua de mar con respecto a los  $\text{CaCO}_3$  se determina calculando:

$$\Omega_{\text{arag}} = [\text{Ca}^{+2}][\text{CO}_3^{-2}]/\text{Kps}_{\text{arag}}$$

$$\Omega_{\text{cal}} = [\text{Ca}^{+2}][\text{CO}_3^{-2}]/\text{Kps}_{\text{cal}}$$

Por lo tanto, la importancia del  $\Omega$  de calcita y aragonita en la columna de agua está relacionada con la factibilidad de la precipitación biogénica de testas en sedimentos marinos. Si  $\Omega=1$  la solución está en equilibrio con respecto a la concentración del mineral aragonita y/o calcita; si  $\Omega<1$  la solución está subsaturada y favorece la disolución de la fase mineral; si  $\Omega>1$  la solución está sobresaturada con  $\text{CaCO}_3$  y, en consecuencia, favorece la captación por los organismos (Libes, 1992).

## 5. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la variabilidad temporal en las escalas estacional de las variables del sistema del CO<sub>2</sub> en aguas costeras en la parte norte de la Península de Baja California, en una estación de monitoreo costero frente a las costas de Ensenada durante el periodo del 2006-2008.

### 5.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Caracterizar la región norte de BC, en base a las variables físicas de temperatura y salinidad utilizando series históricas de 10 años de la estación 100.30 de la región IMECOCAL (fig. 3).
2. Caracterizar y comparar la variabilidad temporal de la temperatura y salinidad de la estación Ensenada con la de la estación 100.30 del programa IMECOCAL.
3. Identificar la variación estacional de masas de agua en la estación Ensenada mediante el análisis de diagramas T-S y T-S-CID en los muestreos realizados durante el 2006 al 2008.
4. Analizar el efecto de la presencia de la anomalía de ASA del 2006 y del evento La Niña en las variables del sistema del CO<sub>2</sub> en la estación Ensenada.
5. Analizar la variación estacional de la profundidad de subsaturación del  $\Omega$  aragonita,  $\Omega$  calcita y oxígeno disuelto en la estación Ensenada.

## 6. HIPÓTESIS

- La presencia de eventos interanuales modificarán la química del agua en la zona costera. Durante la ocurrencia de la anomalía del ASA se espera encontrar aguas menos salinas con bajas concentraciones de CID, nutrientes, y bajo pCO<sub>2</sub>, mientras que durante el evento de La Niña, se espera encontrar altas concentraciones de CID, nutrientes, alto pCO<sub>2</sub> y bajos valores de oxígeno y pH.
- En una escala estacional, se espera que como resultado de las surgencias, el máximo transporte de aguas ricas en carbono y nutrientes ocurra entre abril a junio. Sin embargo, la combinación del periodo de surgencias y el evento de LN será un periodo donde se espera encontrar el máximo enriquecimiento con nutrientes y CID.

## **7. METODOLOGÍA**

### **7.1 Colecta de datos en la estación 100.30 de la línea 100 de IMECOCAL.**

El programa IMECOCAL continuó la red de muestreo original del programa CalCOFI acotado frente a Baja California desde Ensenada (31.8° N) hasta el Golfo de Ulloa (26.5°N), México. La línea 100 frente a Ensenada, tiene 7 estaciones con una distancia de separación de ~37 km entre ellas, se inicia en la estación 30 ubicada en la costa y termina en la estación 60 aproximadamente a 220 km mar adentro. Se realizaron muestreos cuatrimestralmente de temperatura y salinidad durante el período 1998-2008 en la línea 100 de IMECOCAL mediante lances de CTD utilizando un SBE 9/11. Los detalles de los muestreos, procedimientos y análisis de los datos pueden ser consultados en <http://imecocal.cicese.mx>.

### **7.2 Colecta de muestras en la estación Ensenada (OMC).**

El muestreo del proyecto FLUCAR se realizó en la estación ENSENADA, un sitio costero localizado al sur de Punta Banda, Ensenada, Baja California, México (31°40.105' N, 116 °41.596' W) (fig.2) localizado a ocho kilómetros de la primera estación histórica de la línea 100 (estación 100.30) de la red de muestreo IMECOCAL (fig. 3). Este sitio en este trabajo será referido como OMC con fines prácticos. En este trabajo se contó con un total de 23 perfiles, los cuales 17 corresponden a la Estación Ensenada, otros cinco se obtuvieron en la estación 100.30 (IMECOCAL), correspondientes a los periodos de febrero, abril, julio del 2006, abril del 2007 y abril del 2008, y finalmente un perfil realizado en julio del 2007 en las costas de BC por Feely *et al.* (2008).

Las actividades de rutina en la estación incluyeron lances de CTD/roseta a 100m, cuando la profundidad del fondo lo permitía, con mediciones continuas de presión, temperatura, fluorescencia, conductividad y oxígeno disuelto (OD), por medio de un CTD SeaBird 19 plus. Para las mediciones de Carbono Inorgánico Disuelto (CID), Alcalinidad Total (AT) y pH se colectó agua de mar con botellas Niskin de 5 L a 10 niveles de profundidad con espacios variables entre cruceros, en base a la profundidad de la termoclina y el nivel del máximo de clorofila. De las botellas Niskin, se colectaron directamente en botellas Pyrex, 500 mL de agua de mar para determinar el CID y AT, a

las cuales se les agregó 100 µl de HgCl para evitar el efecto biológico y finalmente fueron selladas con grasa Apiezon para evitar el intercambio gaseoso y la evaporación del agua. Para las mediciones de pH se colectó agua de la botella Niskin por medio de jeringas de 50 mL y las muestras se analizaron a bordo del barco. Finalmente, de manera rutinaria en cada crucero se tomaron muestras de agua de mar para realizar mediciones de oxígeno disuelto por el método Winkler y calibrar los datos obtenidos con el CTD.

### **7.3 Análisis del pH a 25°C.**

Las muestras colectadas fueron analizadas utilizando un electrodo de pH marca Ross y un potenciómetro marca Orión. Todos los registros de milivolts (mV) se realizaron en una celda cerrada a 25°C mediante un baño de temperatura constante Marca NestLab. Antes de iniciar las mediciones de las muestras, se verificó por medio de amortiguadores de pH 7 y 4 de la NBS (Nacional Bureau Standard) que se obtuviera una pendiente en el electrodo cerca de -59 mV. Durante el análisis de muestras, siempre al inicio y al final de cada lote de diez muestras, se realizó un análisis de un estándar de agua de mar con valores de AT, CID y salinidad conocidos, a partir de los cuales se determinó el pH por medio del programa CO<sub>2</sub>Sys (Lewis y Wallace, 1998).

A partir del potencial medido a bordo del barco, el valor de pH a 25°C de cada muestra fue calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{pH}_{25^{\circ}\text{C}} = \text{pH}_{\text{est}} + ((\text{mV}_m - \text{mV}_{\text{est}}) / m)$$

Donde:

pH<sub>est</sub>: pH del estándar estimado con el programa CO<sub>2</sub>Sys a partir del valor certificado de CID, de AT y de salinidad.

mV<sub>est</sub>: potencial medido correspondientes al estándar.

mV<sub>m</sub>: potencial medido para cada muestra.

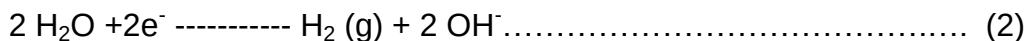
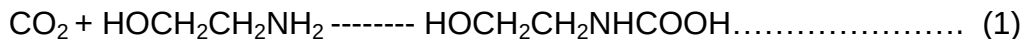
m: pendiente del electrodo para el paquete de mediciones.

#### **7.4 Análisis de Carbón Inorgánico Disuelto (CID).**

Para la medición de esta variable se utilizó el método coulométrico descrito por Johnson *et al.* (1987) en el cual se utilizó material de referencia certificado. Antes del análisis de las muestras, se elaboró una solución catódica y anódica que absorbe el CO<sub>2</sub>, la cual se acondiciona con inyecciones de agua de mar. Se usaron aproximadamente 10 adiciones de muestras de agua de mar filtrada. Posteriormente, se midió la exactitud y estabilidad del coulómetro por medio del material certificado con valor de CID conocido, el cual fue facilitado por el Dr. Andrew Dickson de Scripps Institution of Oceanography. Si el valor obtenido del estándar se encontraba dentro del rango de  $\pm 3 \mu\text{mol}$  del valor certificado de CID, se procedía a medir las muestras. Para el análisis se utilizó una jeringa de 50 mL con peso conocido y se extrajo una alícuota de la muestra de agua de mar, la cual permaneció sellada desde su colecta. La jeringa llena se pesó con una balanza analítica Mettler toledo con una resolución de  $\pm 0.0001\text{gr}$ . La muestra se inyectaba a una celda cerrada, donde se hacía reaccionar con ácido fosfórico al 8% para convertir los carbonatos y bicarbonatos a CO<sub>2</sub>. Al mismo tiempo, la celda donde se lleva a cabo la acidificación, está conectada a un flujo constante de gas nitrógeno (gas acarreador), el cual transporta el CO<sub>2</sub> hacia otra celda, la cual contiene una solución catódica (monoetanolamina). Una vez que el gas CO<sub>2</sub> reacciona con la solución catódica forma un complejo en una celda de cristal en el coulómetro, la cual se localiza entre una fuente de luz y un foto detector para registrar los cambios en transmitancia (T) conforme se lleva a cabo la titulación. En la celda se encuentra una membrana porosa que separa un electrodo de platino (cátodo) inmerso en una solución de monoetanolamina con un indicador coulométrico de pH de un lado y, del otro lado de la membrana se encuentra un electrodo de plata (ánodo) inmerso en una solución anódica.

Cuando el CO<sub>2</sub> (g) llega a la celda, reacciona con la monoetanolamina y forma el ácido carbámico que hace que el color indicador de esta solución se desvanezca (1). Conforme el %T se incrementa, automáticamente se activa una corriente que se registra por el coulómetro en forma de conteos/min. Cuando esto ocurre el electrodo de platino, en conjunto con el electrodo de plata comienzan a liberar bases OH<sup>-</sup>(2) y (3), neutralizada la solución y volviendo al %T original (4). En dicho momento, la corriente

se detiene y se registra en forma de conteos/min la corriente que fue necesaria para neutralizar la solución.



Para conocer la concentración de  $\text{CO}_2$  de la muestra, se utilizan los conteos/min obtenidos de la titulación en la siguiente ecuación:

$$\text{CID} = (\text{conteos} - \text{Bco.} * t) / (\text{FC} * M)$$

Donde:

CID = Carbono Inorgánico Disuelto de la muestra.

Conteos = Número de conteos dados por el coulómetro.

Bco. = Blanco, número de conteos/min que marca el coulómetro con ácido y gas nitrógeno en la celda, sin muestra.

t = Tiempo de medición de la titulación coulométrica.

FC = Factor para calcular concentración, para convertir el contador de corriente en concentración, obtenido a partir de la medición de dos estándares diferentes.

M = Masa de la muestra añadida.

## **7.5 Análisis de Alcalinidad Total (AT).**

Después del análisis de CID se procedió a analizar la AT mediante el procedimiento potenciométrico descrito por Dickson *et al.* (2003). Previo a la medición de las muestras, se preparó el equipo realizando las mediciones de agua de mar necesarias para el electrodo de pH que se encontrara en condiciones óptimas para iniciar los análisis. Esto ocurría cuando el valor medido del material de referencia estaba en el intervalo de  $\pm 3\mu\text{moles}$ . La titulación se llevó a cabo en un equipo controlado por computadora utilizando el programa Labview para el control de los instrumentos. Para llevar a cabo el análisis, se tomaron alícuotas de la muestra, se pesaban y se llevaban a  $20^\circ\text{C}$  en una celda abierta, la cual estaba conectada a un termocirculador que mantenía la temperatura con ayuda de un agitador. Una pipeta automática marca Radiometer añadía suficiente HCl  $\sim 0.1$  moles/kg con fuerza iónica 0.7 para que la muestra

alcanzara un pH aproximado de 3.5 (aproximadamente 1 mL). A partir de este punto, se burbujeaba la muestra con airé libre de CO<sub>2</sub> y con agitación para ayudar a liberar el CO<sub>2</sub> producido por la acidificación. Para titular la muestra acidificada, la pipeta realizaba ~20 adiciones de 0.025 ml de HCl, y el potenciómetro registraba el potencial después de cada una de ellas. Con los datos de milivoltaje y ácido utilizado durante la titulación el programa realiza una linearización y, a partir de la masa de la muestra y del ácido que se necesitó para neutralizar las bases contenidas en ella, se realizó el cálculo para conocer la concentración de Alcalinidad Total de cada muestra (Dickson *et al.* 2003).

### **7.6 Análisis de Oxígeno disuelto.**

Las muestras colectadas para el análisis del oxígeno disuelto (OD) se trataron por el método Microwinkler. En el primer paso de la determinación del OD se agrega una solución de Sulfato Manganeso (Solución A) y otra de Yoduro de Potasio Alcalino (Solución B). Estos reactivos reaccionan formando un precipitado blanco marrón de hidróxido de manganeso (Mn (OH)<sub>2</sub>).

Posterior a la formación del precipitado, se agrega a la muestra ácido sulfúrico, el cual convierte el hidróxido mangánico en sulfato mangánico, al mismo tiempo el yoduro de potasio es oxidado por el sulfato mangánico, el cual libera yodo en el agua. Dado que el sulfato mangánico para esta reacción proviene de la reacción entre el hidróxido manganeso y el oxígeno, la cantidad de yodo liberado es directamente proporcional a la cantidad de OD presente en la muestra original. La liberación de yodo libre se indica por el cambio de color de la muestra a un marrón amarillento.

En la etapa final, se añade Tiosulfato de Sodio (0.01 N), el cual reacciona con el yodo libre para producir yoduro de sodio. Cuando todo el yodo se ha convertido, la muestra cambia de marrón amarillento a incoloro.

Finalmente, los perfiles de OD obtenidos con el CTD durante los muestreos se corrigieron al correlacionarlos con las mediciones de OD de las muestras discretas (ver más adelante).

## 7.7 Análisis de los datos obtenidos.

Las masas de agua presentes en el área de estudio fueron identificadas por medio de un análisis hidrográfico de la temperatura y salinidad en base a diagramas T-S, se utilizó la clasificación de masas de agua descrita por Durazo y Baumgartner (2002). Para el análisis histórico de la temperatura y la salinidad de la estación 100.30, se utilizaron los datos de 10 años de IMECOCAL. Con este procedimiento fue posible observar la presencia de eventos interanuales, así como realizar una comparación de la conducta temporal de estas variables entre la estación 100.30 y la estación Ensenada.

Adicionalmente, con el programa CO<sub>2</sub>Sys.xls (Lewis y Wallace, 1998) y a partir de mediciones de CID, AT, temperatura, salinidad, presión y las constantes de disociación de Mehrbach *et al.* (1973) se estimó el  $\Omega_{\text{arag}}$ ,  $\Omega_{\text{cal}}$ , pCO<sub>2</sub>, y pH *in situ* (en la escala de agua de mar). Considerando que la exactitud, tanto para CID como para AT, es de  $\sim 3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , los errores asociados al cálculo de  $\Omega_{\text{arag}}$  y  $\Omega_{\text{cal}}$ , pCO<sub>2</sub>, y pH *in situ*, haciendo variar  $\pm 3 \mu\text{mol kg}^{-1}$  de CID y AT durante el cálculo de las variables mencionadas, se estimó que fueron de  $\pm 0.04$  unidades,  $\pm 5 \mu\text{atm}$  y  $\pm 0.01$  unidades, respectivamente. Se calculó el valor de pH en equilibrio entre el océano-atmósfera con el programa CO<sub>2</sub>sys a temperatura de 25°C, una salinidad de 33.5, alcalinidad de 2228  $\mu\text{mol Kg}^{-1}$  y pCO<sub>2</sub> atmosférico de 387  $\mu\text{atm}$  (<http://scrippsco2.ucsd.edu>).

En cuanto al análisis del OD, se realizó una transformación de los datos obtenidos de oxígeno de mgO<sub>2</sub>/ml a ml/L. Subsecuentemente se realizó un ajuste de los datos capturados por el sensor del oxígeno del CTD. Con esta base de datos se realizó una regresión lineal entre los datos de las muestras discretas y los del CTD. Este procedimiento se hizo para cada set de datos en cada muestreo.

El  $\Delta\text{pCO}_2$  fue calculado restando el valor del pCO<sub>2</sub> atmosférico actual el cual es de 387  $\mu\text{atm}$  ([http://scrippsco2.ucsd.edu/program\\_history/keeling\\_curve\\_lessons.html](http://scrippsco2.ucsd.edu/program_history/keeling_curve_lessons.html)) del valor pCO<sub>2</sub> calculado de las mediciones de agua de mar de CO<sub>2</sub> Total y Alcalinidad Total usando el programa CO<sub>2</sub>Sys. La densidad del agua de mar fue calculada a partir de las mediciones de salinidad y temperatura calculadas con el software del SBE (Sea Birt Electronic), mientras que el índice de surgencia mensual para la latitud de la estación Ensenada, se tomó de la página de la NOAA (<http://www.pfel.noaa.gov>), con el fin de observar el efecto de los vientos en combinación con el efecto del transporte de



Ekman que dan como resultado el ascenso de aguas subsuperficiales con características como aguas mas frías, salinas, ricas en nutrientes y carbono y pobres en oxígeno disuelto.

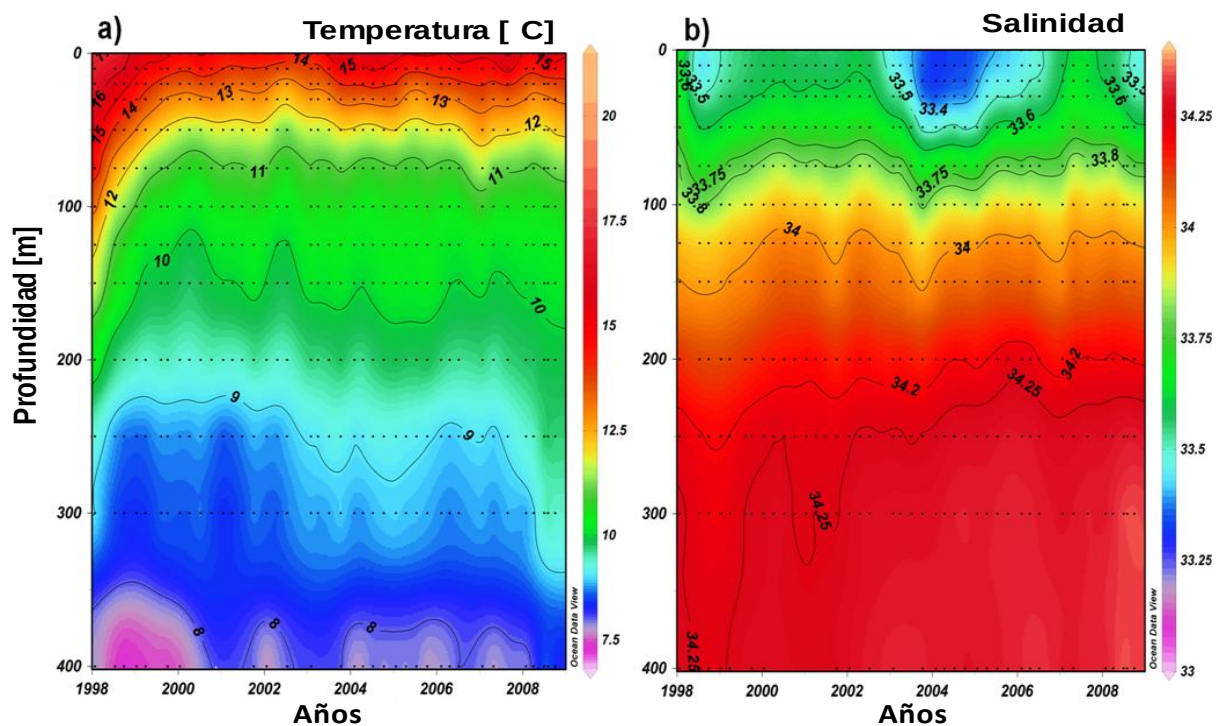
## **8. RESULTADOS**

### **8.1 Variación temporal de la temperatura y la salinidad en la estación 100.30.**

Se observaron cambios estacionales en las variables de temperatura y salinidad en la columna de agua de la estación 100.30 (fig. 4). Se encontró que la mayor variabilidad en temperatura fue confinada a los primeros 50 m de profundidad, con valores mínimos de  $\sim 13^{\circ}\text{C}$  durante enero y máximos durante julio de  $> 15^{\circ}\text{C}$ . Asimismo, el mayor ascenso de aguas frías fue registrado en el mes de abril, asociado a los eventos de surgencia que ocurren en esa época del año. Por su parte, la salinidad mostró valores menores en los primeros 100 m de la columna de agua, con una lengüeta de mínima salinidad relativa que se detectó cerca de la costa en primavera y a principios de verano producto de una mayor presencia del ASA como se explicará más adelante.

La variación temporal de las dos variables muestra cambios ocurridos en distintos años como resultado de variaciones de eventos estacionales e interanuales. Cabe señalar que dichos cambios fueron más evidentes en los valores de salinidad. Las mediciones de temperatura y salinidad que se registraron durante 1998 mostraron aguas más salinas ( $\sim 33.6$ ) y cálidas ( $\sim 17^{\circ}\text{C}$ ) en superficie. La isoterma de  $12^{\circ}\text{C}$  durante el 1998, se localizó por debajo de los 100 m, condiciones que se asociaron al evento El Niño. Posteriormente esta condición comenzó a modificarse donde se observó una disminución de la temperatura, principalmente con una isoterma de  $12^{\circ}\text{C}$  localizada a  $\sim 50$  m y que en este caso se relacionó con el evento La Niña del periodo 1998-99 y que persistió hasta el 2001. En el periodo de 1999 al 2002, la salinidad y la temperatura en la capa superficial mantuvo sus valores en  $\sim 33.6$  y  $\sim 14^{\circ}\text{C}$  en los primeros 50 m respectivamente. Sin embargo, del 2002 y hasta finales del 2006, la columna de agua presentó una gran variación de salinidad con valores que oscilaron de 33.4 a 33.6 en los primeros 50 m, mientras que las temperaturas se mantuvieron en un intervalo de 13

a 15°C. Esta condición fue diferente debido a que se observó un núcleo de agua menos salina en los primeros 50 m, la cual se asoció a la entrada a la zona de estudio de un mayor volumen del ASA óóá más adelante A mediados del 2007 y principios del 2008 las condiciones fueron diferentes al resto de los años anteriores, dado que aguas más frías y salinas que provenían de una mayor profundidad, fueron transportadas hacia la superficie. El caso fue más claro con la salinidad donde las isohalinas de 33.6 localizadas previamente a 50 m, llegó a irrumpir en la superficie para el 2007-2008. En general la mayor variabilidad observada en salinidad, no se debió a fluctuaciones estacionales si no a eventos interanuales como se explicará posteriormente (fig. 4).



**Figura 4.** Series de tiempo de a) temperatura y b) salinidad de datos históricos generados en la estación 100.30 del 1998 al 2008 de la región IMECOCAL.

## **8.2. Observaciones hidrográficas en la Estación Ensenada.**

### **8.2.1 Serie de tiempo de temperatura, salinidad y densidad.**

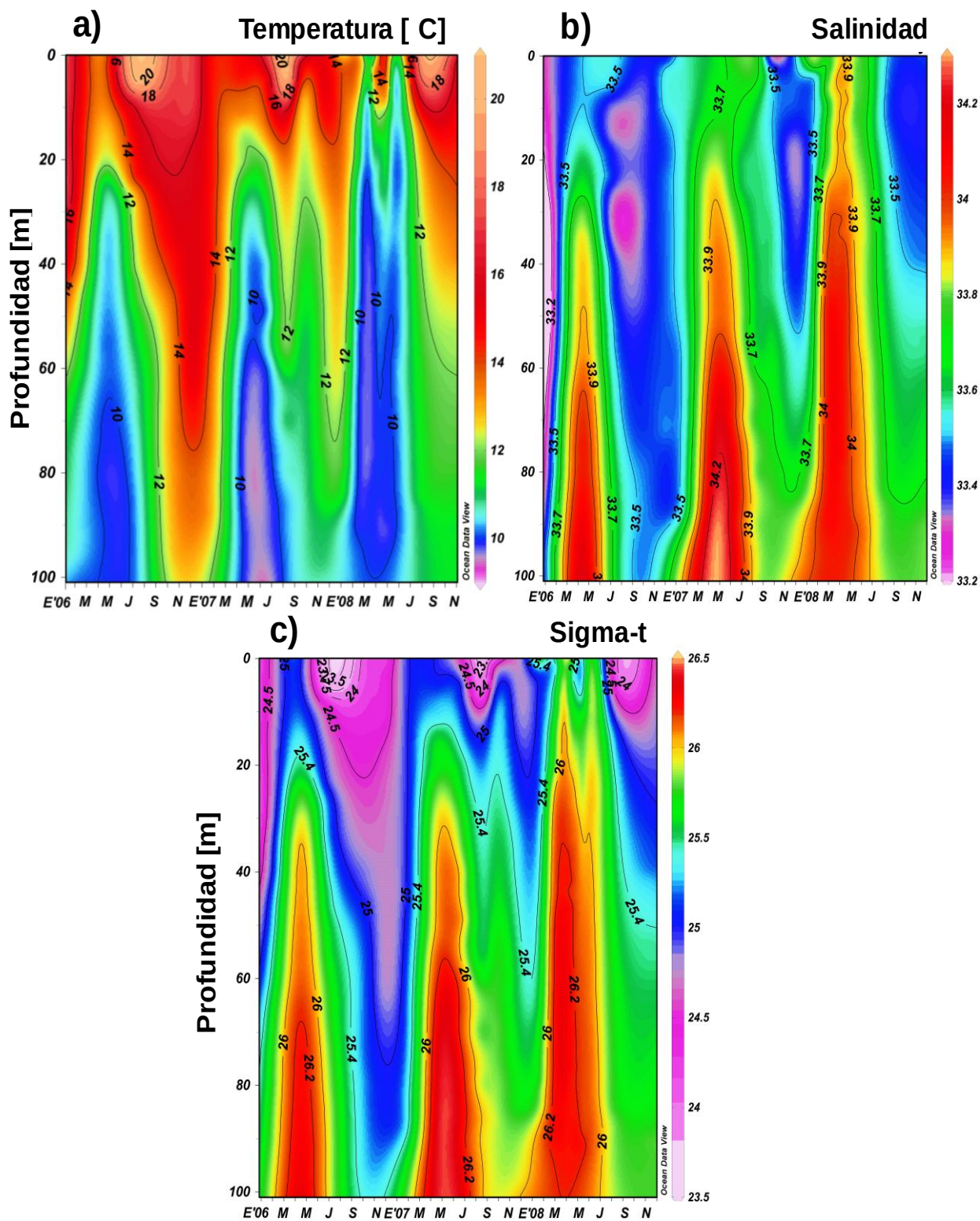
La temperatura, la salinidad y la densidad de la estación Ensenada también mostraron variabilidad temporal en las escalas estacional e interanual (fig. 5), aunque esta variabilidad fue más evidente e intensa debido a la cercanía de la costa.

Adicionalmente, la presencia de eventos como La Niña, el ASA caracterizada por la presencia de aguas menos salinas, y a las anomalías positivas en el índice de surgencia que se reportaron para esta zona provocaron una mayor variación de la proporciones de masas de agua que se muestran en los diagramas de T-S (fig. 6).

Las observaciones muestran en el invierno del 2006 aguas ligeramente cálidas ( $10-16^{\circ}\text{C}$ ) y menos salinas ( $33.2-33.9$ ) que penetran hasta los 100 m de profundidad (fig. 5) asociadas a isopícnas de  $25.4 > \sigma_t < 26 \text{ kg/m}^3$ , las cuales normalmente se encuentran por debajo de los 100 m. Esta condición se le puede relacionar al periodo de baja salinidad asociado a la intrusión del ASA cerca de la costa. Para la primavera-verano de ese mismo año se observó igualmente una disminución de la temperatura en la columna que osciló entre  $10$  a  $20^{\circ}\text{C}$ , pero en este periodo se observó un ascenso de la isohalina de 34 por arriba de 70 m de profundidad con isopícnas que van de  $25 > \sigma_t < 26.2 \text{ kg/m}^3$  (asociada con el límite superior de la masa de aguas de origen ecuatorial). Esta condición se debe a los intensos procesos de surgencia que se detectaron durante esta época, los cuales originaron que aguas más densas se encontraran a menores profundidades. Posteriormente para la época de otoño-invierno del 2006-2007, se observó un ligero calentamiento superficial mostrando la penetración de la isoterma e isohalina de  $12^{\circ}\text{C}$  y 33.7 por debajo de los 100 m respectivamente, con isopícnas de  $23.5 > \sigma_t < 25.4 \text{ kg/m}^3$  asociadas a la terminación del periodo de baja salinidad (ASA).

Por otro lado, las condiciones de la columna de agua se vieron modificadas durante la primavera-verano del 2007. Inicialmente se observó la presencia de aguas más frías ( $10-14^{\circ}\text{C}$ ) en gran parte de la columna, originado por una elevación de la isopícnas ( $\sigma_t = 26.2 \text{ kg/m}^3$ ) desde capas subsuperficiales hasta por arriba de los 60 m, lo que provocó un aumento de salinidad de 34.2 elevándose por arriba de los 90 m de profundidad. Estas condiciones de temperatura prevalecieron aproximadamente hasta septiembre de ese mismo año con salinidad de  $\sim 33.9$  ( $\sigma_t = 26 \text{ kg/m}^3$ ), asociadas con anomalías positivas en el índice de surgencias con valores mayores a  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (100\text{m})^{-1}$  de la línea de costa (fig. 7). Esta condición mostró una clara transición hacia condiciones LN.

Finalmente para el período de invierno-primavera del 2007-2008, se observó un ascenso de aguas más densas ( $25.4 > \sigma_t < 26.2 \text{ kg/m}^3$ ) y salinas (33.7-34) las cuales irrumpieron cerca de la superficie, donde se observó nuevamente un claro descenso de la temperatura ( $10 - 12^\circ\text{C}$ ). Se destaca que en la primavera hubo un ascenso de aguas más profundas en comparación a las primaveras anteriores, las cuales transportaron aguas más densas cerca de la superficie de hasta  $26.2 \text{ kg/m}^3$  (fig. 5). Tales condiciones se relacionaron a la etapa madura de La Niña las cuales pudieron favorecer aun más los efectos de este evento. Estos acontecimientos finalizaron para el verano (2008).



**Figura 5.** Series de tiempo de (a) temperatura, (b) salinidad y (c) sigma-t en la Estación Ensenada durante el periodo de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008.

### **8.2.2 Masas de agua.**

El análisis de los diagramas T-S (fig. 6) mostró el efecto de las variaciones oceanográficas interanuales que se presentaron durante el periodo de muestreo, donde 1) inicialmente se observó en el 2006 agua menos salina la cual se asoció a la intrusión del Agua Subártica (ASA), 2) posteriormente en el 2007, fue el inicio de un periodo de transición hacia una condición de La Niña y 3) finalmente la fase de desarrollo de La Niña en el 2008 (los detalles de estos eventos se harán más adelante). Algo importante de resaltar es que en la gran mayoría de los muestreos, se observó un predominio del ASA, con una ligera presencia de ATr. Sin embargo, durante el 2006 y 2007 se detectaron bajas proporciones de la presencia del ASsE, mientras que para el 2008, solo se observó al ASA y ATr (fig. 6).

#### **8.2.2.1 Intrusión del Agua Subártica (ASA).**

Durante el 2006 se observaron una serie de anomalías de salinidad asociadas a la entrada de un mayor volumen del ASA cerca de la región. Donde se encontró que en febrero se encontró una menor salinidad (33.2-33.7) pero con temperaturas similares a la climatología con un rango de 10-16°C. Al igual que febrero, el mes de julio fue similar en su distribución de temperatura pero con salinidad más elevada (33.3 a 33.7). En octubre y diciembre se presentaron aguas superficiales más cálidas con valores máximos de ~17°C y mínimos de ~12.6°C, mientras que la salinidad osciló entre 33.4 y 33.5 y fue ligeramente mayor a la descrita en febrero, sin embargo fue menor a la detectada para julio. Es importante señalar que diciembre fue el mes más cálido y con un rango de salinidad muy estrecho, donde la isoterma de 12°C se localizó a escasos 30 m en meses anteriores mientras que para este mes se localizó por debajo de los 100m de profundidad (fig. 5a y 6a). En cuanto al mes de abril se observaron los tres tipos de masas de agua: ASA, ATr y ASsE. El ASsE se detectó a ~70 m de profundidad representada por bajas temperaturas 9.8-13.9°C y altas salinidades entre 33.5-34.2. En general, este año se caracterizó por ser menos salino a excepción del mes de abril donde se observó un aumento en salinidad producto de las surgencias (fig. 6a).

### **8.2.2.2 Transición a La Niña.**

En el 2007 se observó nuevamente un dominio durante todo el año del ASA acompañada de una ligera presencia de ASsE. En enero se observó un comportamiento muy particular con salinidades muy homogéneas fluctuando en un rango muy estrecho de 33.50 a 33.55 en toda la columna y con temperaturas de 13 a 15°C. Esta condición observada en el OMC durante este mes, dio origen a la fase final del período de baja salinidad, asociado al Agua Subártica pero cabe señalar que cerca de la costa. Por otro lado, abril al igual que enero fue diferente al resto de los meses, pero mostró un incremento en la salinidad con un rango de entre 33.7 a 34.3, adicionalmente se observó una clara disminución en las temperaturas de hasta ~9°C. Esta condición mostró una marcada transición hacia LN desarrollándose en los meses posteriores.

Septiembre y julio mostraron un patrón con salinidades de 33.5-33.78 y 33.7-34 respectivamente acompañados de temperaturas que van desde 10 a 15.7°C. Agosto se destacó por mostrar temperaturas superficiales de 3°C por arriba de la media climatológica, el cual se mostró más cálido (~20°C) en comparación con el resto de los meses y con un rango muy estrecho de salinidad que osciló entre 33.61 y 33.69. Finalmente noviembre mostró un comportamiento totalmente diferente al resto de los meses, el cual se destacó por presentar una cuña de agua subsuperficial de baja salina, que osciló entre 33.4 a 33.9 con temperaturas que fluctuaron entre 15 y 10.5°C. En general al comparar los datos con la climatología se observó un periodo más frío y salino gran parte del año a excepción del mes del noviembre (fig. 6b).

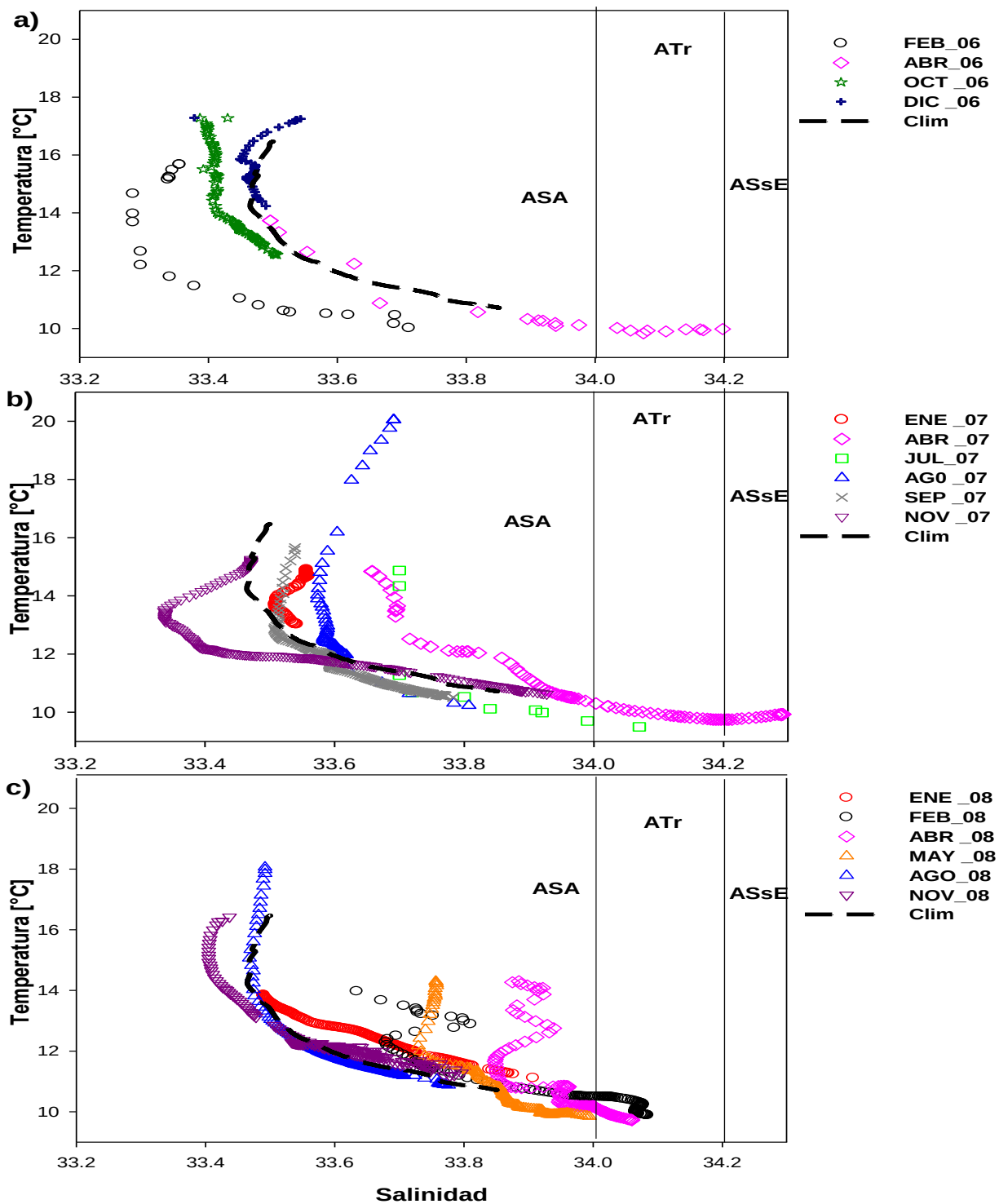
### **8.2.2.3 La Niña 2008.**

Al igual que el 2006 el 2008 se consideró un año anómalo, en donde se presentó nuevamente un dominio del ASA acompañado posteriormente de la presencia del ATr. Sin embargo, destacaron los meses de enero, febrero, abril y mayo donde se observó una mayor presencia del ATr en la columna de agua la cual no había sido observada en años anteriores (fig. 6c). Se detectaron temperaturas en dichos meses menores a 15°C y con salinidades mayores a 33.6, a excepción de enero que mostró una menor salinidad en la superficie. Abril se distinguió por presentar las mayores salinidades en

toda la columna ( $>33.8$ ). Durante estos periodos se observó mayor el contraste de una condición La Niña, con una disminución más marcada en la temperatura y el ascenso de la isohalina de 34 por arriba de los 40 m (figs. 5 y 6).

Por otro lado, agosto y noviembre mostraron formas de las curvas T-S similares a las observadas en el 2007, pero con temperaturas ligeramente más frías ( $<18^{\circ}\text{C}$ ). En referencia con la climatología se mostró que el primer semestre del 2008 fue más salino y frío en comparación con el 2007. Finalmente los meses de septiembre y noviembre mostraron menor salinidad en comparación con la observada anteriormente (fig. 6c).

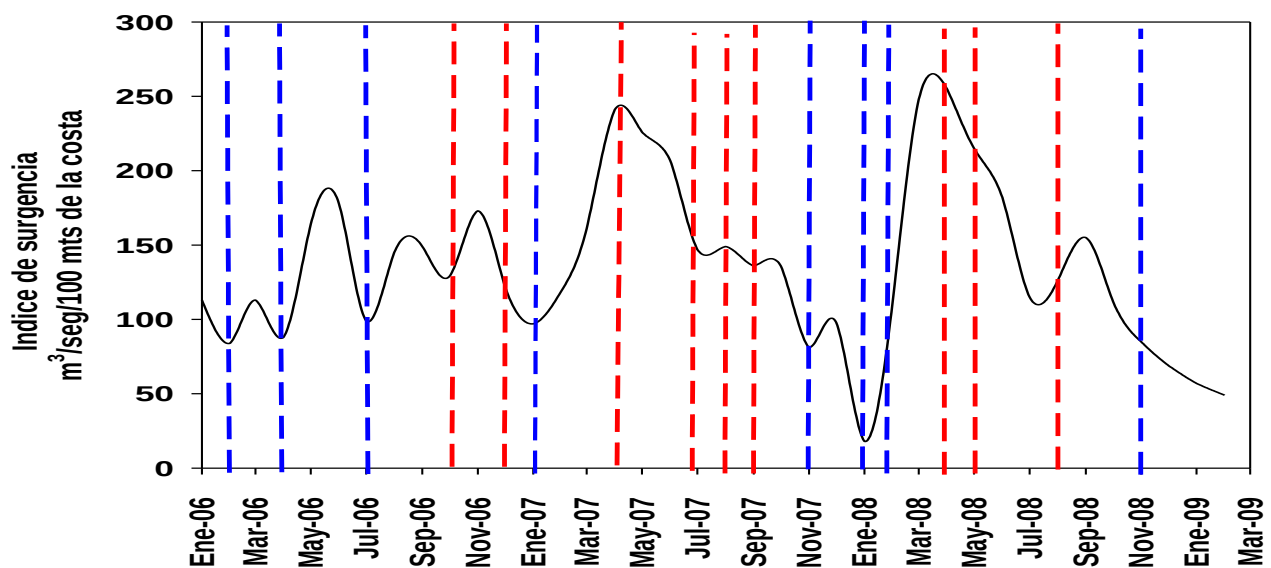




**Figura 6.** Diagramas de temperatura-salinidad (T-S) para la estación Ensenada durante a) 2006, b) 2007 y c) 2008. Cada grafico muestra el T-S climatológico anual generado en base a un promedio de 10 años de la estación 100.30 de la región IMECOCAL.

### 8.2.3 Surgencias.

Debido a la cercanía de la estación Ensenada con la costa (~3 km), es importante considerar la influencia que tienen los eventos de surgencia sobre las variables físicas y químicas de la columna de agua. La figura 7 muestra el promedio mensual del índice de surgencia, el cual inicia en enero del 2006 y finaliza en febrero del 2009 en el cual se observó gran variabilidad durante el 2007 y 2008. Con líneas rojas y azules se marcaron los días de muestreo (Las rojas señalan las eventos de surgencias fuertes y las azules las menos intensas). Los índices de surgencia fueron máximos en los meses de octubre, diciembre (2006), abril, julio, agosto, septiembre (2007), abril, mayo y agosto (2008), con valores de 131, 124, 242, 149, 151, 136, 255, 215 y 126  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ , respectivamente. Estos máximos de surgencia encontrados para la zona concuerdan con anomalías positivas en el índice de surgencia reportados durante el 2007 y 2008 por Durazo (2009). En cuanto a los valores mínimos se observaron en los meses de febrero, abril, julio (2006), enero, noviembre (2007), enero, febrero y noviembre (2008) con valores menores de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$  llegando a ser casi a  $18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$  donde noviembre (2007 y 2008) y enero (2008) se destacaron por presentar los valores más bajos.



**Figure 7.** Índice de surgencia mensual en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$  de línea de costa para el periodo 2006-2009 a una posición  $30^\circ\text{N}$  (fuente: <http://www.pfel.noaa.gov>). Las líneas punteadas muestran los periodos de muestreos; en rojo los máximos índices de surgencia y en azul los más bajos.

### **8.3 Distribución de las variables químicas y biológicas.**

#### **8.3.1 Variables del sistema del CO<sub>2</sub>.**

Se observaron cambios estacionales en las variables del sistema del CO<sub>2</sub> en la estación Ensenada (fig. 8), muy similares a los observados en las variables hidrológicas (fig. 5 y 6). Se encontró que el pH, el CID y el pCO<sub>2</sub> mostraron una clara respuesta a las diferentes condiciones que se presentaron en la zona. Destacan los resultados obtenidos en los meses de abril en comparación con el resto de los meses, los cuales fueron el resultado de los eventos de surgencia los cuales transportan aguas subsuperficiales ricas en CID, pCO<sub>2</sub>, pero de bajo pH, oxígeno disuelto y además subsaturadas en carbonatos.

##### **8.3.1.1 pH.**

Inicialmente el comportamiento de la variable del pH (fig. 8a) en la superficie se mantuvo cerca al valor en equilibrio (~8.04), aunque se observaron una serie de oscilaciones superficiales de pH a lo largo del tiempo muestreado, donde destacó principalmente los periodos de primavera durante eventos de surgencia. Por ejemplo, en la primavera del 2006 se observó la isolínea de pH de 8.0 cerca de la superficie (~2m), pero para el otoño-invierno del mismo año esta isolínea había descendido detectándose a 60 m de profundidad. Esta isolínea de 8.0 ascendió nuevamente para la siguiente primavera del 2007 (~18 m), donde el pH en superficie llegó a 8.2 el cual posiblemente fue producto de procesos biológicos. Subsecuentemente esta isolínea de 8.0 se elevó nuevamente durante el otoño-invierno de ese mismo año, la cual se encontró fluctuando entre los 5 a 10 m de profundidad. En cuanto a la primavera del 2008, se volvió a observar un ligero ascenso de esta isolínea cerca de los 10 m de profundidad comparada con la observada en el 2007. Además, el pH disminuyó nuevamente para otoño observándose la isolínea de 8.0 a ~15 m de profundidad.

Las variaciones estacionales de pH también fueron muy evidentes a lo largo de la columna (fig. 8a). Durante la primavera del 2006, la isolínea de pH de 7.8 se encontró por arriba de los 50 m, mientras que para el otoño-invierno del 2006-2007 esta isolínea de 7.8 no se detectó (estas observaciones fueron en general para todas las variables

analizadas). Posteriormente para la primavera del 2007, se observó nuevamente el ascenso de aguas por arriba de los 30 m con pH bajos ( $\sim 7.8$ ). Para el invierno del 2007 y primavera del 2008 la isolínea de 7.8 se observó a  $\sim 20$  m. Estas condiciones presentes durante el 2007 y 2008, estuvieron asociadas con una serie de eventos anómalos en el índice de surgencia y a la presencia de eventos interanuales como LN.

#### **8.3.1.2 CID.**

El CID también mostró fluctuaciones tanto en la superficie como en la vertical (fig. 8b). Se observó un cambio en la concentración superficial de CID durante los periodos de primavera, principalmente en respuesta a procesos biológicos debido al incremento de nutrientes hacia la superficie producto de las surgencias (Datos no mostrados), esto también resultó en los cambios de pH superficiales descritos anteriormente. Por ejemplo, durante la primavera del 2006, la isolínea de CID de  $2050 \mu\text{mol kg}^{-1}$  se observó cerca de la superficie ( $\sim 10$  m), donde al compararla con la primavera del 2007-2008 fue ligeramente más somera, sin embargo en el 2007-2008 se observaron valores claramente mas bajos en la superficie atribuidos a procesos biológicos mas intensos. Además se observaron periodos donde la superficie mostró bajas concentraciones de CID ( $1950$  a  $1975 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) los cuales coincidieron con las zonas que presentaron valores más altos de pH posiblemente producto de los procesos biológicos.

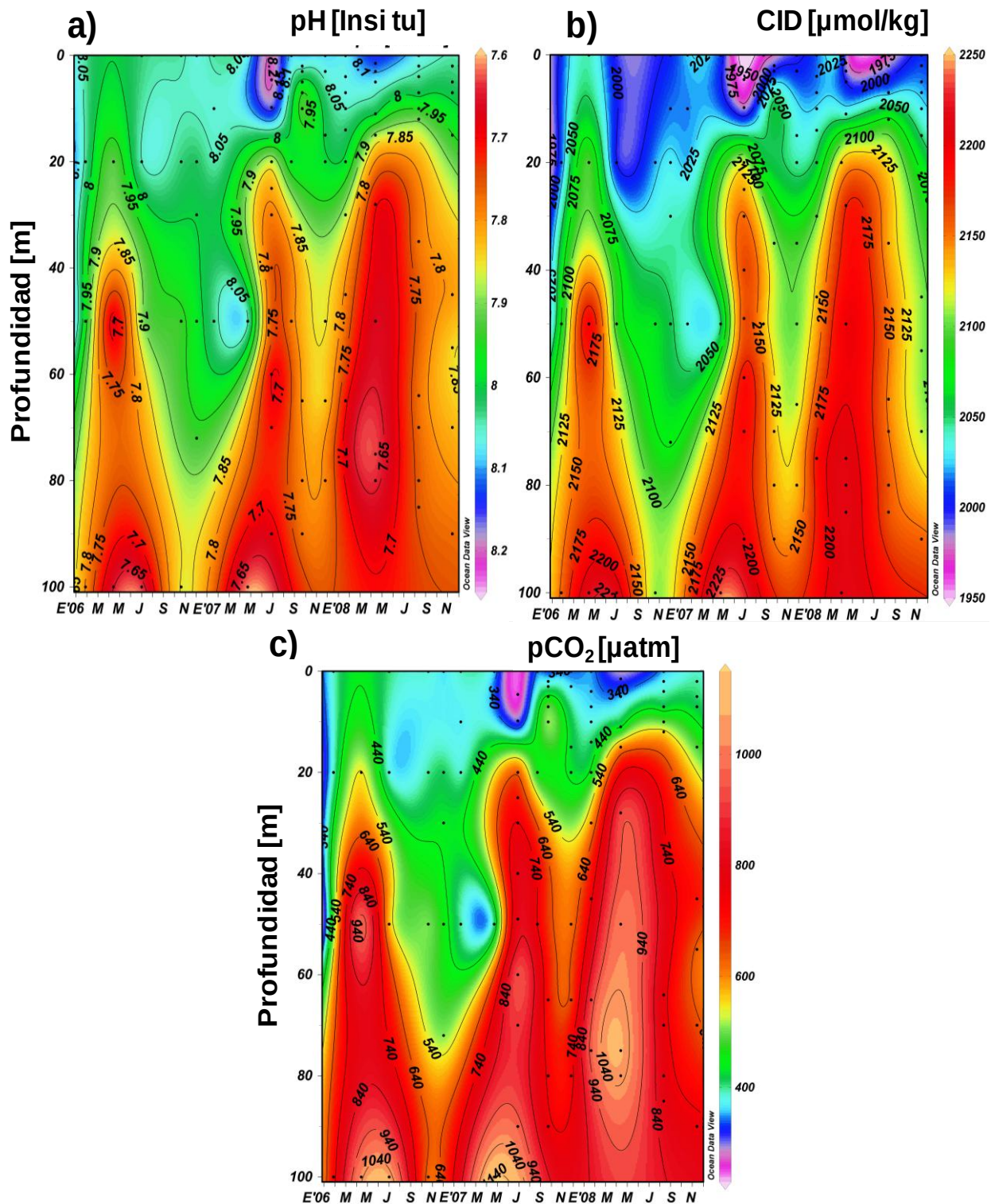
En la vertical se observó durante la primavera del 2006 un ascenso de aguas con concentraciones relativamente altas de CID ( $2150 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) hasta  $\sim 40$  m de profundidad, para el otoño-invierno del 2006-2007 estas concentraciones de CID ( $2150 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) no fueron detectadas a esa profundidad, indicando que en dicho periodo la columna de agua estaba menos enriquecida. Por ejemplo, la isolínea de  $2100 \mu\text{mol kg}^{-1}$  se observó por debajo de los 80m cuando previamente se encontraba a  $\sim 30$  m. Esta condición concordó con la terminación de la influencia de la anomalía del ASA, la cual se caracterizó por presentar bajas concentraciones en nutrientes, aguas más frías y menos salinas. Posteriormente para la primavera del 2007, la columna se vio nuevamente enriquecida por CID donde se observó un ascenso de la isolínea de  $2150 \mu\text{mol kg}^{-1}$  hasta  $\sim 30$  m. Subsecuentemente esta isolínea descendió para el otoño hasta

los 90 m de profundidad. Para el invierno y primavera del 2007-2008 se manifestó una condición similar a la detectada en la primavera del 2007, pero más intensa. En este período se detectó la isolínea de  $2150 \mu\text{mol kg}^{-1}$  en  $\sim 25$  m. El escenario en esta fase fue un ascenso de aguas más enriquecidas en CID cerca de la superficie.

#### **8.3.1.3 pCO<sub>2</sub>.**

El pCO<sub>2</sub> mostró una variación temporal en la superficie con valores cercanos o ligeramente menores respecto al valor en equilibrio con la atmósfera ( $\sim 387 \mu\text{atm}$ ) (fig. 8c). Destacan las primaveras del 2007 y 2008 las cuales presentaron los valores mínimos superficiales ( $< 340 \mu\text{atm}$ ), esta disminución superficial en el pCO<sub>2</sub> sugiere ser por consumo biológico, lo cual es consistente con la disminución superficial en el CID y el aumento del pH. En cuanto a la vertical se observó un incremento en los valores de pCO<sub>2</sub> a lo largo de la columna de agua en las primaveras del 2006, 2007 y 2008, pero fue más evidente durante el periodo del 2008. Se detectó la isolínea de  $1040 \mu\text{atm}$  a  $\sim 60$  m de profundidad cuando en el 2006-2007 se observa a  $\sim 96$  m de profundidad. Este ascenso de agua con alto pCO<sub>2</sub> sugiere estar relacionado con una combinación entre los procesos de surgencia y el evento de La Niña, los cuales contribuyeron al transporte de aguas mas profundas ricas en nutrientes y pCO<sub>2</sub> producto de la elevación de las isopignas durante La Niña y la intensificación de los vientos. Adicionalmente, se sugiere que durante este período la columna de agua podría comportarse como fuente de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera. El contraste, fue lo encontrado en el período de invierno del 2006-2007 con valores de pCO<sub>2</sub> cerca del valor en equilibrio con la atmosfera (fig. 8c).

De manera general se encontraron valores superficiales de pH y pCO<sub>2</sub> cerca del equilibrio acompañados de bajas concentraciones de CID, mientras que en la vertical se detectó un ascenso de aguas enriquecidas con bajos valores de pH producto de los procesos de surgencia (fig. 8).



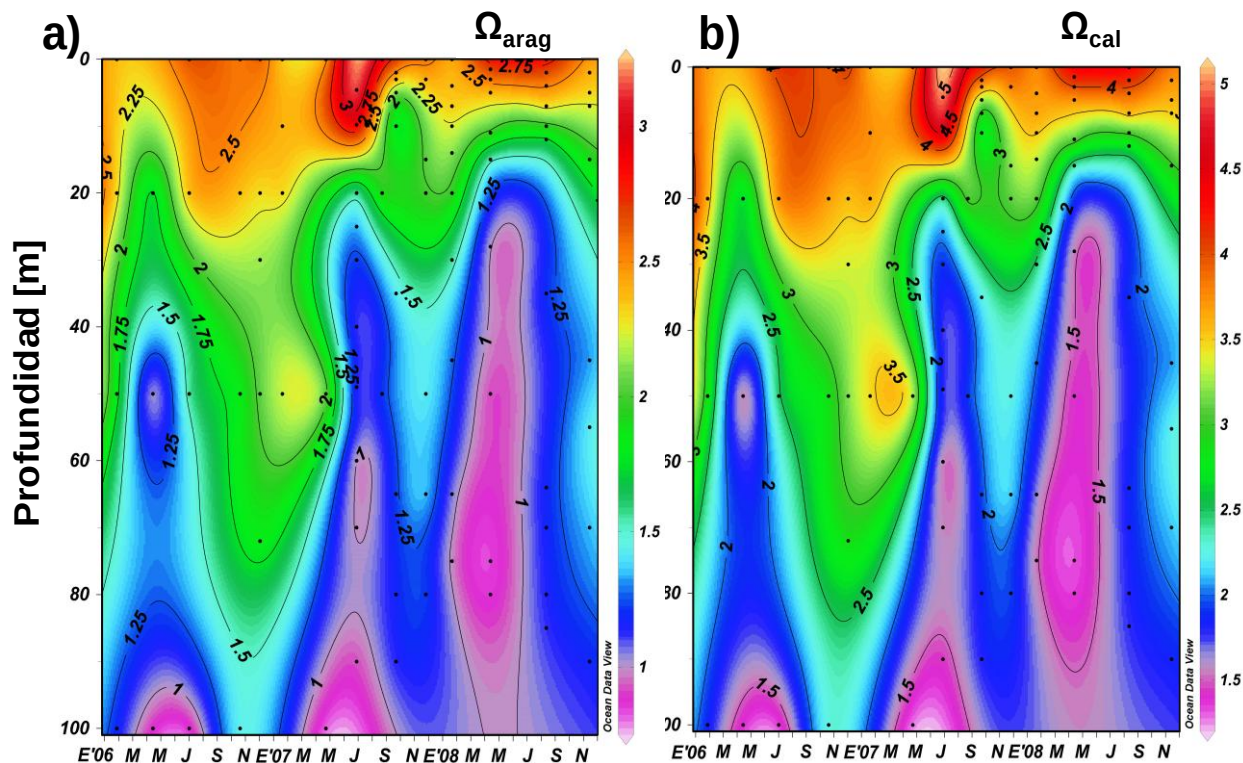
**Figura 8.** Serie de tiempo de las variables del Sistema del CO<sub>2</sub>: a) pH *In situ*, b) Carbono Inorgánico Disuelto (CID) ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) y c) pCO<sub>2</sub> ( $\mu\text{atm}$ ) de la columna de agua en la estación Ensenada, de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008.

#### **8.3.1.4 Variación temporal del omega de aragonita ( $\Omega_{\text{arag}}$ ) y calcita ( $\Omega_{\text{cal}}$ ).**

La variabilidad espacial y temporal de omega de aragonita ( $\Omega_{\text{arag}}=1$ ) y calcita ( $\Omega_{\text{cal}}=1$ ) en la estación Ensenada respondió a los cambios en la oceanografía de la región. Durante este estudio, se observó que la posición en la columna de agua de la isolínea de agua subsaturada en  $\text{CaCO}_3$  fue muy fluctuante producto de la influencia de los procesos físicos. Los cálculos de  $\Omega_{\text{arag}}$  mostraron la isolínea de 1 por arriba de los 100 m durante el período muestreado. Inicialmente, en el período de primavera del 2006, el agua subsaturada en  $\text{CaCO}_3$  asociada a la  $\Omega_{\text{arag}}$  se observó cerca de los 90 m de profundidad, pero para el verano del 2007 había ascendido ligeramente hasta 60 m de profundidad, mientras que en la primavera del 2008, el ascenso de esta agua subsaturada fue mayor alcanzando los 30 m de profundidad (fig. 9). Esta variabilidad estacional que presentó la isolínea de  $\Omega_{\text{arag}}$  estuvo fuertemente asociada a los eventos de surgencia que ocurren en esta región durante la primavera atribuido al mismo mecanismo descrito anteriormente para el  $\text{pCO}_2$ .

La variación temporal de  $\Omega_{\text{cal}}$  fue similar al de  $\Omega_{\text{arag}}$ , la cual respondió de manera similar a los procesos físicos que dominaron en la región. Pero los cálculos de  $\Omega_{\text{cal}}$  mostraron que el límite de subsaturación de esta variable se encontró por debajo de los 100 m de profundidad. Algo de destacar, es que se observaron valores cercanos al límite de subsaturación. Inicialmente, en el período de primavera del 2006, el agua subsaturada en  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega_{\text{cal}} < 1$ ) no se hizo presente, pero se observaron valores de  $\Omega_{\text{cal}} = 1.5$  por arriba de los 100 m de profundidad. Para el verano del 2007, esta isolínea ( $\Omega_{\text{cal}} = 1.5$ ) había ascendido ligeramente detectándose a 85 m de profundidad, mientras que en la primavera del 2008 alcanzó los 30 m de profundidad (fig. 9b).





**Figura 9.** Serie de tiempo de a)  $\Omega$  aragonita y b)  $\Omega$  calcita de la columna de agua en la estación Ensenada, de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008.

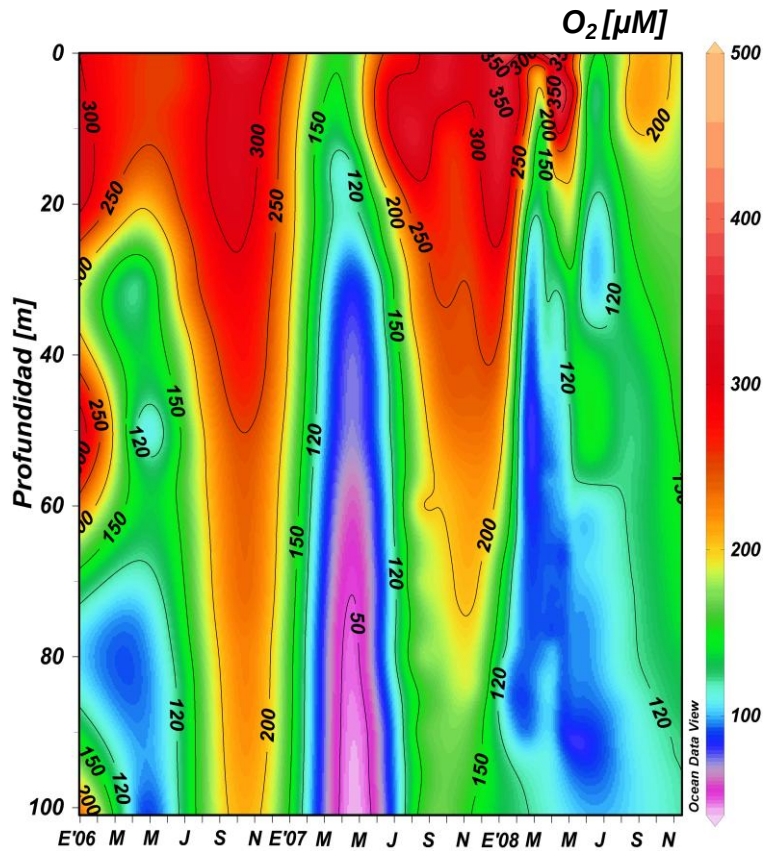
### 8.3.2 Variación temporal del OD y de la fluorescencia.

Al igual que en las anteriores variables, el oxígeno respondió a una marcada variabilidad espacial y temporal producto de los cambios en la oceanografía de la región (fig. 10). Inicialmente, en el período de primavera del 2006 se observó un ligero descenso en las concentraciones de oxígeno donde por ejemplo la isolínea de  $120 \mu\text{M}$  se encontraba a  $\sim 70$  m de profundidad. Esta condición de disminución de oxígeno coincide con el ascenso hacia la superficie de aguas con mayor concentración de CID y menor pH durante eventos de surgencias presentes durante primavera-verano. Para el invierno del 2006-2007, se observó un patrón completamente diferente en las concentraciones de oxígeno, asociado no sólo a la presencia de agua ligeramente más cálida, sino que también con altos valores de oxígeno de  $\sim 300 \mu\text{M}$  en los primeros 50 m de profundidad. Esta condición se observó en todas las variables medidas en este trabajo como se ha descrito anteriormente y es posible que esta condición oceanográfica, pueda estar asociada a la parte final de la influencia anómala de ASA.



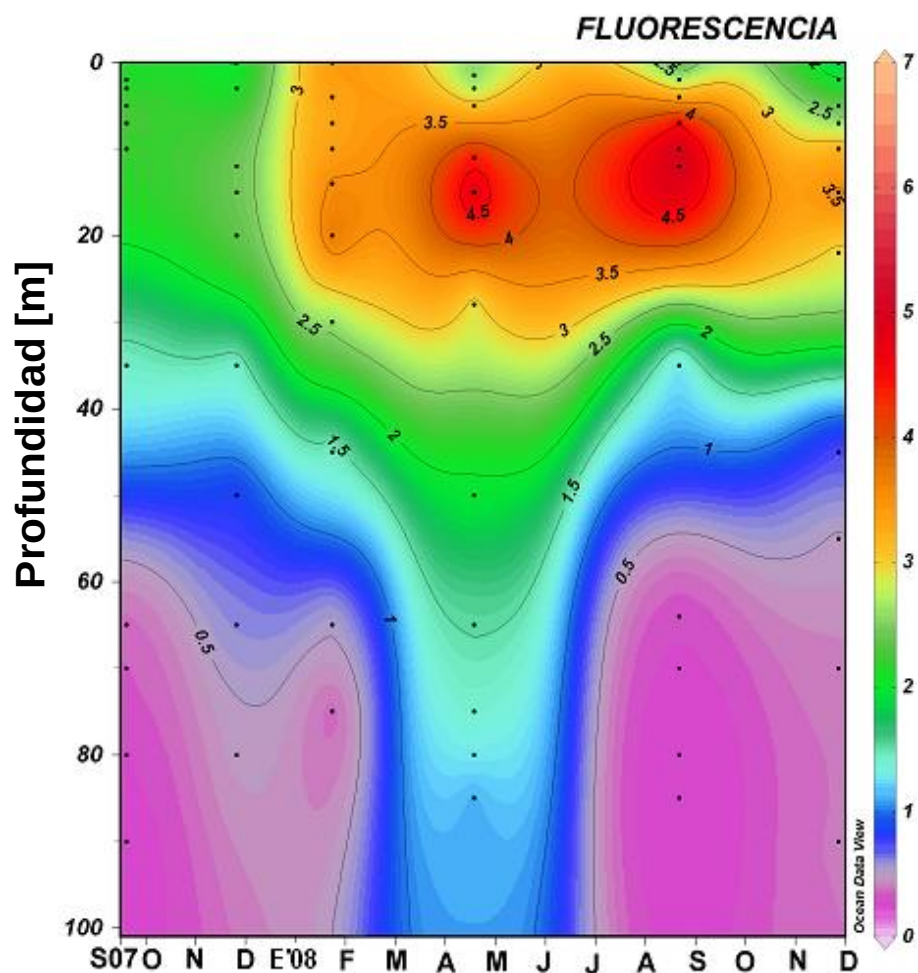
Para la primavera del 2007 se observó un claro descenso en las concentraciones de OD en gran parte de la columna de agua, con la presencia de isolínea de  $\sim 120 \mu\text{M}$  la cual ascendió hasta a  $\sim 20$  m de profundidad. Esto se vio asociado con igualmente con anomalías positivas en surgencias ( $> 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$  de línea de costa) las cuales originaron que aguas de origen profundo cercanas a la costa fueran transportadas hacia regiones menos profundas. Para el otoño se observó nuevamente un incremento cerca de los  $300 \mu\text{M}$  en el oxígeno, similar al observado en el 2006. Finalmente en el invierno del 2007-2008 y la primavera del 2008 se observó nuevamente un claro descenso en las concentraciones del oxígeno ( $120 \mu\text{M}$ ) producto de la incursión de agua profundas de bajas concentraciones de oxígeno observada a los  $\sim 20$  m durante un lapso de tiempo más largo en comparación con el 2007 (fig. 10).

En general se observó que las primaveras del 2006, 2007 y 2008 se destacaron por un ascenso de aguas con bajo contenido de oxígeno disuelto, asociadas con masas de aguas de origen ecuatorial las cuales se caracterizaron por ser subsaturadas en carbonatos ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ) producto de las surgencias. Estas observaciones resultaron congruentes con el ascenso de aguas frías y salinas así como con alto contenido de CID,  $\text{pCO}_2$  y bajos valores de pH y agua subsaturada en  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ).



**Figura 10.** Serie de tiempo de la concentración de oxígeno disuelto ( $\mu\text{M}$ ) en la columna de agua en la estación Ensenada, de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008.

En cuanto a la fluorescencia es importante señalar que no se tuvo la serie completa y que esta solo muestra los resultados a partir de septiembre del 2007 (fig. 11). Esta variable mostró una variabilidad temporal con un máximo en el 2008 en los meses de enero, abril y agosto destacando los dos últimos años con los picos máximos superficiales de  $\sim 6$  unidades respectivamente a una profundidad  $\sim 15$  m. Los máximos de fluorescencia coincidieron con una disminución superficial del carbono inorgánico disuelto (fig. 11). En general los datos sugieren que la mayor actividad biológica se vio restringida en los primeros 15 m de profundidad en primavera-verano.



**Figura 11.** Serie de tiempo de la fluorescencia (unidades relativas) en la columna de agua en la estación Ensenada, de Septiembre del 2007 a Noviembre del 2008.

## 9. DISCUSIÓN

En México son escasos los lugares donde se realizan series de tiempo en un observatorio de monitoreo costero (OMC) dedicadas a estudiar la dinámica de los parámetros del sistema del CO<sub>2</sub>. El programa FLUCAR (Flujos de Carbono), fue el primero en México en iniciar con investigaciones relacionadas con la biogeoquímica marina en la estación denominada Estación Ensenada. Este programa inició con el objetivo de estudiar el papel de la bomba biológica en las aguas costeras de Baja California, pero sobre todo, determinar si dicha zona se comporta como fuente o sumidero de carbono. Por lo tanto, la importancia de este trabajo es la contribución a la

producción de información de la química del carbono que permite estudiar y entender mejor las variaciones estacionales e interanuales en la zona costera de Baja California. La estación Ensenada forma parte también de una red internacional de sitios de monitoreo costero, localizados desde Canadá hasta BC México, que tienen como propósito el estudiar, comparar y monitorear juntos el sistema de la Corriente California (CC). Por ello, la estación Ensenada se considera un sitio de muestreo estratégico, debido a que a pesar de encontrarse a menos de tres km de la costa y en una zona poco profunda (< 100 m), es posible detectar variaciones estacionales e interanuales de las propiedades físicas de la CC como lo han descrito Linacre *et al.*, (2009). Este trabajo se enfocó principalmente en estudiar el papel de los procesos físicos y biológicos sobre el sistema de CO<sub>2</sub> y el oxígeno disuelto, variables fisicoquímicas que la comunidad científica tiene un alto interés, consecuencia de los cambios a gran escala que están ocurriendo en la actualidad debidas al cambio climático (Feely *et al.*, 2008; Chan *et al.*, 2008).

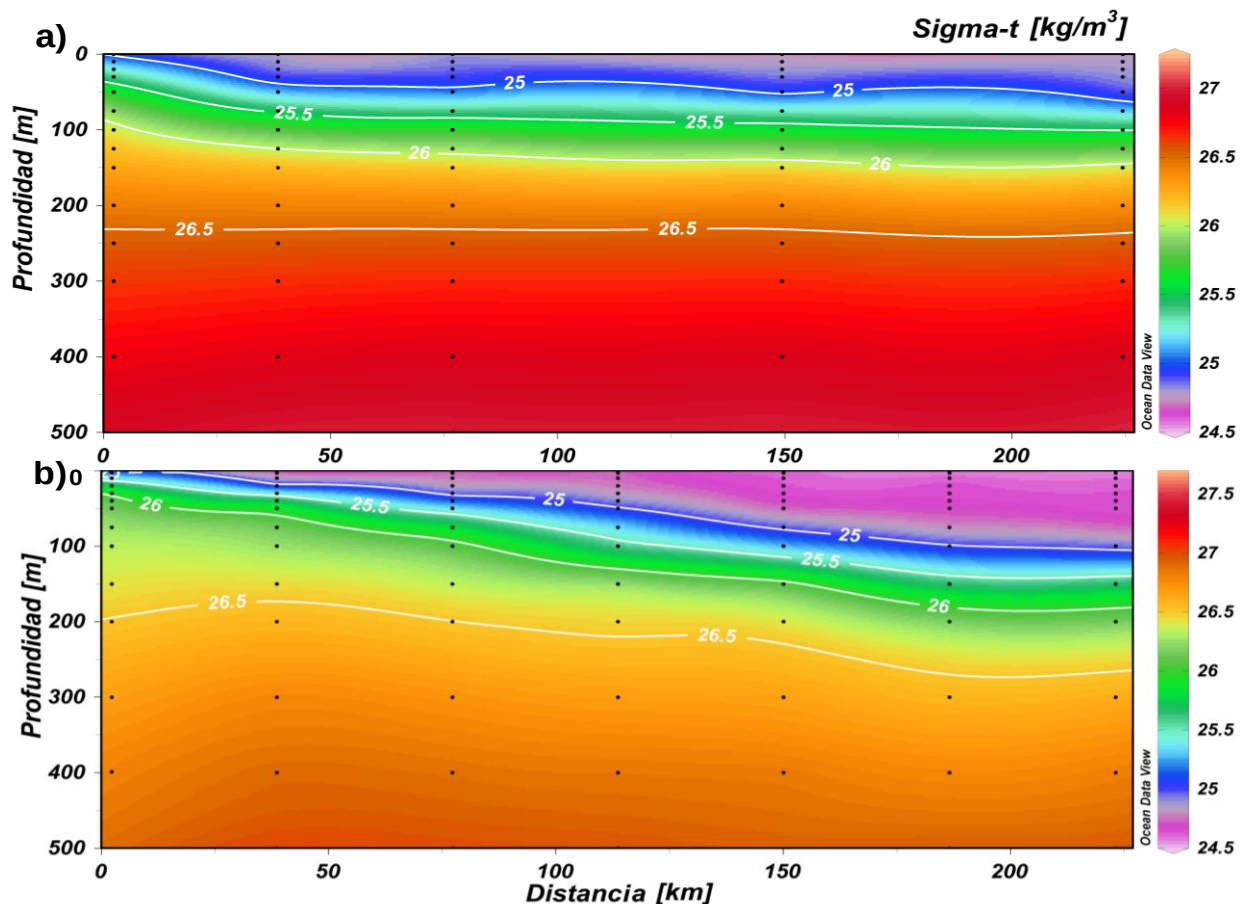
### **9.1 Variabilidad temporal de la temperatura y la salinidad.**

Roden (1971) reporta que la costa oeste de la Península de BC se considera una zona de transición, sobre la cual Durazo y Baumgartner (2002) reportaron que cerca de la superficie confluyen varios tipos de masas de agua entre ellas: Agua subártica (ASA), Agua transicional (ATS) y el Agua Subsuperficial Ecuatorial (ASsE). Sin embargo, el ASA permanece casi todo el año en las costas de BC, pero es aun más dominante su flujo durante primavera-verano cuando los vientos del noroeste son dominantes (Durazo *et al.*, 2010). En otoño e invierno se observó una disminución del ASA, mientras que el ASsE se incrementó producto de un flujo hacia el polo acarreado por la Contracorriente Subsuperficial (CcSs). La mezcla entre estas dos masas de agua promueve modificaciones en las propiedades químicas y físicas estacionales a todo lo largo de las costas de BC en los primeros 200 m de profundidad.

Si esto ocurre a todo lo largo de la Península de BC, se podría esperar observar dichos cambios en un solo punto de muestreo. Tal es el caso de lo observado en la estación 100.30 frente a las costas de Ensenada, en la cual se encontró una gran variación de la temperatura y salinidad a lo largo de los más de diez años de muestreos en la red IMECOCAL. Los resultados del análisis histórico muestran que los datos de un

sólo punto permiten detectar variaciones no sólo estacionales sino que también interanuales. Tal es el caso de la fase cálida reportada durante el 1997-98 asociada al evento EN-LN durante 1999-2002, un período de baja salinidad entre el 2002 al 2006 asociado a la entrada de un mayor volumen de Agua Subártica y finalmente LN nuevamente en el 2008. Adicionalmente, se detectó una respuesta biológica la cual se reflejó en una disminución del fitoplancton ocurrida desde el 2002 hasta el 2006 y un aumento del zooplancton (Gaxiola *et al.*, 2008). Lo anterior según los autores se atribuyó a una anomalía negativa en salinidad debida a un mayor volumen del ASA. Al realizar la comparación de las variables de T y S del OMC entre el 2006 al 2008 con los de la estación 100.30, se encontró un comportamiento muy similar. Se pudo detectar igualmente eventos interanuales como la parte final de la anomalía del ASA del 2006 y el evento LN 2007-2008 como lo reportan Linacre *et al.*, (2009). Dichos eventos modularon el comportamiento de las variables físicas en el agua por lo que de igual forma se esperaría que lo hicieran con las propiedades químicas.

De manera particular, en el OMC se encontró que la mayor variabilidad estacional de temperatura y salinidad ocurren en la capa superficial menor a 50 m (fig. 5). Además, que está modulado por una fluctuación estacional en los patrones de viento y temperatura atmosférica (Linacre *et al.*, 2009). Estos cambios estacionales están principalmente asociados a eventos de surgencia costera, que aunque son más intensos y frecuentes durante primavera (fig. 7), estos son recurrentes durante todo el año en esta zona (Di Lorenzo, 2003, Castro y Martínez, 2010). En la capa superficial, los vientos a lo largo de la costa son más intensos durante la primavera, pero fueron mucho más intensos y prologados durante el periodo del 2008. Esta condición generó un mayor ascenso de agua profunda de ~150 m observado en el transecto de la línea 100 para abril del 2008. En la figura 12 se comparan el transecto climatológico de los abrils de la línea 100 de IMECOCAL vs el observado en abril del 2008. Esto explica el transporte subsuperficial hacia la superficie reflejado en altas concentraciones en todas las variables químicas (figs. 5, 7 a 10).



**Figura 12.** Transecto climatológico de la línea 100 del mes de abril de IMECOCAL (a) y el medido en abril del 2008 de la línea 100 frente a las costas de Ensenada, B.C. (b).

En las aguas costeras de Ensenada, la mayor variabilidad en temperatura ocurre en la capa superficial (< 100 m) cercana a la costa, al igual que la salinidad. Las fluctuaciones estacionales de estos parámetros han sido asociadas con oscilaciones temporales de los patrones de viento y temperatura atmosférica. Los eventos de surgencia costera cuya magnitud y frecuencia aumenta hacia los meses de primavera-verano causó afloramientos hacia las costas de aguas subsuperficiales con alta salinidad.

Mediante el diagrama T-S se detectó solo la presencia de ASA durante todo el año y durante todo el periodo muestreado. Sin embargo, se puede observar claras variaciones de salinidad estacionales e interanuales producto de la mezcla de la masa de agua ASA con la ASsE en diferentes proporciones. Por lo tanto, los cambios de salinidad en ASA observados en el OMC, se pueden atribuir a mecanismos que

favorecen la mezcla con aguas de origen ecuatorial (200-400 m) que son transportadas hacia la superficie (figs. 5c y 6). Se ha reportado que en la porción sobre la plataforma continental se presentan flujos de una contracorriente superficial que fluye entre 10 a 20 km de la costa en dirección opuesta a la CC y que acarrea agua subtropical (Soto-Mardones *et al.*, 2004). Adicionalmente, Durazo *et al.* (2010) mencionan que es factible que la incursión de la contracorriente costera hacia el norte, esté asociada con giros y meandros cerca de la costa asociados con eventos de afloramiento y la geomorfología costera. Linacre *et al.* (2009), mostraron que frente a las costas de Ensenada durante octubre, las isopícnas superficiales de 25.2 a 25.4 kg/m<sup>3</sup> (asociadas con el ASA) presentan un pequeño domo en la parte central del transecto perpendicular a la costa, el cual se extiende verticalmente en toda la columna de agua, lo que generó posiblemente el levantamiento de aguas subsuperficiales y más salinas, que sugieren ser el resultado del flujo hacia norte. Estas observaciones explicarían los resultados obtenidos en los diagramas T-S de la figura 7.

La variabilidad temporal descrita en la sección de resultados sugiere que éste sitio costero es sensible a señales interanuales. Esto es consistente con los resultados mostrados por Linacre *et al.* (2009). En particular es factible resaltar el año 2006 donde se detectó la terminación del período de baja salinidad asociado a una mayor entrada de volumen del Agua Subártica (Durazo, 2009). Lo anterior se observó en los primeros meses del 2006 de forma más intensa debido a la presencia de aguas de menor salinidad como se observa en el diagrama T-S (fig. 6). Estas anomalías coinciden con lo reportado por Gaxiola-Castro *et al.* (2008) y Durazo (2009) quienes mencionan la presencia anómala de volúmenes mayores de ASA a lo largo de las costas de California.

Algo a destacar en los diagramas T-S durante el periodo del 2007, fue la presencia de una cuña de agua subsuperficial de baja salinidad durante el mes de noviembre, esta condición coincidió con la presencia de un giro anticiclónico observado en imágenes altura dinámica en que dicho giro pudo haber transportado agua de menor salinidad de la CC hacia la costa (<http://argo.colorado.edu/~realtime/welcome/>), lo cual no se observó en los meses anteriores. Adicionalmente el índice de surgencia observado en noviembre fue uno de los valores más bajos ( $\sim 80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$  de



línea de costa) caracterizado por bajas concentraciones de CID y una columna de agua más oxigenada (figs. 8 y 10).

Caso diferente fue el 2008, donde los datos mostraron la presencia del efecto de LN en los meses de enero a mayo. Este patrón fue reflejado principalmente en la temperatura, salinidad y sigma-t en la capa superficial (0-50 m) durante el período del 2008 (fig. 5). Linacre *et al.* (2009) reportó hasta inicios del verano del 2008 la presencia de anomalías negativas de temperatura de alrededor  $-1.2^{\circ}\text{C}$ , anomalías positivas de salinidad de  $> 0.2$  para el OMC y del índice de surgencias mayores a los reportados para el 2007 (McClatchie *et al.* 2008, Durazo, 2009, Linacre *et al.*, 2009). Los muestreos del 2006 al 2008 están dentro de un periodo negativo de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (McClatchie *et al.* 2008). Donde el PDO es un fenómeno que se encuentra fundamentalmente en el Pacífico Norte (en contraposición al Niño, que afecta sobre todo al Pacífico tropical), Tiene dos fases entre las que suele alternar, la fase cálida (valores positivos) o fase fría (valores negativos). La fase fría se caracteriza por presentar temperaturas frías en la superficie del mar a lo largo de la costa del Pacífico de Norteamérica, mientras que el centro del Pacífico Norte permanece cálido (<http://www.wrh.noaa.gov/fqz/science/pdo.php?wfo=fqz>). Esta condición podría haber tenido un efecto a favor de las surgencias durante la primavera del 2007, pero principalmente durante el 2008 (figs. 5 y 7), ya que en la primavera de dicho año se observó aguas mas frías, salinas, pobres en oxígeno disuelto y ricas en CID muy cerca de la superficie (figs. 5, 9a y 10). Por lo tanto estas condiciones permiten entender porque agua de ~200 m de profundidad fueron detectas en aguas superficiales de las costas de Ensenada.

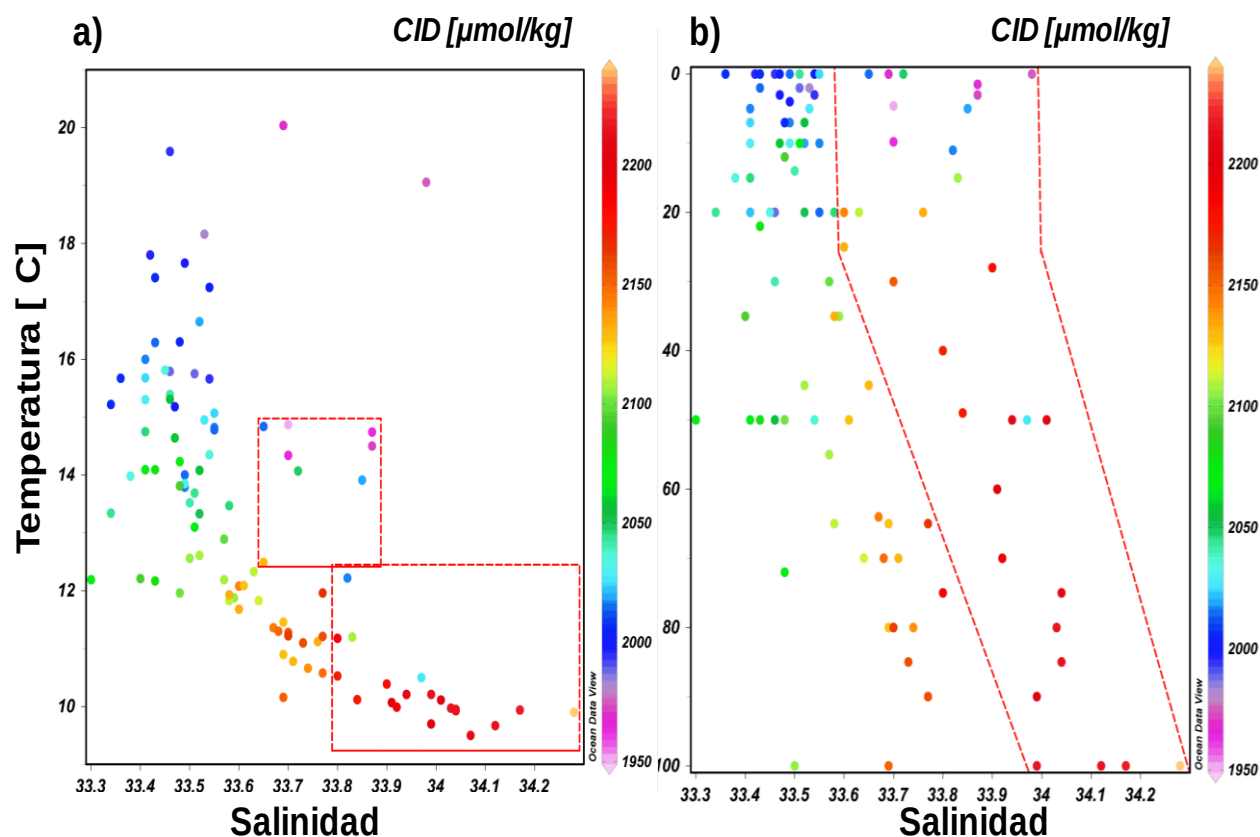
## **9.2. Distribución de las variables del sistema del CO<sub>2</sub>.**

De las condiciones físicas que se describieron anteriormente, resalta que en la estación Ensenada domina el ASA. Las propiedades termohalinas de esta masa de agua pueden ser modificadas como resultado de la mezcla con aguas más profundas con características de agua ASsE de una forma no detectable vía diagramas T-S. El uso de variables químicas en conjunto con los diagramas T-S podrían ayudar a caracterizar e identificar procesos biogeoquímicos o físicos. Se ha descrito que los



cambios en las fronteras de las masas de agua que se han suscitado, establecen muchas de las condiciones que modulan los cambios en la biodiversidad biológica y química de la región (Bograd y Lynn, 2003; Gaxiola-Castro *et al.*, 2008; Durazo, 2009). En escalas de tiempo desde estacionales hasta decadales, la variabilidad observada en el SCC juega un papel importante en los procesos biogeoquímicos, por lo que el uso de las variables químicas en conjunto con las físicas se vuelven herramientas que ayudarán a tener un mejor entendimiento de los cambios en las condiciones oceanográficas del SCC.

como se explicó anteriormente, los diagramas T-S mostraron claramente la distribución de las masas de aguas donde el ASA dominó durante todo el periodo de muestreo, pero con cambios de salinidad asociados a la mezcla de ASA con el ASsE. Sin embargo, al adicionar el CID al T-S se observó en los muestreos de abril y junio del 2006 al 2008 una clara separación no sólo por salinidad, sino por el ascenso de aguas profundas con alto CID mayor a  $2100 \mu\text{mol kg}^{-1}$  cerca de la plataforma a  $\sim 60$  m en el 2007 y  $\sim 30$  m en el 2008. Este ascenso estuvo asociado al periodo de transición a la fase madura de La Niña (ver fig.13). El contraste fue el 2006, donde presentó un enriquecimiento menor a  $2100 \mu\text{mol kg}^{-1}$  en gran parte de la columna. Dicha condición se relacionó con la parte final del periodo del Agua Subártica (fig. 13). Lo anterior sugiere que para realizar una caracterización de las masas de aguas, es importante considerar también las características químicas que se presentan en la zona.



**Figura 13.** Diagramas de a) T-S vs CID y b) Profundidad-Salinidad vs CID (dentro de los recuadros se observa los datos de los periodos de abril y julio del 2006-2008).

Las variaciones estacionales y de largo período en las propiedades físico-químicas del agua, pueden producir alteraciones en la estructura de la columna de agua. La profundidad de la capa de mezcla y la termoclina puede provocar cambios en el aporte de nutrientes inorgánicos y carbono inorgánico a la zona eufótica, con el consecuente impacto en la producción primaria y secundaria (Lavaniegos y Ohmann, 2003, Gaxiola *et al.*, 2008). A largo plazo, estos cambios podrían manifestarse en el Observatorio de Monitoreo Costero, debido a la diferencia temporal registrada durante todo el período de muestreo, modulado no sólo por la estacionalidad propia de la zona, sino además por eventos interanuales, como ocurrió durante la primavera del 2008.

Las variables químicas presentaron un patrón similar a las propiedades termohalinas ya que mostraron una distribución estacional en gran parte de la columna de agua por debajo de los 40 m de profundidad. Estacionalmente, las bajas concentraciones superficiales de CID y  $p\text{CO}_2$  fueron evidentes, caso contrario fue lo

detectado a lo largo de la columna donde se observó un ascenso de aguas ricas en CID y  $p\text{CO}_2$ , con pH bajo durante la primavera del 2007 y 2008 el cual llegó a escasos 30 m de profundidad. En contraste, en el 2006 las aguas ricas en CID y  $p\text{CO}_2$  fueron detectados a ~50 m de profundidad. Los otoños-inviernos mostraron aguas ricas en CID aun más profundas.

Durante la primavera del 2008 el ascenso de aguas ricas en CID estuvieron asociadas con la isopícna de  $26.2 \text{ kg/m}^3$  la cual se caracterizó por tener concentraciones de CID de  $2175 \mu\text{mol kg}^{-1}$  y un pH de 7.7 con valores de subsaturación en carbonatos ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ). Esta agua localizada a 200 m de profundidad en la región más oceánica de las estaciones de IMECOCAL, por debajo de los 60 m en la estación más costera frente a Ensenada (figs. 8a- b y 12). Esto concuerda con los resultados recientes que han mostrado que la plataforma continental de América del Norte fue afectada por la acidificación del océano producto de las surgencias en el verano del 2007 (Feely *et al.*, 2008).

Se observaron también variaciones interanuales, donde destacaron los periodos del 2006 y 2008, donde en el 2006 se presentó una serie de anomalías negativas en salinidad y temperatura asociadas a la entrada de un mayor volumen de Agua Subártica. Esto podría explicar la disminución del carbono inorgánico disuelto,  $p\text{CO}_2$  y nutrientes lo que podría generar una variación en el comportamiento de las células de fitoplancton las cuales respondieron con un crecimiento muy bajo (principalmente diatomeas) en el periodo 2002-2006. Este comportamiento se atribuye a las bajas concentraciones de silicatos presentes en la CC (Goericke *et al.*, 2005). En contraste, durante el evento de LN del 2008 se presentaron fluctuaciones muy claras de las variables químicas en la vertical con un significativo ascenso de aguas enriquecidas en CID,  $p\text{CO}_2$  y nutrientes. Por ejemplo se observó el ascenso de las isolíneas de pH=7.7, CID= $2175 \mu\text{mol kg}^{-1}$  y  $p\text{CO}_2=840 \mu\text{atm}$  cerca de la superficie (30 m), las cuales fueron muy similares con lo observado por Feely *et al.* (2008) durante junio del 2007 con valores de CID =  $2190 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , pH = 7.75 y  $p\text{CO}_2=850 \mu\text{atm}$ . Estas condiciones generaron aguas de bajo pH subsaturadas en  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ) que fueron detectadas a ~60 m de profundidad. Esta condición estuvo asociada al periodo extendido de surgencias con características de aguas ricas en nutrientes, CID y bajo pH hacia zona

eufótica ocurrido durante la condición del evento La Niña del 2008 (figs. 7 y 8). Estos podrían jugar un papel muy importante en la disponibilidad del ion carbonato disponible en la columna de agua el cual es necesario para que todos aquellos organismos marinos formen sus exoesqueletos de  $\text{CaCO}_3$  (Feely *et al.*, 2008).

### **9.3 Variabilidad temporal del omega de aragonita y oxígeno disuelto.**

En este trabajo se describió la diferencia estacional de los eventos de surgencias presentes durante las primaveras del 2006, 2007 y 2008 en las cuales se observó un ascenso de agua enriquecida en CID y  $\text{pCO}_2$  pero con el consecuente ascenso de aguas pobres en oxígeno disuelto, subsaturadas en carbonatos y con bajos valores de pH. En contraste durante el periodo de invierno del 2006-2007 y 2007-2008, hubo ausencia de aguas subsaturadas en carbonatos y oxígeno disuelto.

El  $\Omega_{\text{arag}}$  y el oxígeno mostraron una distribución temporal similar al resto de las variables del  $\text{CO}_2$  (figs. 9a y 10). Es usual registrar valores altos de oxígeno en la capa superficial debido a un mayor intercambio entre el océano y la atmósfera. Esto se observó prácticamente desde fines del 2006 hasta principios del 2007 en gran parte de la columna de agua, donde además de estar bien oxigenada también se detectaron aguas saturadas en carbonatos ( $\Omega_{\text{arag}} > 1$ ). En las primaveras del 2006 al 2008 al igual que lo observado en las variables hidrológicas se observó esta variación en el oxígeno y  $\Omega_{\text{arag}}$ , los cuales se caracterizaron por un ascenso de aguas con bajo contenido de oxígeno disuelto y subsaturadas en  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ) como resultado de la mezcla del ASA con masas de aguas de origen subtropical. Destacó nuevamente la primavera del 2008, con un claro ascenso de aguas con bajo oxígeno ( $\sim 120 \mu\text{M}$ ) y con valores  $< 1$  de  $\Omega_{\text{arag}}$  muy cercanas a la superficie (30 m). La presencia de agua con bajas concentraciones de oxígeno y subsaturadas fueron detectadas en la primavera del 2007 pero fue aun más somera y presente por un lapso de tiempo mayor en el 2008 producto de la influencia del evento LN (figs. 9a y 10). En otoño e invierno las condiciones volvieron a una columna de agua con alto oxígeno y saturadas en  $\text{CaCO}_3$  ( $\Omega_{\text{arag}} > 1$ ) como ocurrió con el resto de las variables.

Se observó un efecto por variaciones interanuales como ya se menciono para LN 2007-2008. Sin embargo durante el evento de baja salinidad (ASA) desarrollado desde

el 2002 y finalizó en el 2006 (Durazo, 2009), se encontraron aguas oxigenadas y con características oligotróficas pobres en CID, con valores de pH cercanos al valor en equilibrio  $\sim 8.04$  y con aguas saturadas en carbonatos ( $\Omega_{\text{arag}} > 1$ ) en gran parte de la columna (figs. 8, 9, 10 y 11). Por lo tanto, durante este evento la columna de agua en la estación Ensenada sólo mostró las características de ASA en toda la columna y evitó el intercambio con aguas subtropicales lo que evitó el ascenso de aguas subsaturadas en carbonatos, pobres en oxígeno y de bajo pH. El efecto fue que además presentó aguas de bajas concentraciones en nutrientes, CID dando como resultado en aguas poco productivas las cuales afectaron negativamente al fitoplancton y zooplancton a lo largo del SCC (Gaxiola-Castro *et al.*, 2008; Lavaniegos, 2010).

Sin embargo, las condiciones oceanográficas del 2008 incluyendo la intensidad de las surgencias fueron diferentes a las observada en el 2007. La respuesta de estos forzamientos de gran escala fue reflejada en la presencia anómala en estratos superficiales de aguas de origen subsuperficial durante la primavera del 2007, pero principalmente durante el 2008. Esto es asociado a eventos de surgencia costera generados por fuertes vientos hacia el sur a lo largo de la costa, que aunque son frecuentes y fuertes en ésta zona durante la época de primavera, fueron más intensos de lo normal frente a las costas de la parte central de California y Baja California durante la primavera del 2007 y 2008 (ver figura suplementaria 3 en Durazo 2009). Además, esto es coincidente con las condiciones reportadas para la costa de Ensenada durante enero-febrero del 2007, donde un intenso evento de surgencia costera se registró fuera de tiempo en su patrón estacional (McClatchie *et al.*, 2008). Adicionalmente, datos de las anomalías del índice de surgencia reportados por la NOAA para los  $30^{\circ}\text{N}$ , señalan altos valores positivos en las primaveras del 2007 y 2008, con anomalías máximas ( $> 100 \text{ m}^3/\text{s}/100$  metros lineales de costa) en marzo y abril del 2008 (<http://www.pfel.noaa.gov/>).

Lo anterior se vio reflejado por ejemplo en que la isolínea de subsaturación de carbonatos ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ) presentó un ascenso, lo que provocó que aguas profundas y subsaturadas no sólo con bajos valores de pH (7.7), sino que también con bajas concentraciones de oxígeno ( $< 120 \mu\text{M}$ ) se encontraran sobre la plataforma continental ( $\sim 30$  m de profundidad) (fig. 9a). Lo anterior pudiera provocar no sólo

problemas serios en organismos marinos que forman esqueletos y conchas calcáreas, sino también condiciones limitadas para organismos acondicionados a vivir en aguas bien oxigenadas. En relación al oxígeno, se ha reportado una disminución a lo largo de la plataforma hacia la parte sur del SCC con valores de  $\sim 60 \mu\text{M}$  a  $\sim 90 \text{ m}$  de profundidad (Bograd *et al.*, 2008). En otro trabajo realizado desde San Diego hasta la región subtropical de las costas de México, se encontró una relación entre la presencia del ASsE con agua subsaturada en carbonatos ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ) y bajas concentraciones de oxígeno para la región sur de BC. El ASsE se encuentra normalmente a  $200 \text{ m}$  de profundidad en las costas de BC. Sin embargo, su presencia durante condiciones La Niña en conjunto con las fuertes surgencias pudieron propiciar una mayor mezcla de ASA con ASsE reflejado en una mayor salinidad de ASA en el 2008 y en cambios de la química de dicha agua. Como se mencionó, en el 2008 se observó el ascenso de agua con bajas concentraciones en oxígeno que llegó hasta  $\sim 20 \text{ m}$  de profundidad. Si esta tendencia persistiera se podrían tener severas consecuencias en áreas donde la surgencia estacional de aguas hipóxicas invade la plataforma continental. Tal es el caso de Punta Concepción (California), donde se ha registrado disminuciones de oxígeno sobre el rango de  $50$  a  $100 \text{ m}$  en un periodo de  $23$  años lo cual podría generar efectos sobre los ecosistemas bentónicos y pelágicos, tales como compresión del hábitat y reorganización comunitaria (Bograd *et al.*, 2008, Chan *et al.*, 2008).

En relación a la aragonita, se presentaron en el 2008 una serie de anomalías positivas en los índices de surgencias las cuales acarrearón aguas ricas en CID y  $\text{pCO}_2$ , más ácidas y subsaturadas respecto a la aragonita y que coincidió con la isolínea de subsaturación de carbonatos ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ) y con las isopícnas entre  $26$  y  $26.2$  durante el periodo muestreado. Esto fue también similar a lo reportado por Feely *et al.* (2008) para las costas de Oregón California lo cual indica que el agua subsaturada de estas costas pudiera ser asociada a la misma agua observada al norte de California.

#### **9.4 Fuente o Sumidero de Carbono.**

Se ha encontrado que existen grandes extensiones del océano como el Pacífico Ecuatorial, donde se presentan altos aportes de  $\text{CO}_2$  hacia a la atmósfera, en comparación con las latitudes altas donde el océano actúa principalmente como un

captador de  $\text{CO}_2$  atmosférico (Barber y Chavez, 1983). Se ha reportado que la información sobre los flujos de océano-atmósfera de  $\text{CO}_2$  en la franja costera es insuficiente y dispersa. Como consecuencia de las surgencias, frentes de marea, descargas de ríos, intercambio con sedimentos y procesos biológicos se reconoce que estas zonas presentan las mayores variaciones temporales en los valores de la presión parcial de  $\text{CO}_2$  en la superficie marina (Kempe, 1982; Mackenzie *et al.*, 1991, Wollast, 1991). De este hecho, surge la necesidad de implementar monitoreos de la  $\text{pCO}_{2\text{mar}}$ , no sólo en diferentes regiones geográficas, sino bajo diferentes condiciones biogeoquímicas. Por lo tanto, en esta sección se presenta la variabilidad temporal del  $\text{pCO}_2$  y  $\Delta\text{pCO}_2$  en el océano frente a las costas de Ensenada.

El  $\Delta\text{pCO}_2$  se expresa por la diferencia entre las presiones parciales de la atmósfera y el océano. Este parámetro indica el grado de saturación de  $\text{CO}_2$  en el océano con relación a la atmósfera. Los valores positivos de  $\Delta\text{pCO}_2$  muestran que el océano está sobresaturado de  $\text{CO}_2$  con relación a la concentración de  $\text{CO}_2$  atmosférico, lo cual podría forzar un flujo del océano hacia la atmósfera. Los valores negativos de  $\Delta\text{pCO}_2$ , indican que el océano está subsaturado con respecto a la atmósfera por lo que se esperaría un flujo de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera hacia el océano.

Una de las limitaciones que se tienen al realizar muestreos bimensuales como ocurrió en este análisis, es que en las aguas superficiales (primeros 20m) se puede perder información de gran importancia de escala diaria a semanal, al grado de limitar las observaciones estacionales. Sin embargo, por debajo de los 20 metros fue posible conocer el comportamiento de la estación Ensenada en diferentes condiciones como las que se presentaron a lo largo del 2006 al 2008, durante el evento LN. Los cálculos del  $\Delta\text{pCO}_2$  muestran que durante febrero a diciembre (2006), se observaron valores cercanos al valor en equilibrio con la atmósfera (387  $\mu\text{atm}$ ), en contraste con lo encontrado para el 2007 y 2008, donde se observaron valores positivos (> a 40  $\mu\text{atm}$ ) lo que sugiere que la zona se comporta como una fuente de  $\text{CO}_2$  hacia la atmósfera. Algo a destacar en los periodos de julio del 2007 (~150  $\mu\text{atm}$ ) y abril del 2008, es que se observaron los valores más altos de  $\Delta\text{pCO}_2$  (~100  $\mu\text{atm}$ ). Estas características perduraron hasta agosto del 2008 y regresaron después a una condición “normal” para los meses posteriores (fig. 14). Si se considera que el periodo 2007-2008 se presentó el

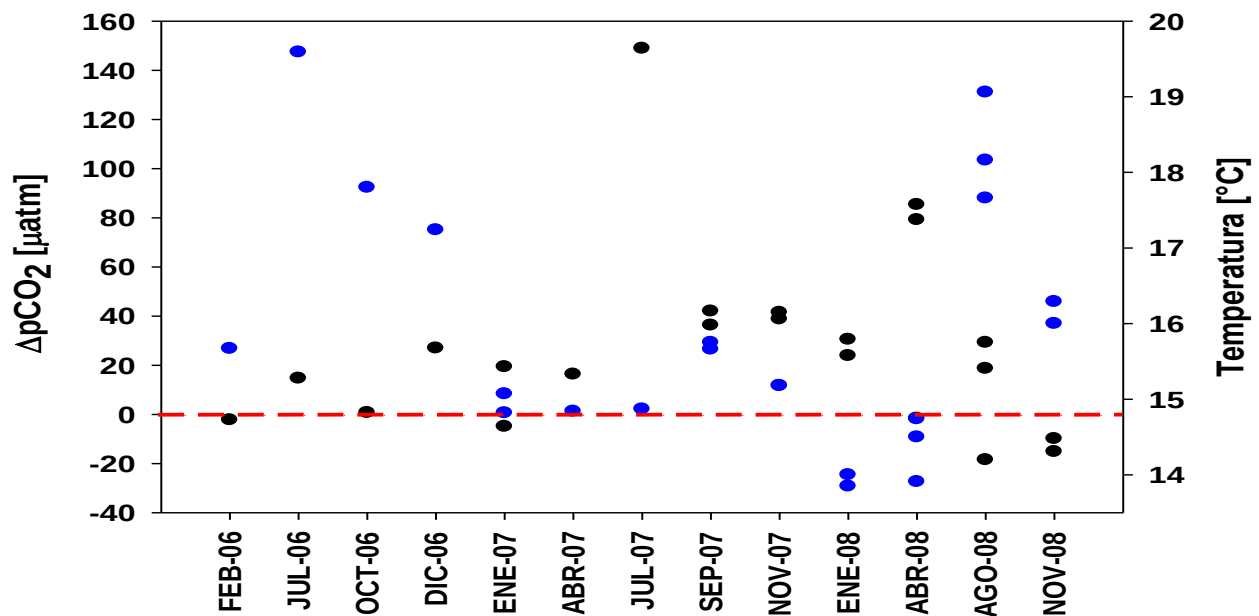
evento LN, este comportamiento concuerda con lo descrito por Friederich *et al.*, (2002) para las costas de Oregón. Ellos encontraron que durante la fase fría (LN) se observó un gradiente positivo ( $\sim 250 \mu\text{atm}$ ) que propició que esta zona se comportara como una fuente de  $\text{CO}_2$  hacia la atmósfera, en contraste con lo observado durante la fase cálida (EN) donde el flujo fue en sentido contrario lo que sugiere que se comportó como un sumidero de  $\text{CO}_2$ .

Cabe mencionar que en esta investigación inicialmente se contaba con una boya oceanográfica instalada a principios del 2006, pero que presentó problemas técnicos y fue reinstalada en el verano del 2008. Los datos generados en dicha boya corresponden al periodo de agosto del 2008 a noviembre del 2009, y muestran de forma detallada la variación estacional superficial del  $\text{pCO}_2$ , salinidad y temperatura de un año. Sin bien no corresponden al periodo de muestreo de este trabajo, sí permiten visualizar un comportamiento similar a lo que sugieren los datos de este trabajo. En general la variabilidad observada en la boya se puede dividir en dos partes: 1) Un periodo donde la estación Ensenada se comportó como fuente de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera y que corresponde a los meses de primavera-verano, y 2) un periodo donde la estación Ensenada se mostró como sumidero o cercano al equilibrio (fig.15). Se observó que en otoño e invierno 2009 presentaron  $\Delta\text{pCO}_2$  cercanos al valor en equilibrio ( $387 \mu\text{atm}$ ), asociado a un debilitamiento de los vientos que provocaron una disminución de los procesos de surgencia, mientras que en primavera-verano (2009) se observó el efecto de la surgencia con valores positivos de  $\Delta\text{pCO}_2$  de  $\sim 300 \mu\text{atm}$ , lo que sugiere que el océano se comportó como una fuente de  $\text{CO}_2$  hacia la atmósfera. Durante este periodo se observó una clara disminución de la temperatura y alto  $\text{pCO}_2$  (fig. 15). Otros estudios realizados para la región de Baja California, han mostrado que para los periodos de invierno-primavera hay un flujo con dirección hacia el océano, en contraste con el verano-otoño en los cuales se observó un flujo de  $\text{CO}_2$  hacia la atmósfera (Hernández–Ayón *et al.*, 2010). Este comportamiento no concuerda con lo observado para el OMC, pero podría deberse a que sus mediciones fueron más oceánicas y no tiene la influencia de los procesos físicos locales que se presentan cerca de la costa. Esto se puede observar de una manera más detallada en la figura 16, la cual nos muestra que la mayor variabilidad de  $\text{pCO}_2$  se da en la zona costera. En particular las regiones de

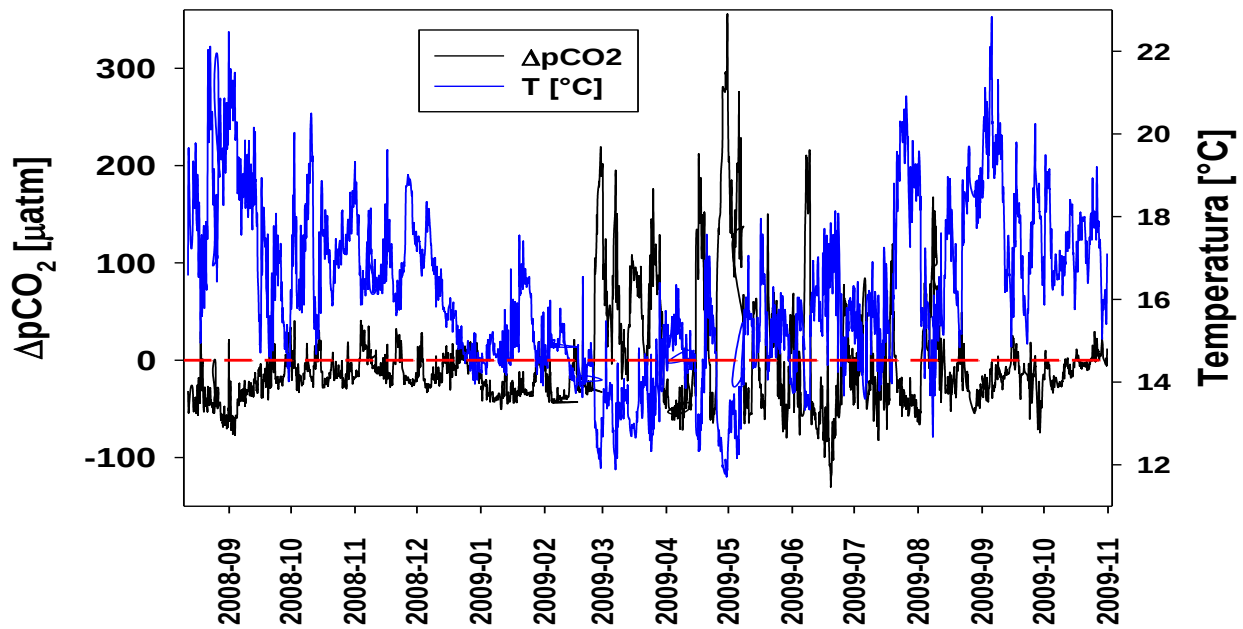


California y Baja California presentan eventos de surgencias los cuales ocurren justo en esa región que comprende los primeros 80 km. El contraste es la región oceánica, donde se observa un comportamiento inverso, debido a que los procesos físicos tienen un menor efecto, mientras que lo contrario podría ocurrir con los biológicos (Chávez *et al.*, 2007).

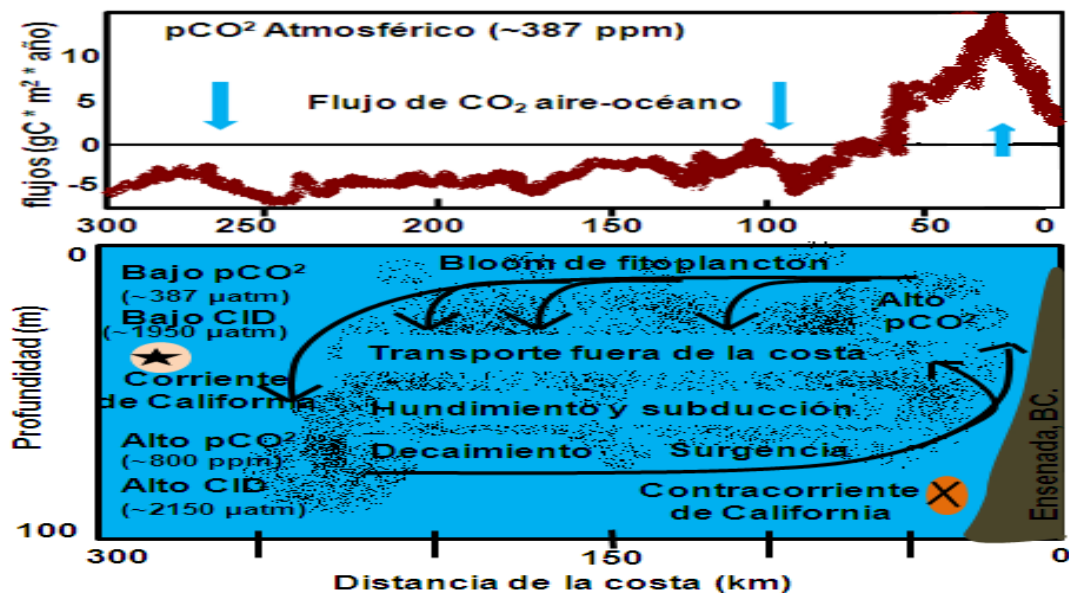
Se ha sugerido que las costas mexicanas y en general para las zonas en latitudes menores a los 30°N, en promedio anual suelen comportarse como una fuente de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mientras que la zona norte por arriba de los 40°N se comportan como sumideros (Chávez *et al.*, 2007). Sin embargo el valor neto anual del  $\Delta p\text{CO}_2$  en la estación Ensenada resulta en valores negativos que concuerdan con lo reportado por Hernández -Ayón *et al.*, (2010). Los resultados generados hasta el momento en este estudio y los generados previamente resaltan la necesidad de realizar muestreos más detallados para las regiones costeras.



**Figura 14.** Variación estacional del  $\Delta p\text{CO}_2$  superficial durante el periodo de Febrero del 2006 a Noviembre del 2008 frente a las costas de Ensenada, B.C (los puntos negros representan los valores del  $\Delta p\text{CO}_2$  y los azules la temperatura).



**Figura 15.** Serie de tiempo de  $\Delta p\text{CO}_2$  (línea negra) y temperatura (línea azul) en la estación Ensenada de Agosto del 2008 a Noviembre del 2009.



**Figura 16.** El esquema representa la dinámica del carbono para la región de Ensenada (BC), la cual pretende resaltar el flujo de  $\text{CO}_2$  entre océano-atmósfera producto de los procesos de surgencia (panel superior). La zona abarca ~80 km, posterior a esta distancia se observa como los altos valores de  $\text{CO}_2$  disminuyen producto del consumo de carbono por el fitoplancton hasta llegar a convertirse en un sumidero de carbono. En contraste, en los primeros 20 km se observa como esta zona que se comporta como

fuentes de carbono hacia la atmósfera producto del transporte subsuperficial cerca de la costa (Figura modificada de Chávez *et al.*, 2007).

Como se observó en este trabajo, las propiedades físico-químicas fueron sujetas a los cambios estacionales de la oceanografía física de la zona, así como a la presencia de eventos interanuales como La Niña y la anomalía del ASA. Finalmente los resultados de este trabajo sugieren que la estación Ensenada es un sitio que permite monitorear los cambios estacionales e interanuales de las variables de sistema del CO<sub>2</sub> que ocurren en la región norte de Baja California. Así, la importancia de un monitoreo continuo en zonas costeras que forman parte del SCC, radica no sólo en visualizar la variabilidad temporal en las condiciones físico-químicas, sino además en establecer la línea base del estado presente que permitirán generar pronósticos a futuro de los ecosistemas marinos en las costas de Baja California.

## 10. CONCLUSIONES

1. En la estación Ensenada además de observar variaciones estacionales en las variables físico-químicas, también fue posible detectar variaciones interanuales como la anomalía del ASA y el evento de LN.
2. Durante el 2006, en la estación Ensenada se observó la presencia de aguas menos salinas asociadas a la presencia de altos volúmenes anómalos del ASA reportado por diversos autores, mientras que en el 2008 se encontró aguas más frías y salinas asociado al evento de LN.
3. Los diagramas T-S mostraron la distribución de las masas de aguas observadas en la estación Ensenada, se encontró una dominancia del ASA durante todo el periodo de muestreo, pero con cambios de salinidad asociados a la mezcla de ASA con el ASsE principalmente en primavera-verano. Las diferencias fueron resaltadas con diagramas T-S-CID.

4. Durante LN y en combinación con eventos de surgencia se observó la presencia de aguas más densas de origen profundo (~150m) cerca de la plataforma con temperaturas más frías y salinas comparadas con el valor climatológico. Esta condición se caracterizó por la presencia de bajas concentraciones de oxígeno, bajo pH y altas concentraciones de CID y  $p\text{CO}_2$ .
5. Adicionalmente, durante el evento LN se caracterizó por la presencia de aguas subsaturadas en omega aragonita detectadas a ~30m. En el verano del 2007 se habían observado aguas subsaturadas a ~60m de profundidad.
6. Se calcularon valores de  $\Delta p\text{CO}_2$  positivos en la estación Ensenada durante el evento de LN 2008, lo que sugiere que la zona durante este periodo se comportó como una fuente de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera.
7. Durante el periodo del ASA se observó la presencia de aguas menos productivas con un mayor pH, bajas concentraciones de CID y  $p\text{CO}_2$ . Adicionalmente los cálculos del  $\Delta p\text{CO}_2$  mostraron valores cercanos al valor en equilibrio con la atmosfera (387uatm) conjuntamente con aguas saturadas en omega de aragonita.

## 11. LITERATURA CITADA

- Amador JA, Alfaro EJ, Lizano OG, Magaña VO. (2006). Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69: 101–142.
- Barber RT, Chavez FT. (1983). Biological consequences of El Niño. *Science* 222: 1203-1210.
- Bakun A, Nelson CS. (1977). Climatology of upwelling related processes off Baja California. *CalCOFI Rep.* 19: 107–127.
- Bograd, S. J., and R. J. Lynn (2003), Anomalous subarctic influence in the southern California Current during 2002, *Geophys. Res. Lett.*, 30(15), 8020, doi:10.1029/2003GL017446.
- Bograd SJ, Castro CG, DiLorenzo E, Palacios D, Bailey H, Gilly W, Chavez FP. (2008). Oxygen declines and the shoaling of the hypoxic boundary in the California Current. *Geophys. Res. Lett.* 35:L12607, doi:10.1029/2008GL034185.
- Chan F, Barth JA, Lubchenco J, Kirincich A, Weeks H, Peterson WT, Menge BA. (2008). Emergence of anoxia in the California Current large marine ecosystem. *Science*: 319, 920.
- Chavez, F.P., T. Takahashi, W.-J. Cai, G. Friederich, B. Hales, R. Wanninkhof, y Feely R.A. (2007). Coastal Oceans. In: *The First State of the Carbon Cycle Report (SOCCR): The North American Carbon Budget and Implications for the Global Carbon Cycle. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research* [King, A.W., L. Dilling, G.P. Zimmerman, D.M. Fairman, R.A. Houghton, G. Marland, A.Z. Rose, and T.J. Wilbanks (eds.)]. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center, Asheville, NC, USA, pp. 157-166.
- Chen, TA, Liu KK, MacDonald R. (2003). Continental margin exchanges. En: Fasham Mj(ed), *Ocean Biogeochemistry: The role of the ocean carbon cycle in global change*. Springer-Verlag. New Cork. Pp. 53-62.
- Di Lorenzo E. (2003). Seasonal dynamics of the surface circulation in the Southern California Current System, *Deep Sea Res. Part II.* 50: 2371–2388.
- Dickson, A. G., Afghan, J. D., and Anderson G.C. (2003). Reference materials for oceanic CO<sub>2</sub> analysis: a method for the certification of total alkalinity. *Marine Chemistry*, 80: 185-197.
- Durazo, R., Baumgartner, T.R., Bograd, S.J., Collins, C.A., de la Campa, S., García, J., Gaxiola-Castro, G., Huyer, A., Hyrenbach, D., Loya, D., Lynn, R.J., Schwing, F.B., Smith, R.L., Sydemann, W.J., Wheeler, P. (2001). The state of the California Current 2000-2001: A third straight La Niña year. *CalCOFI Reports*, 42, 29-60.

- Durazo R, Baumgartner T. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Prog.Oceanogr.* 54: 7–31.
- Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Lavaniegos, B., Castro-Valdez, R., Gomez-Valdes, J. Mascarenhas Jr., A.S. (2005). Oceanographic conditions west of Baja California, 2002-2003: A weak El Niño and Subarctic water enhancement., 31, 537-552.
- Durazo, R. (2009). Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Progress in Oceanography*. 83: 361–368
- Durazo R, Ramirez M. Anax, Miranda Luis E. y Soto-Mardones Luis A. (2010). Climatología de variables hidrográficas en la Corriente de California frente a Baja California. Libro IMECOCAL en prensa.
- Espinosa-Carreón TL, Strub PT, Beier E, Ocampo-Torres F, Gaxiola-Castro G. (2004). Seasonal and Interannual variability of satellite derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California., *J. Geophysical Res.* **109**, C03039, doi:10.1029/2003JC0020105.
- Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., and Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65 : 414–432.
- Feely, Richard A., Christopher L. Sabine, J. Martin Hernández-Ayón, Debby Ianson, Burke Hales. (2008). Evidence for Upwelling of Corrosive 'Acidified' Water onto the Continental Shelf. *Science* 320, p 1490-1492,
- Friederich-Gernot. E., Walz, P.M., Burczynski, M.G. and Chavez F.P. (2002). Inorganic carbon in the central California upwelling system during the 1997–1999 El Niño–La Niña event. *Progress in Oceanography* 54 (2002) 185:203
- Freeland, H.J., Gatién, G., Huyer, A., Smith, R. L. (2003). Cold halocline in the northern California Current: An invasion of subarctic water, *Geophysical Research Letters*, 30, 1141, doi:10.1029/2002GL016663.
- Gaxiola-Castro G, Durazo R, Lavaniegos B, De la Cruz-Orozco ME, Millán-Núñez E, Soto-Mardones L, Cepeda-Morales J. (2008). Pelagic ecosystem response to interannual variability off Baja California. *Cienc. Mar.* 34: 263-270.
- Goericke, R., Venrick, E., Mantyla, A., Bograd, S.J., Schwing, F.B., Huyer, A., Smith, R.L., Wheeler, P.A., Hoof, R., Peterson, W.T., Chavez, F., Collins, C., Marinovic, B., Lo, N., Gaxiola-Castro, G., Durazo, R., Hyrenbach, K., Sydeman, W.J. (2005). The state of the California Current, 2004–2005: still cool?. *CalCOFI Reports*, 46, 32-71.

- Guinotte J., y V. J. Fabry (2009). The threat of acidification to ocean ecosystems. *The journal of marine education*, 25(1): 2-7.
- Hansell DA, Carlson CA. (2001). Marine dissolved organic matter and carbon cycle. *Oceanography* 14:41-49.
- Hickey BM. (1979). The California Current System, hypotheses and facts. *Prog.Oceanogr.*191-279.
- Hickey, B.M. (1998). Coastal oceanography of western North America from the tip of Baja California to Vancouver Island. En: Robinson, A.R., Brink K.H. (Eds.), *Coastal Segment, The Sea*, Vol 11. Wiley, New York, pp. 345-391.
- Huyer A. (1983). Coastal upwelling in the California Current System. *Prog.Oceanogr.* 12: 259–284.
- Hernández-Ayón J. M., G. Gaxiola Gilberto, Francisco Chavez, TaroTakahashi, Dick Feely, C. L. Sabine, Burke Hales y R. Lara-Lara (2010). Variabilidad Espacial y Temporal del Flujo de CO<sub>2</sub> Océano-Atmosfera En La Costa Oeste de Baja California, México. Ed. INE-CICESE. 10 Anios IMECOCAL. Instituto Nacional de Ecología y Centro de Investigacion Cientifica y de Educacion de Ensenada. *En Prensa*.
- Johnson, K. M., J. M. Sieburth, P. J. L. Williams, and L. Brandstrom, (19879). Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: automation and calibration, *Mar. Chem.*, 21:117 – 133.
- Kempe S. (1982). Valdivia Cruise, October 1981: carbonate equilibria in the Estuaries of Elbe, Weser, Ems and in the Southern Germany Bight. *Mitt. Geol.-Palanont. Inst. Univ. Hamburg* 52:719-742.
- Kleypas, J. A., R. A. Feely, V. J. Fabry, C. Langdon, C. L. Sabine, and L. L. Robbins,(2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St. Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA, and the U.S. Geological Survey, 88 pp.
- Lagerloef GSE, Lukas R, Bonjean F, Gunn JT, Mitchum GT, Bourassa M, Busalacchi AJ. (2003). El Niño Tropical Pacific Ocean surface current and temperature evolution in 2002 and outlook for early 2003. *Geophys. Res. Let.* 30(10), 1514, doi:10.1029/2003GL017096.
- Lavaniegos B.E., Jiménez-Pérez L.C., Gaxiola-Castro G. (2002) Plankton response to El Niño 1997–1998 and La Niña 1999 in the southern region of the California Current. *Progress in Oceanography* 54:33–58.

- Lavaniegos, B.E., Gaxiola-Castro, G., Jiménez-Pérez, L.C., González-Esparza, M.R., Baumgartner, T. and J. García-Córdova (2003). 1997–98 El Niño effects on the pelagic ecosystem of the California Current off Baja California, Mexico. *Geofís. Int.*, 42:483–494.
- Lavaniegos BE, Ohman MD. (2003). Long-term changes in pelagic tunicates of the California Current. *Deep Sea Res.* 50: 2473-2498.
- Lavaniegos, B.E., Ambriz-Arreola, I., Hereu, C.M., Jimenez-Perez, L.C., Cadena-Ramirez, J.L. y 659 García-García, P., (2010). Variabilidad estacional e interanual del zooplancton en la parte 660 Mexicana de la Corriente de California. Ed. INE-CICESE. 10 Años IMECOCAL. Instituto Nacional de Ecología y Centro de Investigación Científica y de Educación de Ensenada. *En Prensa*.
- Lewis, E. and Wallace, D.W.R. (1998). Program Developed for CO<sub>2</sub> System. Rep. 105, 33 pp., Oak Ridge Natl. Lab., U.S. Dep. of Energy, Oak Ridge, Tenn., 1998. (Available at <http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/co2rprt.html>).
- Linacre R. L., J.M., Hernández-Ayon, G. Cervantes-Díaz, F. Delgadillo-Hinojosa, R. Durazo, J.M. Lara-Lara, V. Camacho-Ibar, A. Siqueiros-Valencia, C. Bazán-Guzmán, (2009). Variabilidad temporal en las características físico-químicas de las aguas de un observatorio de monitoreo costero: Estación ENSENADA. *Sometido al Journal Continental Shelf Res.*
- Libes SM. (1992). An introduction to Marine Biogeochemistry. John Wiley and Sons, New York, 734 pp.
- Lynn R. (1967). Seasonal variation of temperature and salinity at 10 meters in the California Current. *CalCOFI Rep.* 11: 157–186.
- Lynn R, Simpson JJ. (1987). The California Current system: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.* 92: 12947-12966.
- Lynn, R.J., Baumgartner, T., García, J., Collins, C.A., Hayward, T.L., Hyrenbach, K.D., Mantyla, A.W., Murphree, T., Shankle, A., Schwing, F.B., Sakuma, K.M. and Tegner, M.J. (1998). The state of the California Current, 1997–1998: Transition to El Niño conditions. *CalCOFI Rep.*, 39: 25–49.
- Lynn R, Bograd S, Chereskin T, Huyer A. (2003). Seasonal renewal of the California Current: The spring transition off California. *J. Geophys. Res.* 108, 3279.
- Mackenzie FT, Brewers JM, Charlson RJ, Hoffman EE, Knauer GA, Kraft JC, Nothing EM, Quack B, Walsh JJ, Whitfield M, Wollast RM (1991). What is the importance of coastal margins process in Global Change? En: Mantoura RF, Martin JM, ,



- Wollast RM (eds.), *Ocean Margins Process in Global Change*. John Wiley and Sons, Chichester. Pp. 433-454.
- McClatchie S, Goericke R, Koslow JA, Schwing FB, Bograd SJ, Charter R, Watson W, Lo N, Hill K, Gottschalk J, L'Heureux M, Xue Y, Peterson WT, Emmett R, Collins C, Gaxiola-Castro G, Durazo R, Kahru M, Mitchell BG, Hyrenbach KD, Sydeman WJ, Bradley RW, Warzybok P, Bjorkstedt E. (2008). The state of the California Current, 2007-2008: La Niña conditions and their effects on the ecosystem. *CalCOFI Rep.* 49:39-76.
- Mehrbach, C., C. H. Culbertson, J. E. Hawley and R. M. Pytowicz, (1973). Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure, *Limnol. Oceanogr.* 18:897 – 907.
- Millero F. J. (1996). *Chemical Oceanography*. CRS Press London. 469.
- Millero F. J., J.-Z. Zhang, K. Lee y Douglas M. Campbell. (1993). Titration alkalinity of seawater. *Marine Chemistry* 44, 153-165.
- Peterson, W.T., Emmett, R., Goericke, R., Venrick, E., Mantyla, A., Bograd, S.J., Schwing, F.B., Hewitt, R., Lo, N., Watson, W., Barlow, J., Lowry, M., Ralston, S., Forney, K.A., Lavaniegos, B.E., Sydeman, W.J., Hyrenbach, D., Bradley, R.W., Warzybok, P., Chavez, F., Hunter, K., Benson, S., Weise, M., Harvey, J., Gaxiola-Castro, G., Durazo, R. (2006). The state of the California Current, 2005-2006: Warm in the north, cool in the south. *CalCOFI Reports*, 47, 30-74.
- Reid JL Jr., Roden GI, Wyllie JG. (1958). Studies of the California Current system, *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Prog. Rep.* 1:27-56.
- Pérez-Brunius P, López M, Parés-Sierra A, Pineda J. (2007). Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *CalCOFI Rep.* 48: 204-214
- Roden, G.I. (1971). Aspects of the transition zone in the Northeastern Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 76, 3462-3475.
- Romero-Centeno R, Zavala-Hidalgo J, Raga B. (2007). Midsummer Gap Winds and Low Level Circulation over the Eastern Tropical Pacific. *Jour. Climate*, 20, 3768-3784.
- Rubén Castro y Antonio Martínez (2010). Variabilidad espacial y temporal del campo de viento frente a la península de Baja California. Libro IMECOCAL en prensa.
- Schwing, F. B., Hayward, T. L., Sakuma, K. M., Murphree, T., Mascarenas, A. S., Larios-Castillo, S. I., Mantyla, A. W., Cummings, S. L., Chavez, F. P., Baltz, K., & Ainley, D. G. (1997). The state of the California current, 1996–1997: mixed signals from the tropics. *CalCOFI Reports*, 38, 22–47.

- Schwing, F. B., Moore, C.S., Kalston, S., Sakuma, K.M. (2000). Record coastal upwelling in the California Current in 1999. *CalCOFI Reports*, 31:148-160.
- Smith SV, Hollibaugh JT. (1993). Coastal metabolism and the oceanic carbon balance. *Reviews of Geophysics* 31:75–89.
- Soto-Mardones, L., A. Pares-Sierra, J. Garcia, R. Durazo y S. Hormazabal, (2004). Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL region (off Baja California) from hydrographic, ADCP and altimetry data. *Deep Sea Res. II*, 51: 785-798.
- Strub P, James C. (2000). Altimeter-derived variability of surface velocities in the California Current System: 2. Seasonal circulation and eddy statistics. *Deep-Sea Res. II*. 47: 831–870.
- Strub PT, James C. (2002). Altimeter-derived surface circulation in the large-scale NE Pacific gyres: Part 1. Seasonal variability. *Progress. Ocean.* 53, 163–183.
- Sverdrup, H. V. y Fleming, RH. (1941). The waters off the Coast of California, March to July, 1937. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr.* (4):261-378.
- Venrick, E., Bograd, S., Checkley, D., Cummings, S., Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Hunter, J., Huyer, A., Hyrenbach, K.D., Lavaniegos, B.E., Mantyla, A., Schwing, F.B., Smith, R.L., Sydeman, W.J., Wheeler P.A. (2003). The State of the California Current, 2002-2003: Tropical and Subarctic influences vie for dominance. *CalCOFI Reports*, 44, 28-60.
- Wheeler, P. A., A. Huyer, and J. Fleischbein (2003), Cold halocline, increased nutrients and higher chlorophyll off Oregon in 2002, *Geophys. Res. Lett.*, 30(15), 8021, doi:10.1029/2003GL017395.
- Wollast R (1991a). The Coastal Carbon Cycle : Fluxes, Sources and Sink. In: R.F..Mantoura, J.M. Martin and R. Wollast eds., *Ocean Margin Processes in Global Change*. John Wiley & Sons, Chichester, pp.365-382.